

Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2

CO-T3812-002

Análisis de Riesgo de Línea Base

(Entregable 2)

Anexo 2: Evaluación del Riesgo por Inundaciones

Preparado para:



COLOMBIA
INTEGRO DE LA
VIDA



Ambiente



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Enero de 2024

Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C., Colombia
www.ingeniar-risk.com



Cardona, Omar-Darío; Bernal, Gabriel A.; Villegas, Claudia P.; González, Diana M.; Rincón, David F.; Molina, John F.; Grajales, Sthefania; Herrera, Sergio A.; Acosta, Mariana; Suárez, Dora C.; Pérez, Maria del Pilar; Marulanda, Paula M.; Marulanda, Mabel C. (2024). Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2, Análisis de Riesgo de Línea Base – A.2 Evaluación del Riesgo por Inundaciones. Banco Interamericano de Desarrollo, Minambiente de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
1.1 MODELO DE CÁLCULO	5
2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN	7
2.1 MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA: CLARK MODIFICADO	7
2.1.1 PROCESO DE TRASLACIÓN	7
2.1.2 PROCESO DE ATENUACIÓN	8
2.2 INUNDACIÓN ALUVIAL – MODELO 2D	9
2.3 REGIÓN DE EVALUACIÓN: LA MOJANA	11
3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN	14
3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES.....	14
3.1.1 ESTUDIO DE RIESGO DE LA MOJANA, FONDO ADAPTACIÓN	14
3.1.2 CENSO NACIONAL DE POBLACIÓN Y VIVIENDA	14
3.1.3 INFORMACIÓN CATASTRAL	16
3.1.4 GOOGLE OPEN BUILDINGS	18
3.1.5 GLOBAL HUMAN SETTLEMENT (GHS) BUILDING HEIGHT	19
3.2 CONFORMACIÓN DEL MODELO DE EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	20
3.2.1 GEORREFERENCIACIÓN.....	20
3.2.2 NÚMERO DE PISOS	21
3.2.3 SECTOR DE USO	22
3.2.4 CATEGORÍA SOCIOECONÓMICA.....	23
3.2.5 SISTEMA ESTRUCTURAL	23
3.2.6 VALORACIÓN ECONÓMICA	24
3.2.7 POBLACIÓN.....	25
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN DE EDIFICACIONES	25
4 MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	34
4.1 MODELO PROBABILISTA DE LA PÉRDIDA.....	34
4.2 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD	37
4.3 TIPOLOGÍAS CONSIDERADAS	38
4.4 VULNERABILIDAD A LA INUNDACIÓN	38

5	<u>EVALUACIÓN DEL RIESGO</u>	<u>41</u>
5.1	MÉTRICAS DEL RIESGO.....	42
5.1.1	LA PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)	42
5.1.2	LA PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)	43
5.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	43
6	<u>REFERENCIAS</u>	<u>49</u>

1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son un fenómeno recurrente en Colombia, dada la hidrografía del país y sus condiciones climáticas. Así mismo, una parte importante de la población, especialmente aquella con ingresos relativamente bajos, se encuentra asentada en las riberas de los ríos o cerca de fuentes de agua, lo cual genera las condiciones propicias para la ocurrencia de desastres por inundación. Una de las regiones de Colombia con una mayor incidencia de inundaciones es la conocida como la Mojana, conformada por 11 municipios en 4 departamentos, y que conforma una región de especial importancia hídrica en el país. En ella confluyen 3 ríos importantes: San Jorge, Cauca y Magdalena, junto con otros afluentes de estos de especial relevancia, como el río Nechí o el río Caribona, y cuyos caudales regulan una vasta región de humedales que actúa naturalmente como amortiguador de las crecientes de estos ríos principales. En la Mojana, la existencia del dique ubicado en el margen izquierdo del río Cauca, influye fuertemente en la manifestación estacional de inundaciones, exacerbadas por la ocurrencia de rompederos sobre el dique, razón por la cual este elemento regulador es incluido en la modelación de la amenaza por inundaciones aquí presentada.

La modelación del riesgo por inundación realizada se concentra en los municipios de Magangué (Bolívar), Ayapel (Córdoba), San Marcos y Guaranda (Sucre), todos ellos pertenecientes a La Mojana. Se incluyen los portafolios de edificaciones residenciales, comerciales, industriales, institucionales, así como de salud y educación para los 4 municipios.

Tabla 1. Municipios seleccionados para la evaluación

Departamento	Municipios
Sucre	<ul style="list-style-type: none"> • San Marcos • Guaranda
Córdoba	<ul style="list-style-type: none"> • Ayapel
Bolívar	<ul style="list-style-type: none"> • Magangué

1.1 Modelo de cálculo

La modelación de la amenaza de inundación por desbordamiento de ríos se compone de 3 submodelos: un modelo meteorológico, mediante el cual se da cuenta de la distribución temporal y espacial de la lluvia como forzamiento meteorológico fundamental en el problema; un modelo hidrológico, el cual resume todos los procesos de transformación que ocurren al interior de una cuenca y como esta responde, en términos del flujo a la salida, ante diferentes aguaceros incidentes; y un modelo hidráulico, mediante el cual es posible simular el comportamiento del volumen de agua aportado por la cuenca al río.

Se construyó un modelo de exposición de edificaciones para los 4 municipios incluidos en la Mojana, el cual incluye los sectores: residencial, salud, educación, comercial, industrial e institucional, cubriendo las zonas urbanas y rurales en toda el área de los municipios, con un total de 83,768 edificaciones. La vulnerabilidad se modela por medio de funciones de vulnerabilidad que capturan la variación del daño con la intensidad sobre diferentes tipos constructivos. Se incluyen tipos constructivos representativos de las características que son relevantes en la relación entre la intensidad de inundación y el daño en edificaciones. La Figura 1 presenta un esquema resumido con los principales componentes del modelo.



Figura 1. Esquema de componentes del modelo de cálculo empleado

2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN

La amenaza se presenta en términos de un conjunto de escenarios, donde cada uno de estos se caracteriza por una frecuencia anual de ocurrencia y donde las intensidades se definen en términos de dos parámetros: el valor esperado y la desviación estándar del tirante de inundación

2.1 Modelo de precipitación-escorrentía: Clark Modificado

Clark modificado, o ModClark es un modelo paramétrico distribuido, es decir, las variaciones espaciales de las características y procesos hidrológicos son consideradas de manera explícita (Brunner & Bonner, 1994). Esto se traduce en que se tienen en cuenta las variaciones en el tiempo de viaje hacia el punto de concentración, desde todos los puntos de la cuenca de análisis.

El modelo Clark modificado define dos procesos fundamentales en la transformación de un volumen de lluvia en escorrentía directa:

- La traslación o movimiento del exceso de precipitación a lo largo de los drenajes de la cuenca.
- La atenuación, o disminución de la magnitud de descarga a medida que el exceso de precipitación es almacenado en la cuenca (en el suelo, superficie y canales).

2.1.1 Proceso de traslación

El tiempo que le toma a una partícula de agua llegar a la salida de la cuenca se modela mediante una malla de tiempos de viaje. Para cada celda del territorio, se determina el tiempo hasta la salida de la siguiente manera:

$$t_{celda} = t_c \frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecuación 1}$$

en donde t_{celda} es el tiempo de viaje del agua desde la celda en consideración, t_c es el tiempo de concentración de la cuenca, d_{celda} es la distancia de la celda en consideración a la salida de la cuenca, y $d_{m\acute{a}x}$ es la máxima distancia de alguna celda a la salida de la cuenca.

El tiempo de concentración puede calcularse aplicando diferentes ecuaciones de diferentes autores, teniendo en cuenta las características de la cuenca para poderlas aplicar, por ejemplo la ecuación de Kirpich (1940), la cual se expresa como:

$$t_c = 0.0003245 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77} \quad \text{Ecuación 2}$$

en donde t_c es el tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal en m y S es la pendiente media del cauce principal.

Con la información del cauce y la topografía general se obtiene la pendiente media del cauce empleado el método de Taylor-Schwarz (Springall, 1970) la cual está dada por:

$$S = \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde la longitud del cauce principal L se divide en n número de segmentos de longitud l y para cada uno de ellos se calcula su pendiente S .

Del área de cada celda se determina el volumen de escurrimiento en cada momento del tiempo. Estos volúmenes son enrutados usando el modelo de reservorio lineal dentro del proceso de atenuación.

2.1.2 Proceso de atenuación

El almacenamiento de corto plazo juega un papel muy importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrentía. En el método de Clark, este almacenamiento se modela como un reservorio lineal. En un reservorio lineal aplica la ecuación de continuidad de la forma:

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad \text{Ecuación 4}$$

en donde $\frac{dS}{dt}$ es la tasa de cambio del almacenamiento en la cuenca, en el tiempo t , I_t es el caudal de entrada, y O_t es el caudal de salida. En el modelo de reservorio lineal, el caudal de salida está relacionado con el volumen almacenado de manera proporcional:

$$S_t = RO_t \quad \text{Ecuación 5}$$

en donde R es el parámetro de reservorio lineal. Al combinar y solucionar las ecuaciones anteriores mediante un enfoque sencillo de diferencias finitas, se obtiene que

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad \text{Ecuación 6}$$

en donde C_A y C_B son coeficientes de enrutamiento, que se calculan como:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$C_B = 1 - C_A \quad \text{Ecuación 8}$$

El caudal de salida promedio para el tiempo t es entonces:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Para cada celda de la malla de cálculo, se calcula un caudal de salida promedio, para cada momento del tiempo. Al final, la suma de los caudales promedio, en cada paso de tiempo, da el hidrograma de salida final (Q_t).

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_{celdas}} \bar{O}_{i,t} \quad \text{Ecuación 10}$$

De esta manera, el modelo Clark modificado puede verse esquemáticamente de la siguiente manera:

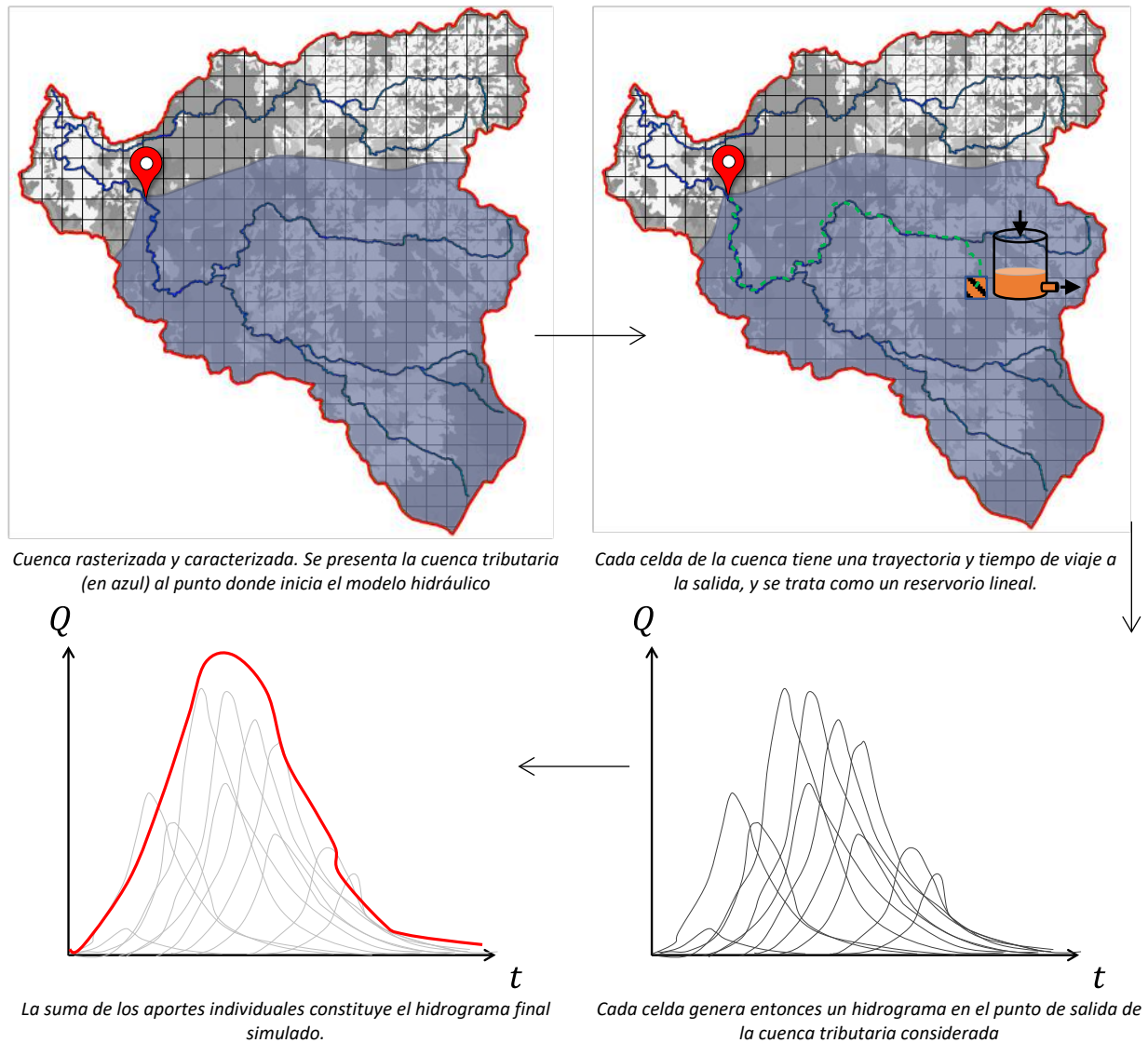


Figura 2. Ilustración del modelo lluvia-escorrentía de Clark modificado.

A diferencia del método de Clark (1945), que es un modelo agrupado, el modelo ModClark (Peters & Easton, 1996) presenta el cálculo y caracterización de los procesos de traslación y atenuación antes descritos de manera distribuida en la cuenca de análisis por medio de una malla previamente definida. De cada una de las celdas de la malla de análisis se obtienen tiempos de viaje y relaciones de atenuación que derivan en una serie de hidrogramas en la salida de cada una de las celdas. A partir de la envolvente de dichos hidrogramas se obtiene el hidrograma de salida en el punto de concentración deseado en el análisis.

2.2 Inundación aluvial – modelo 2D

La modelación hidráulica bidimensional se basa en asumir que la lámina de agua que transita por el terreno es lo suficientemente delgada como para considerar despreciables las corrientes verticales. Si se asume que el comportamiento en la dirección vertical se asemeja siempre a su promedio, es decir las variaciones son muy pequeñas, entonces es posible modelar el flujo como uno bidimensional. El método acá

presentado considera un modelo numérico bidimensional con base en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. Se considera el flujo sobre una región con o sin agua.

Las ecuaciones dinámicas que describen la conservación de cantidad de movimiento son:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad \text{Ecuación 12}$$

en donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x y y respectivamente, n es el coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning, h es el nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural y t es el tiempo.

El principio de la conservación de masa (ecuación de continuidad) en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = 0 \quad \text{Ecuación 13}$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo ∂x y ancho ∂y . Para calcular el flujo de agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales conformado por las ecuaciones anteriores y considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

En este tipo de modelos, la superficie se establece por medio de un modelo digital de elevación, que incluya la batimetría del cauce y todo el terreno natural alrededor de este o por donde se considere pueda transitar el agua. El territorio se rasteriza por medio de una malla que define los elementos en los cuales se resolverán las ecuaciones del flujo, como se ilustra en la Figura 3.

En la misma Figura 3 se ilustran también los flujos y estados de conservación de masa y cantidad de movimiento en una celda y un instante de tiempo arbitrario. Al interior de la celda, la masa (M) y la cantidad de movimiento (\vec{m}) cambian con el tiempo. Existen además flujos espaciales de masa y de cantidad de movimiento, asociados al movimiento bidimensional del flujo de agua. Estos flujos describen el cambio en la masa y la cantidad de movimiento en ambas direcciones ortogonales, x y y . Finalmente, el forzamiento que causa el movimiento es esencialmente la fuerza gravitacional (\vec{D}_g), a la cual se oponen las fuerzas de fricción del flujo con el terreno natural (\vec{D}_{bed}), y que se representan con el coeficiente n de Manning en las ecuaciones 11 y 12.

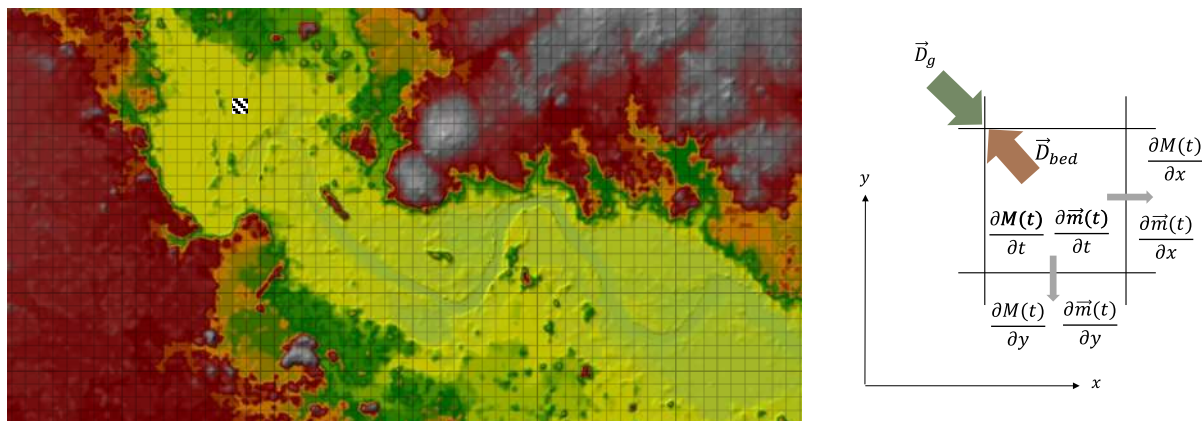


Figura 3. Izq.: Ilustración de un modelo digital del terreno. Der.: Ilustración de flujos y tasas de cambio en una celda arbitraria.

2.3 Región de evaluación: La Mojana

La Mojana es una región de especial importancia hídrica en el norte de Colombia entre las estribaciones de la Cordillera Occidental y la Llanura del Caribe. En ella confluyen 3 ríos importantes: San Jorge, Cauca y Magdalena, junto con otros afluentes de estos de especial relevancia, como el río Nechí o el río Caribona, y cuyos caudales regulan una vasta región de humedales que actúa naturalmente como amortiguador de las crecientes de estos ríos principales. La Figura 4 muestra un mapa general de ubicación de la región, conformada por 11 municipios de 4 departamentos.

En la Mojana, la existencia del dique ubicado en el margen izquierdo del río Cauca, influye fuertemente en la manifestación estacional de inundaciones, exacerbadas por la ocurrencia de rompederos sobre el dique. Dada su relevancia, el dique marginal es incluido en la modelación de la amenaza por inundaciones en los municipios de esta región. En este trabajo se usa el mismo modelo de amenaza empleado en el estudio de riesgo desarrollado por el Fondo Adaptación en la región (Cardona 2015; Obregón et al. 2014), que es posiblemente el modelo más completo y de mayor detalle existente en el país a nivel de inundaciones en una región geográfica tan extensa y compleja como la Mojana. Este modelo tiene las siguientes características generales:

- Modelo acoplado 1D/2D. 1D en canales y ríos; 2D en zonas de desbordamiento.
- Modelo basado en eventos, totalmente compatible con la metodología de evaluación probabilista del riesgo.
- Resolución espacial topográfica de 10 cm, a partir de imágenes LiDAR.
- Forzamientos:
 - Caudal base y crecientes, con variaciones estacionales, de los ríos Cauca, San Jorge, Nechí, Caribona y el brazo de Loba del río Magdalena.
 - Lluvia incidente directamente sobre el territorio.
- Modificadores:
 - Dique marginal del río Cauca, modelado por tramos de 100 m con funciones de fragilidad por sobrepaso, inestabilidad y tubificación para la simulación de la falla.
 - Red de caño naturales de drenaje Cauca-San Jorge.
 - Red de canales arqueológicos Zenú.
 - Almacenamiento local en ciénagas (37% del territorio).

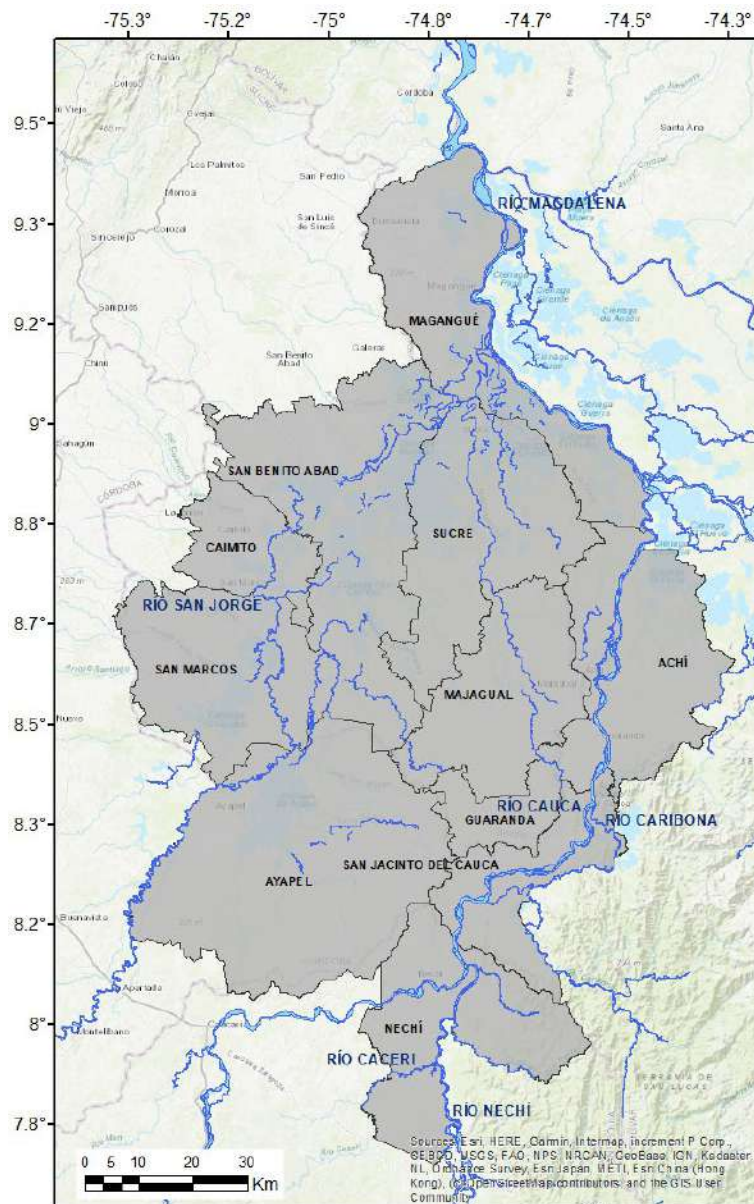


Figura 4. Mapa general de municipios de La Mojana.

La Figura 5 muestra mapas de amenaza integrada para algunos periodos de retorno seleccionados bajo el clima base, como ilustración de los resultados de la modelación de la amenaza.

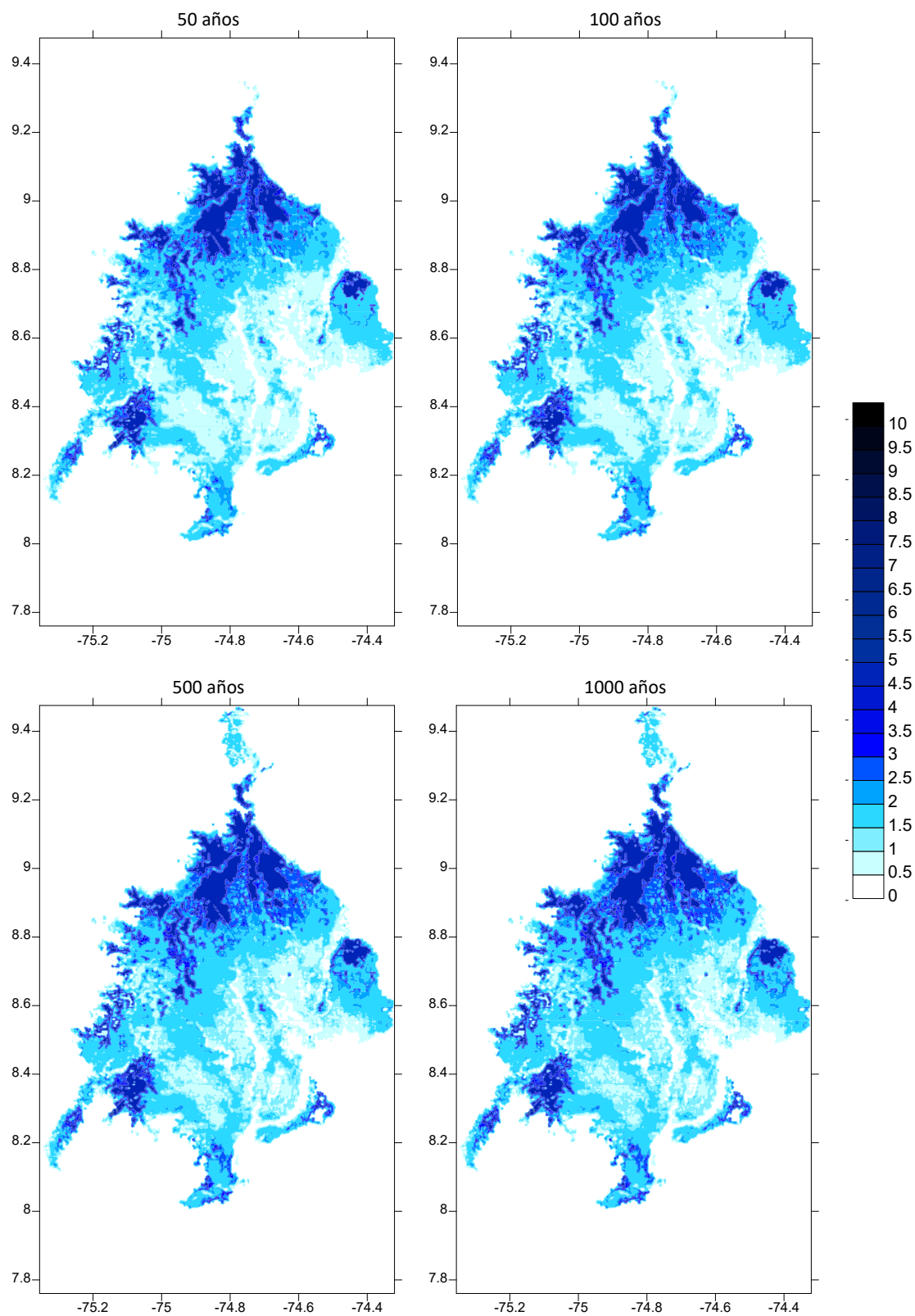


Figura 5. Mapas de amenaza por inundación bajo el clima base en La Mojana. Altura de inundación en metros.

3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN

A continuación, se presenta la conformación del modelo de exposición de edificaciones, para el cual se consultaron como fuentes principales la información catastral publicada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 desarrollado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE y la información disponible en estudios realizados previamente en el área de estudio.

3.1 Información disponible para la construcción del modelo de exposición de edificaciones

3.1.1 Estudio de riesgo de La Mojana, Fondo Adaptación

De 2013 a 2015 el Fondo Adaptación llevo a cabo el estudio de riesgo por inundación en la región de la Mojana, como insumo para lo que eventualmente sería la formulación del *Plan de acción integral para la reducción del riesgo de inundaciones y adaptación al cambio climático en la región de La Mojana* (Fondo Adaptación, 2015). El estudio de riesgo contempló la conformación de un modelo de exposición multisectorial, para los 11 municipios de La Mojana, a nivel de predios individuales. Los detalles de este trabajo pueden consultarse en Cardona, 2015. Este estudio establece un punto de partida fundamental para el desarrollo del actual modelo. En general, los modelos de exposición generados por Cardona (2015) son acá actualizados y complementados con la mejor información disponible a la fecha.

3.1.2 Censo Nacional de Población y Vivienda

Entre las variables consultadas en el Censo Nacional de Población y Vivienda, realizado en el año 2018, se dispone de estadísticas de vivienda como material predominante en las paredes exteriores, estrato del servicio de energía, tipo de vivienda, población, entre otras. Esta información fue consultada a través del sistema de procesamiento censal en línea Redatam, en el cual se encontró que el máximo nivel de resolución de la información es a nivel de manzana.

Aunque la distribución de las variables del censo no se encuentra georreferenciada a nivel de detalle de vivienda, permite identificar a nivel de manzana las características predominantes de las viviendas que la componen, y la distribución de estas variables en los municipios. En la Tabla 2 y Figura 6 se presenta la distribución de unidades de vivienda por municipio según el estrato del servicio de energía. Por su parte, la Tabla 3 y la Figura 7 muestran la distribución de unidades de vivienda por municipio según el material predominante en paredes exteriores.

Tabla 2. Distribución de unidades por municipio según el estrato del servicio de energía

Estrato del servicio de energía	Número de unidades			
	Magangué	Ayapel	San Marcos	Guaranda
Sin Estrato	135	276	141	82
Estrato 1	26,401	8,099	10,762	3,781
Estrato 2	5,418	714	1,736	14
Estrato 3	147	18	465	2
Estrato 4	15	5	7	0

Estrato del servicio de energía	Número de unidades			
	Magangué	Ayapel	San Marcos	Guaranda
Estrato 5	7	1	2	0
Estrato 6	4	0	0	0
No sabe el estrato	32	14	8	3
No aplica	5,427	2,474	2,516	718
Total	37,586	11,601	15,637	4,600

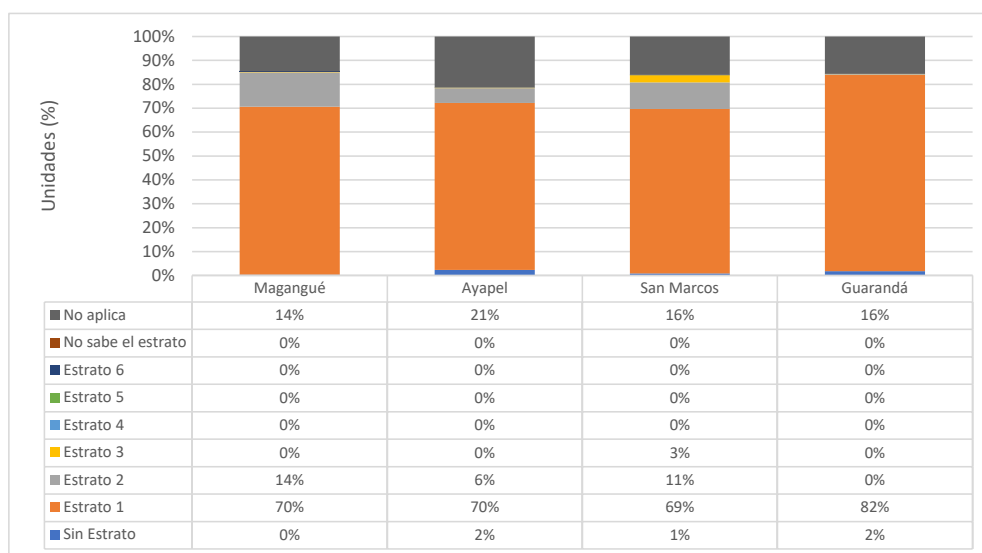


Figura 6. Distribución porcentual por municipio del estrato del servicio de energía

Tabla 3. Distribución de unidades por municipio según el material predominante en paredes exteriores

Material predominante en paredes exteriores	Número de unidades			
	Magangué	Ayapel	San Marcos	Guarandá
Bloque, ladrillo, piedra, madera pulida	25,969	6,584	10,338	2,562
Concreto vaciado	1,690	346	615	33
Material prefabricado	676	81	20	4
Guadua	210	37	91	2
Tapia pisada, bahareque, adobe	941	28	1,880	18
Madera burda, tabla, tablón	2,451	1,553	268	1,212
Caña, esterilla, otros vegetales	702	390	229	119
Materiales de deshecho	616	968	196	34
No tiene paredes	2	0	0	0
No aplica	4,329	1,614	2,000	616
Total	37,586	11,601	15,637	4,600

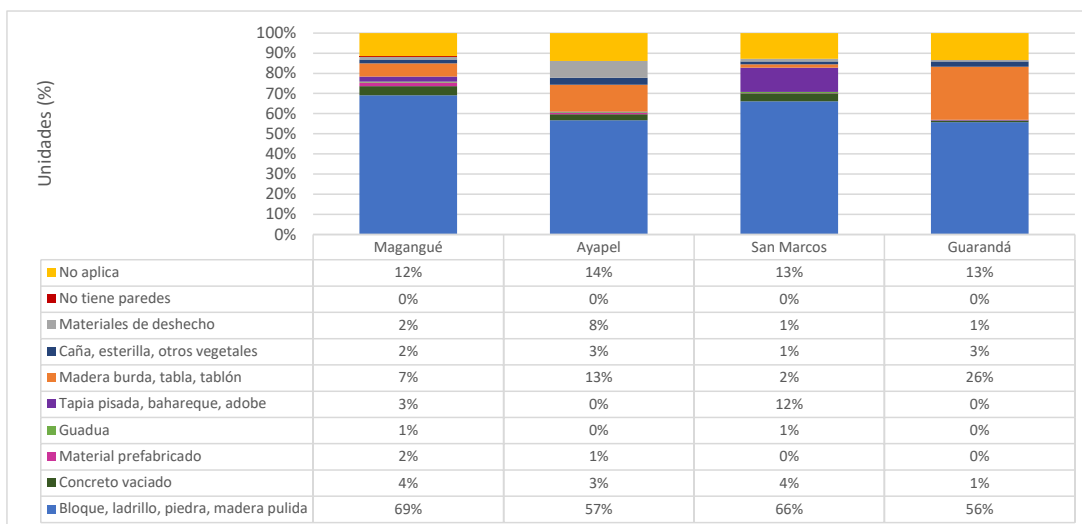


Figura 7. Distribución porcentual por municipio del material predominante en paredes exteriores

De acuerdo con las proyecciones de población calculadas por el DANE con base en los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV- 2018, la población estimada para el año 2023 en los municipios objeto de estudio, se distribuye como se muestra en la Figura 8.

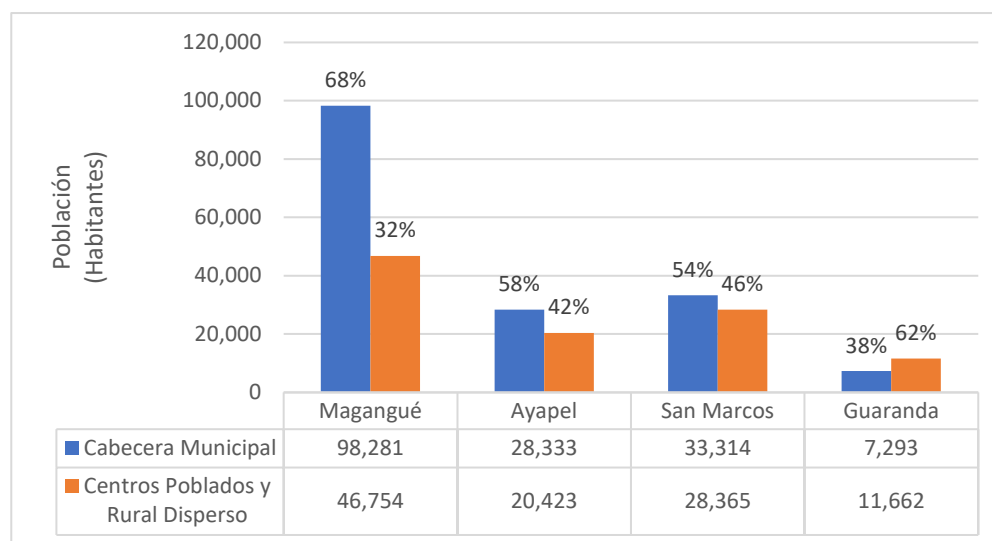


Figura 8. Distribución de población

3.1.3 Información catastral

En los datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC se consultó la información catastral disponible para los municipios en el área de estudio. Entre la cual se encuentra la información cartográfica asociada al predio, que permite su georreferenciación, y la información alfanumérica a nivel de construcciones, que permite la caracterización de las estas a partir de los atributos presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Atributos descriptivos de las construcciones en los datos abiertos de catastro (bases Registro 1 y Registro 2)

REGISTRO 1	REGISTRO 2
Departamento	Departamento
Municipio	Municipio
Dirección	Zona física
Destino	Zona económica
Área del terreno	Área del terreno
Área construida	Habitaciones
	Baños
	Locales
	Pisos
	Tipificación
	Uso
	Puntaje
	Área construida

Los destinos económicos indicados en la base Registro 1 de los datos abiertos de catastro del IGAC, se agruparon en sectores de uso generales como se muestra en la Tabla 5 para cada municipio.

Tabla 5. Destino Registro 1 – IGAC por municipio

Destino Registro 1 IGAC	Sector de uso	Magangué	Ayapel	San Marcos	Guaranda
Habitacional	Residencial	34,342	8,014	11,642	1,854
Industrial	Industrial	25	3	20	0
Comercial	Comercial	1,457	250	89	28
Cultural	Institucional	0	1	14	0
Recreacional	Institucional	5	232	1	1
Salubridad	Salud	65	21	1	6
Institucionales	Institucional	164	81	49	16
Educativo	Educación	423	93	13	0
Religioso	Institucional	117	41	53	1
Agroindustrial	Industrial	0	0	0	0
Uso Publico	Institucional	26	0	0	0
Lote urbanizable no urbanizado	No válido	1,005	1	31	0
Lote urbanizado no construido	No válido	420	29	4	4
Lote no urbanizable	No válido	0	0	1	0
Agrícola	No válido	0	6	6	0
Pecuario	No válido	0	0	0	0
Forestal	No válido	0	0	0	0
Servicios Especiales	No válido	6	0	0	0
Agropecuario	No válido	145	39	287	39
Minero	No válido	0	0	5	0
Sin dato		849	44	82	3
Total		39,049	8,855	12,298	1,952

La información cartográfica también incluye atributos de las construcciones como por ejemplo el número de pisos, cuya distribución por municipio se presenta en la Figura 9.

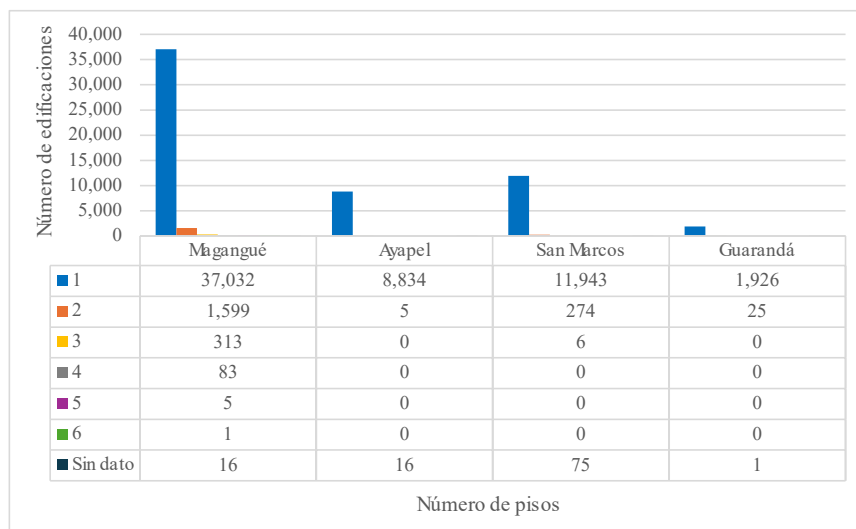


Figura 9. Número de pisos por municipio – IGAC

3.1.4 Google Open Buildings

Para la actualización del modelo de exposición para aquellos municipios en los que no se encuentra información disponible en las fuentes mencionadas anteriormente, se consultó el conjunto de datos abiertos “Open Buildings” de Google, el cual conformado por una colección de huellas de edificaciones de diferentes regiones del mundo. Esta información es derivada del modelo denominado U-Net, utilizado en el análisis de imágenes satelitales, que considera las diferentes variaciones de estas para la identificación de las huellas.

Además de la geometría de la huella de una edificación, la base de datos cuenta con los atributos de: i) coordenadas del centroide (latitud y longitud), ii) área del polígono -en metros-, y iii) el puntaje de confianza de la edificación identificada.

Google solo incluye en Open Buildings elementos que tengan un valor de confianza superior a 0.65 como se observa en la Figura 10. Sin embargo, utilizando criterios adicionales dados por las características de la región de estudio, se pueden definir umbrales de confianza mayores que permitan reducir la inclusión de falsas detecciones.



Figura 10. Huellas identificadas en Google Open Buildings en la región de la Mojana (Magangué). Elaboración propia a partir de Google Earth Engine

Esta fuente de información tiene como fecha de actualización mayo de 2023, por lo que se considera la fuente de información geométrica más actualizada en comparación con fuentes de información oficiales como es el IGAC.

3.1.5 Global Human Settlement (GHS) Building Height

El Joint Research Center (JRC) de la Unión Europea ha elaborado una base de información espacial a nivel global que presenta datos de población, niveles de urbanización y edificaciones. Entre los productos elaborados se encuentra un dataset raster que representa la distribución espacial de la altura media de los edificios en un píxel de resolución de 100 m. La Figura 11 presenta el raster descrito para el casco urbano de Magangué en la región de La Mojana.

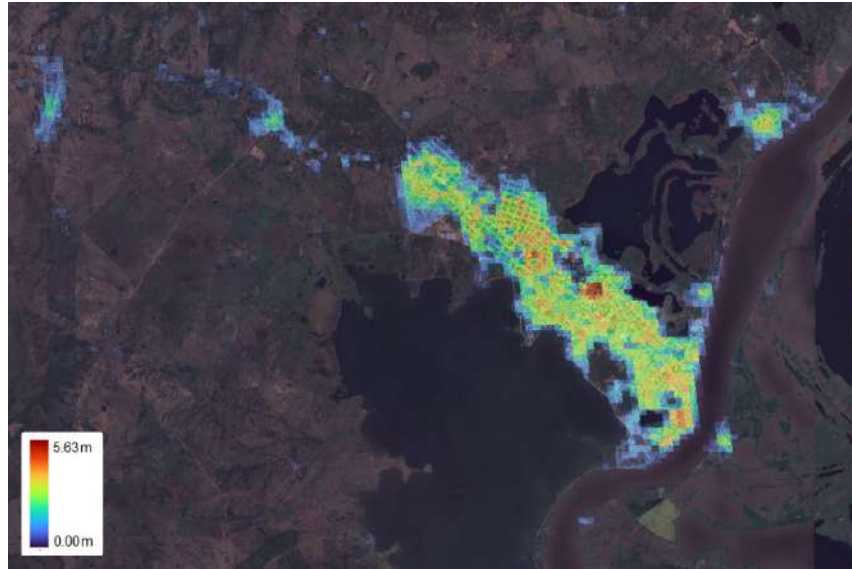


Figura 11. Raster de altura media de edificaciones en la región de La Mojana (Magangué). Elaboración propia a partir de GHS – Building Height (JRC, 2023)

La información del JRC adiciona -cuando no se cuente con dicho atributo- a los elementos expuestos un valor de altura media, que permite la estimación de un número de pisos para las edificaciones. El número de pisos es un atributo relevante en la composición del modelo de exposición dado que contribuye a la caracterización física del elemento que incidirá en su vulnerabilidad y la estimación de área construida, que define de manera directa en la valoración económica del elemento.

La información satelital utilizada para derivar este producto tiene como fecha de corte el año 2018, que se considera apropiada en la medida que se asume la no existencia de cambios significativos en las alturas medias en los municipios de estudio desde esa fecha.

3.2 Conformación del modelo de exposición de edificaciones

Para construir el modelo de edificaciones expuestas, se partió de la información disponible en Cardona, 2015 la cual se complementó y actualizó con los datos de catastro para las zonas urbanas y rurales en los municipios que cuentan con información pública. También se complementó con la distribución de las variables publicadas a nivel de manzana por el DANE.

3.2.1 Georreferenciación

Para georreferenciar las edificaciones se tomó como principal fuente de información las edificaciones incluidas en Cardona (2015), complementada con las nuevas edificaciones registradas en el conjunto de datos abiertos de Open Buildings. En este modelo de identificación de huellas de construcción el rendimiento varía según las regiones, dado que pueden existir multiplicidad de errores de identificación asociados a i) el nivel de urbanización del área de estudio, asociado a la proximidad de edificaciones, y ii) el tipo de superficie, específicamente del contraste entre las cubiertas y la cobertura del suelo circundante (Sirko et al, 2021). Por lo anterior, la definición del valor de umbral de confianza está sujeto a las

características propias de cada área de estudio. En el presente caso, el valor de umbral se obtiene de la realización de un análisis comparativo de la información vectorial de las huellas y las imágenes satelitales, así como de la exclusión de huellas con áreas significativamente bajas, de tal manera que se garantice, en lo posible, la exclusión de erróneas detecciones. Se emplea un valor umbral de confianza para Open Buildings de 0.78.

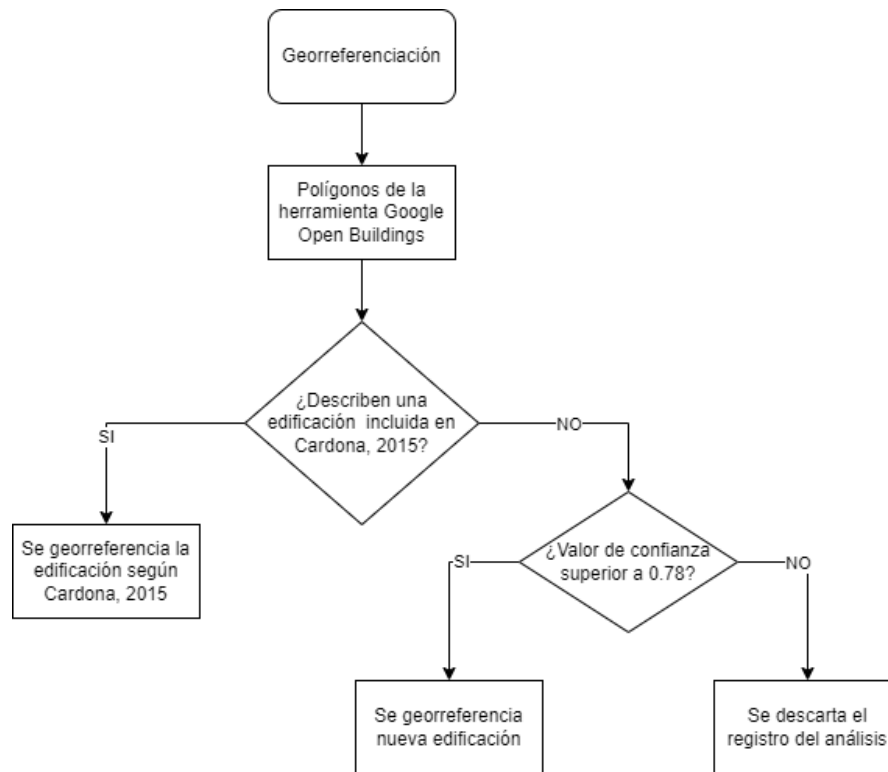


Figura 12. Georreferenciación de las edificaciones

3.2.2 Número de pisos

Por su parte, el número de pisos se establece también dando prioridad a la información de Cardona (2015), complementando con fuentes secundarias, como se ilustra en la Figura 13.

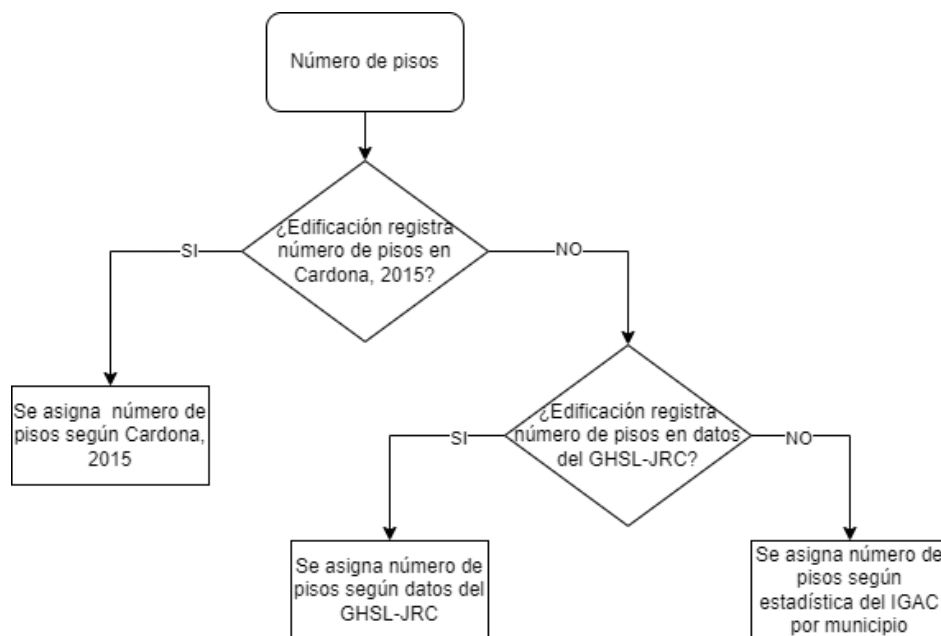


Figura 13. Asignación de número de pisos

3.2.3 Sector de uso

Para el sector de uso, la Figura 14 presenta el diagrama de flujo correspondiente al procedimiento de generación del dato.

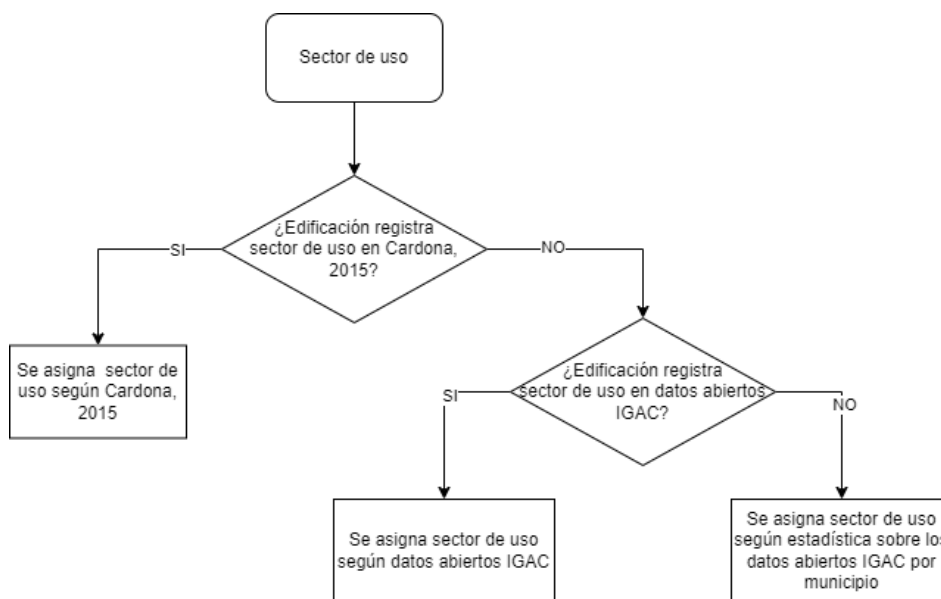


Figura 14. Asignación de sector de uso

3.2.4 Categoría socioeconómica

Para determinar la categoría socioeconómica de las edificaciones, la fuente de información corresponde a la variable “Estrato del servicio de energía” del Censo de Población y vivienda, información que se encuentra publicada a nivel de resolución de manzana y que se agrupó en las categorías socioeconómicas indicadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Categoría socioeconómica por municipio

Estrato del servicio de energía	Categoría socioeconómica	Magangué	Ayapel	San Marcos	Guaranda
Estrato 1	Baja	99.5%	99.7%	96.3%	99.9%
Estrato 2					
Estrato 3	Media	0.5%	0.3%	3.6%	0.1%
Estrato 4					
Estrato 5	Alta	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Estrato 6					

La asignación de la categoría socioeconómica para las edificaciones que no se encontraron localizadas dentro de alguna de las manzanas del DANE, se realizó con base en la estadística indicada en la Tabla XX según el municipio al que pertenezca.

3.2.5 Sistema estructural

La Figura 15 resume el procedimiento para la asignación de un sistema estructural. Los sistemas estructurales considerados se describen en la sección 4.3.

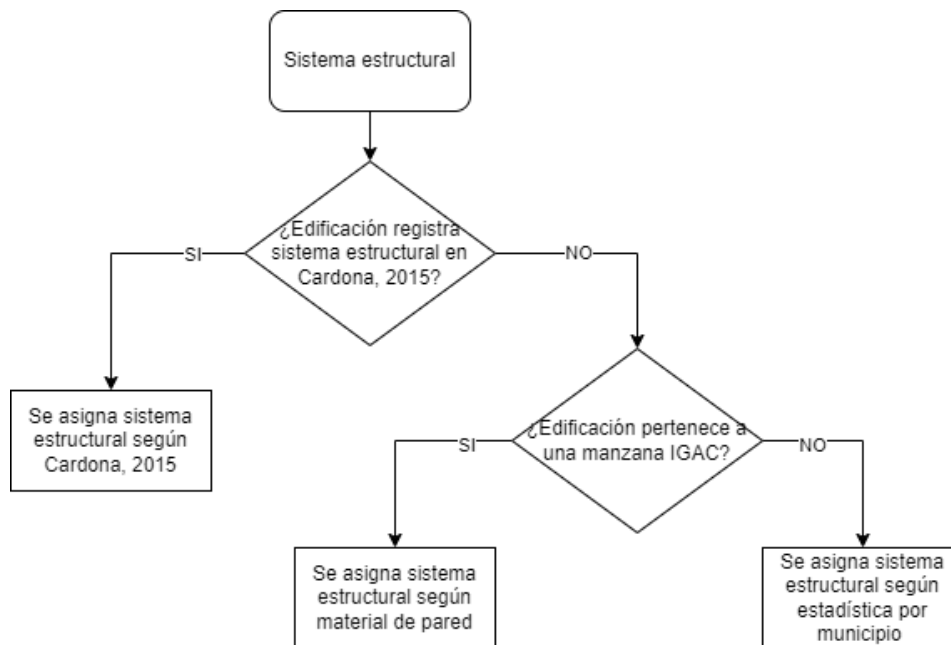


Figura 15. Asignación de sistema estructural

La estadística de sistemas estructurales descrita en Cardona, 2015 para los municipios objeto de estudio, discriminando por su ubicación en el área urbana o rural se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Sistema estructural por municipio, Cardona, 2015

Sistema estructural	Magangué		Ayapel		San Marcos		Guaranda	
	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural
Concreto	3%	1%	0%	1%	1%	2%	0%	1%
Bloque	74%	45%	31%	12%	84%	47%	87%	24%
Ladrillo	4%	11%	60%	4%	2%	2%	0%	1%
Prefabricada	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Acero	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tubo con cemento	0%	0%	1%	1%	0%	0%	0%	0%
Tubos Metálicos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Madera	11%	31%	7%	77%	6%	32%	12%	67%
Bahareque	6%	10%	1%	5%	7%	17%	1%	7%

3.2.6 Valoración económica

Los valores por metro cuadrado determinados en Cardona (2015) según el sector de uso fueron actualizados al año 2023, de acuerdo con un índice de valoración predial (IVP) aproximado. El IVP¹ desarrollado por el DANE en conjunto con el IGAC, es un indicador que se calcula para una muestra urbana en las principales ciudades del país y para los diversos tipos de edificaciones en las diferentes categorías socioeconómicas. De acuerdo con esta lógica, se asumió un IVP correspondiente al 20% del IVP nacional acumulado entre 2015 y 2022, dado que para las ciudades objeto de estudio un gran porcentaje de las edificaciones pertenecen al área rural y a la categoría socioeconómica baja. En la siguiente tabla se muestran los valores por metro cuadrado para cada sector de uso.

Tabla 8. Valor por metro cuadrado según sector de uso

Sector de uso	Valoración económica/m ²	
	Cardona, 2015	Actualizado año 2023
Residencial	900,000	1,080,000
Comercial	1,800,000	2,160,000
Industrial	2,970,000	3,564,000
Institucional	2,700,000	3,240,000
Educación	1,500,000	1,800,000
Salud	2,800,000	3,360,000
Rural	1,400,000	1,680,000

¹ El IVP mide la variación en el valor de los bienes inmuebles con destino económico habitacional. Se calcula con el promedio de las variaciones de los valores comerciales reportados en una muestra de predios visitados.

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/indice-de-valoracion-predial/historicos-indice-de-valoracio>

3.2.7 Población

Los totales de población por municipio corresponden a las proyecciones de población calculadas para el año 2023 por el DANE, con base en los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV-2018. Los totales de población por municipio y sector (urbano y rural) se distribuyeron de acuerdo con la distribución de población por manzana, que a su vez se distribuyó en las edificaciones que la conforman, teniendo en cuenta el área construida.

3.3 Caracterización de la exposición de edificaciones

De la Figura 16 la Figura 34 se muestra la distribución de valor expuesto y número de edificaciones para las variables descritas en los numerales anteriores.

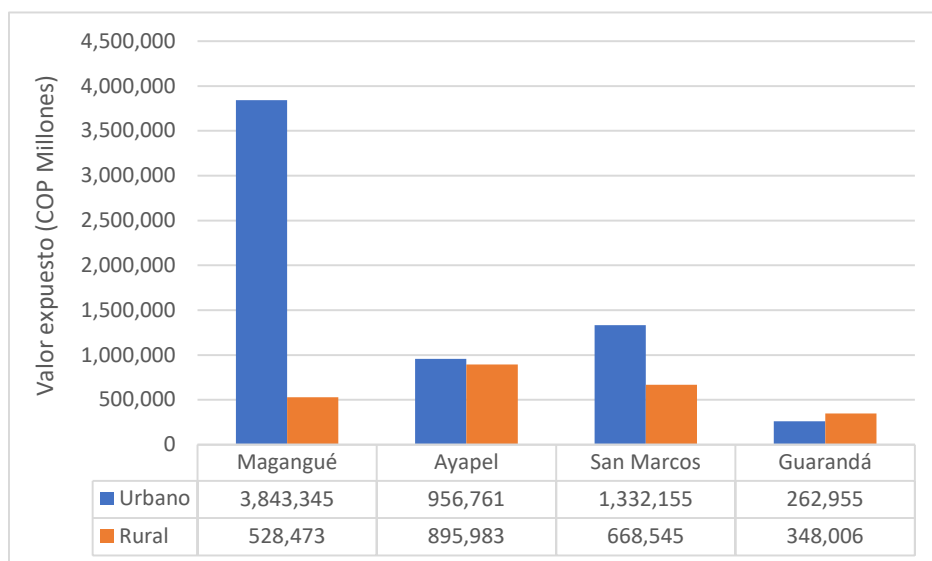


Figura 16. Valor expuesto por municipio

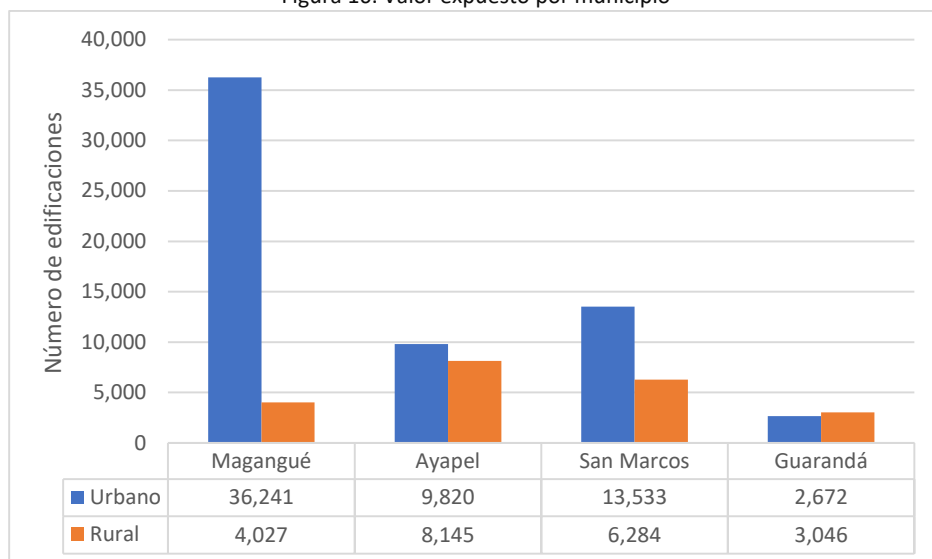


Figura 17. Número de edificaciones por municipio

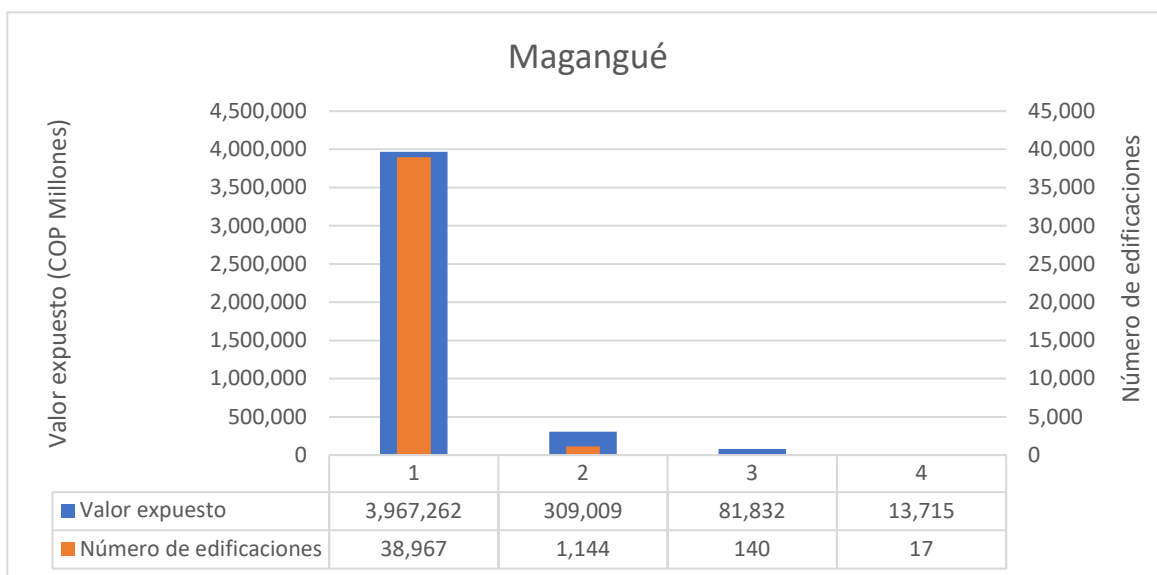


Figura 18. Número de pisos – Magangué

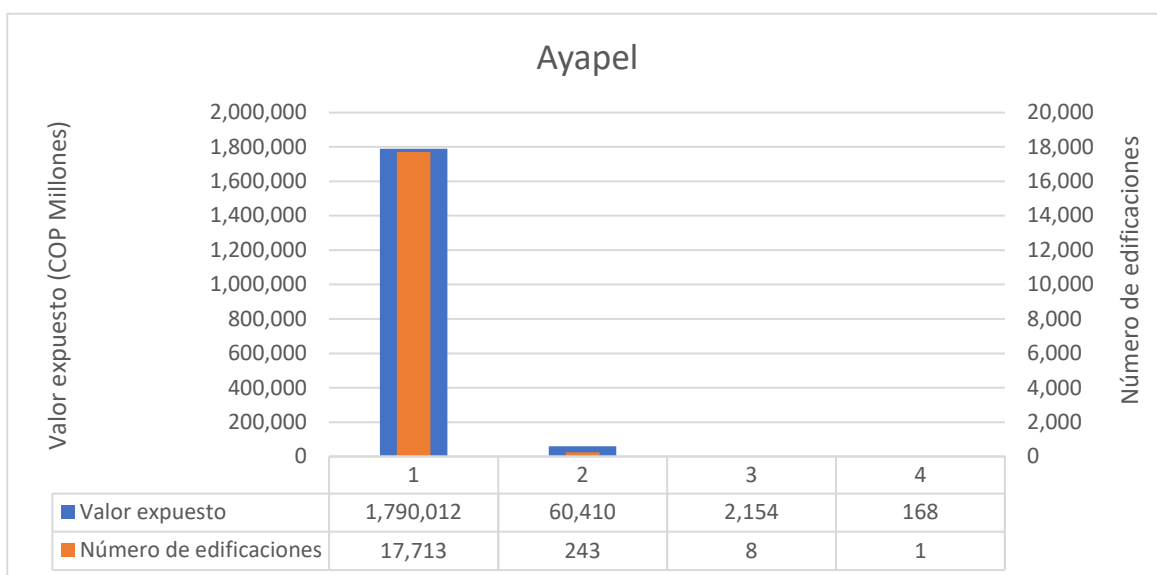


Figura 19. Número de pisos – Ayapel

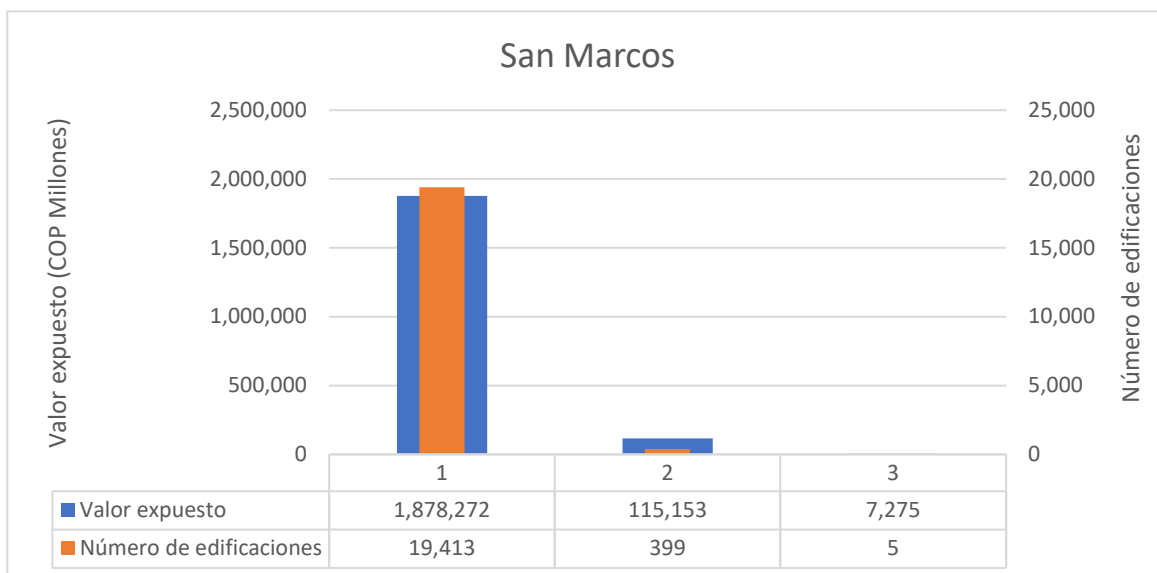


Figura 20. Número de pisos – San Marcos

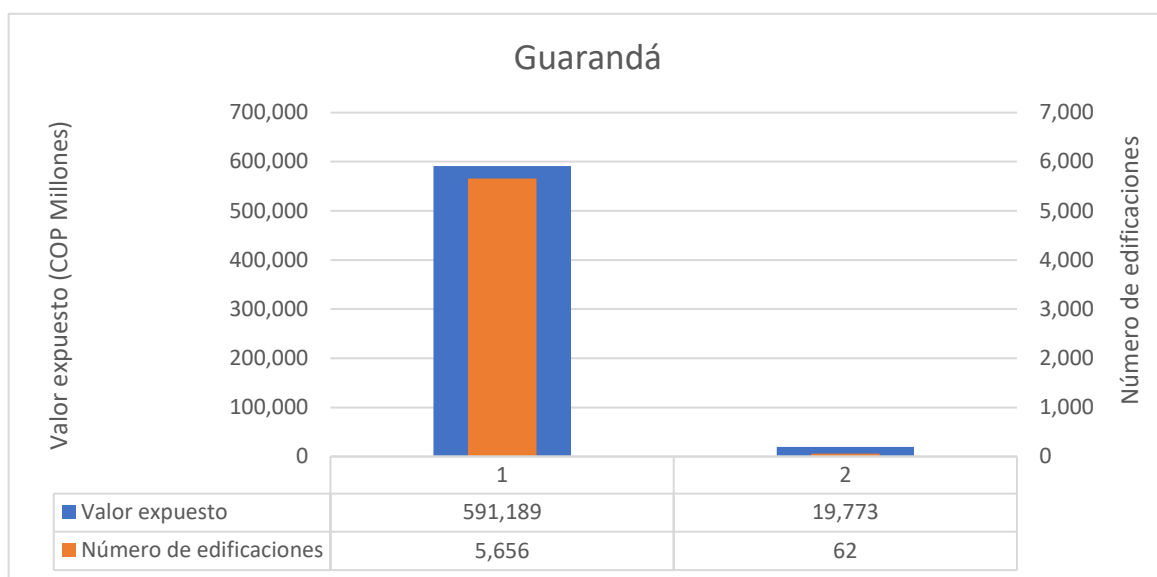


Figura 21. Número de pisos – Guaranda

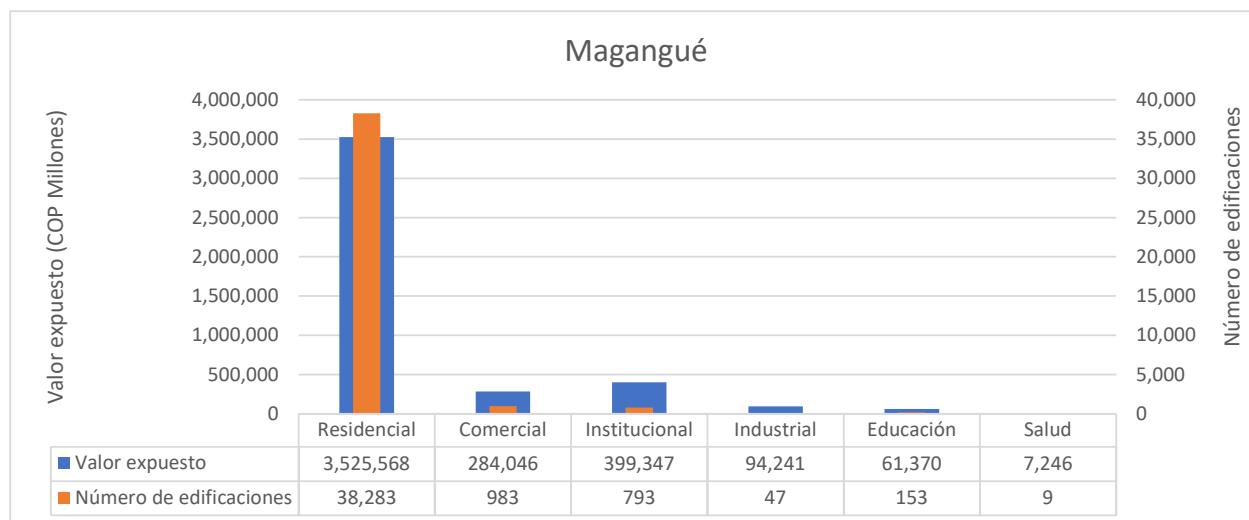


Figura 22. Sector de uso - Magangué

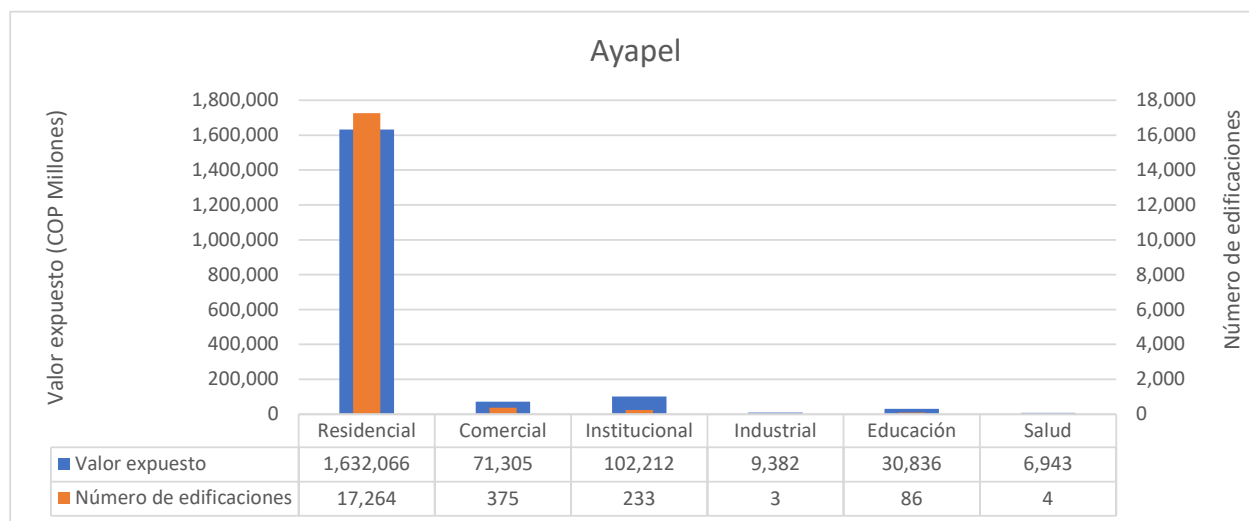


Figura 23. Sector de uso - Ayapel

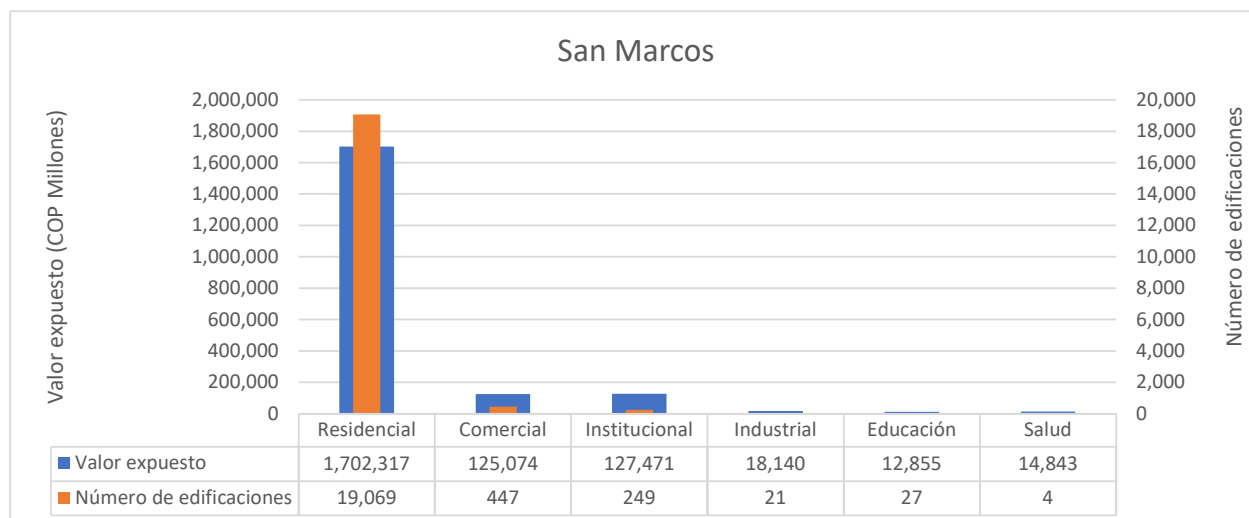


Figura 24. Sector de uso – San Marcos

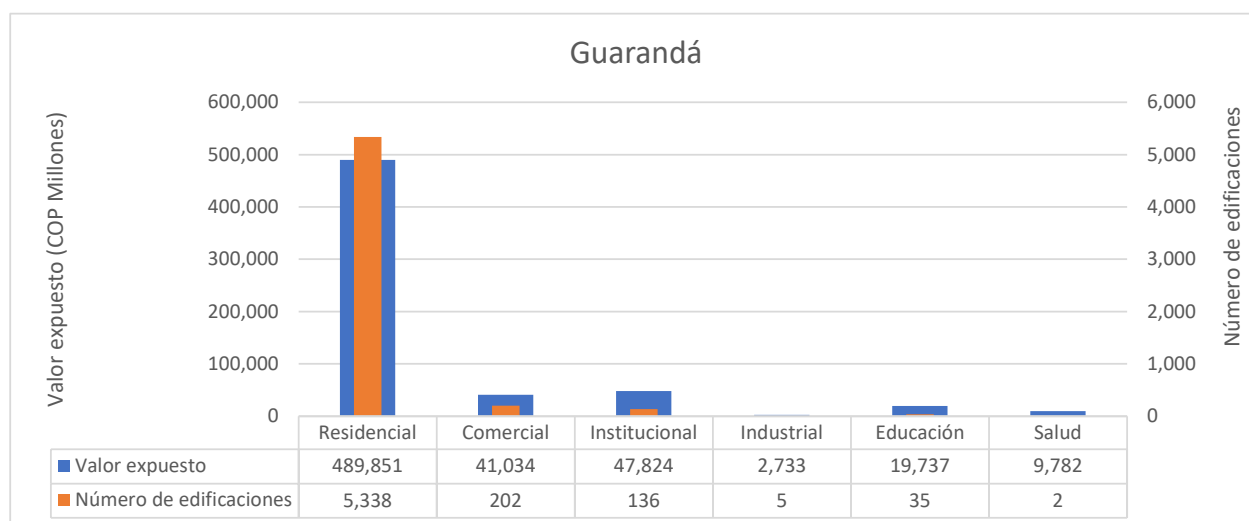


Figura 25. Sector de uso – Guaranda

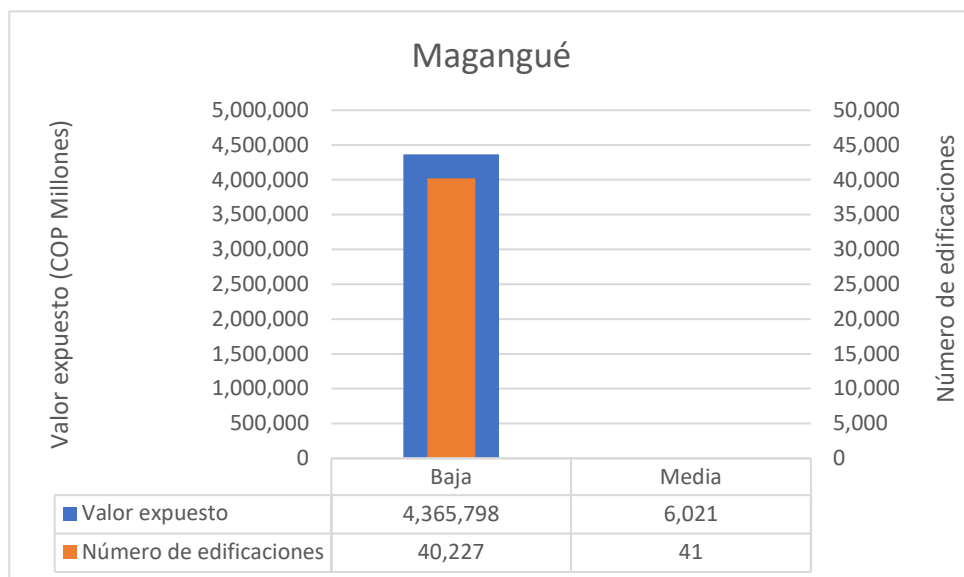


Figura 26. Categoría socioeconómica – Magangué

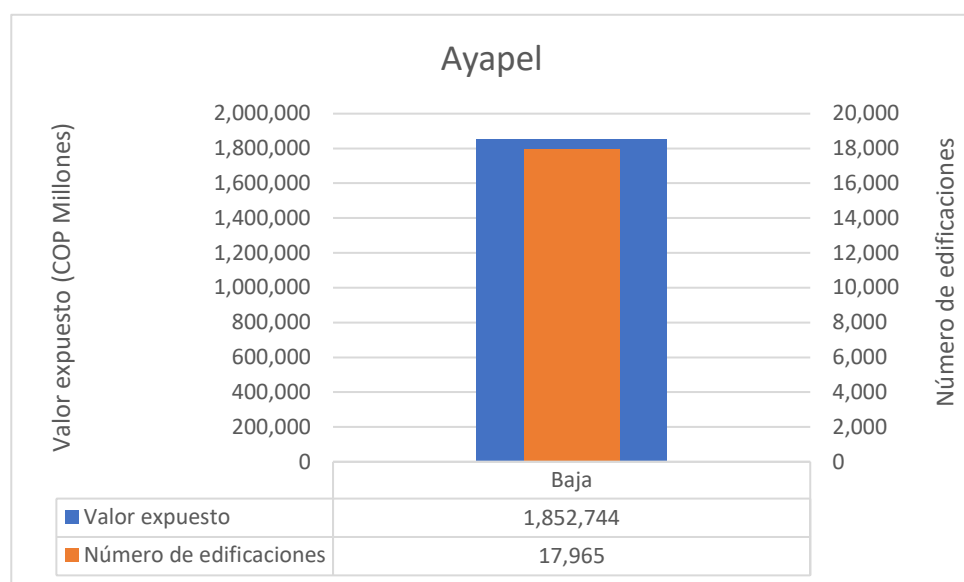


Figura 27. Categoría socioeconómica – Ayapel

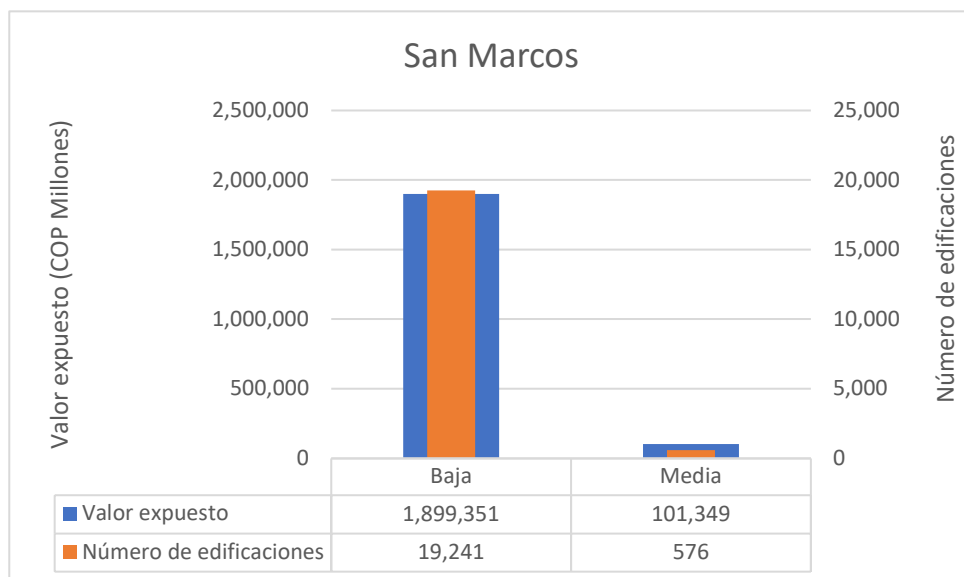


Figura 28. Categoría socioeconómica – San Marcos

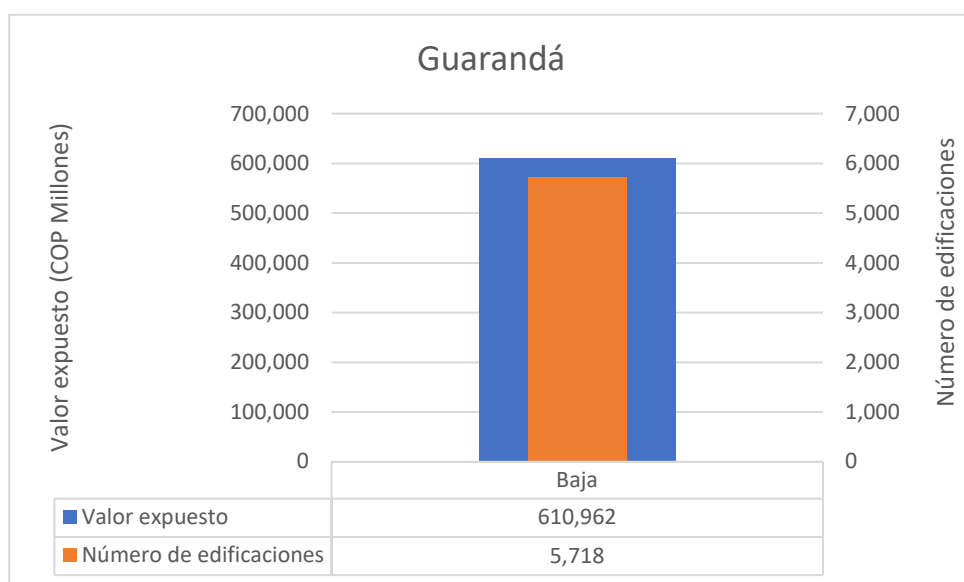


Figura 29. Categoría socioeconómica – Guarandá

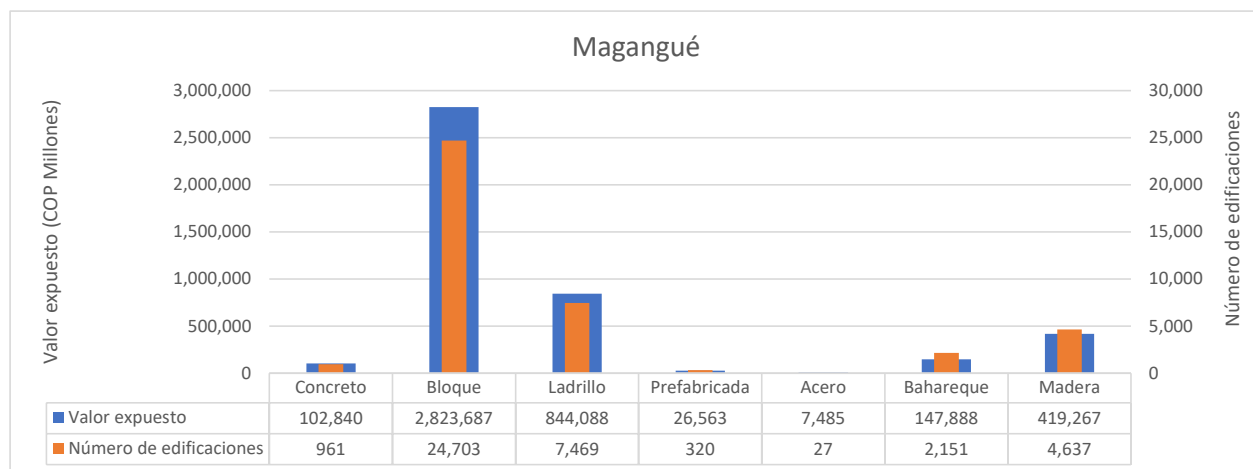


Figura 30. Sistema estructural – Magangué

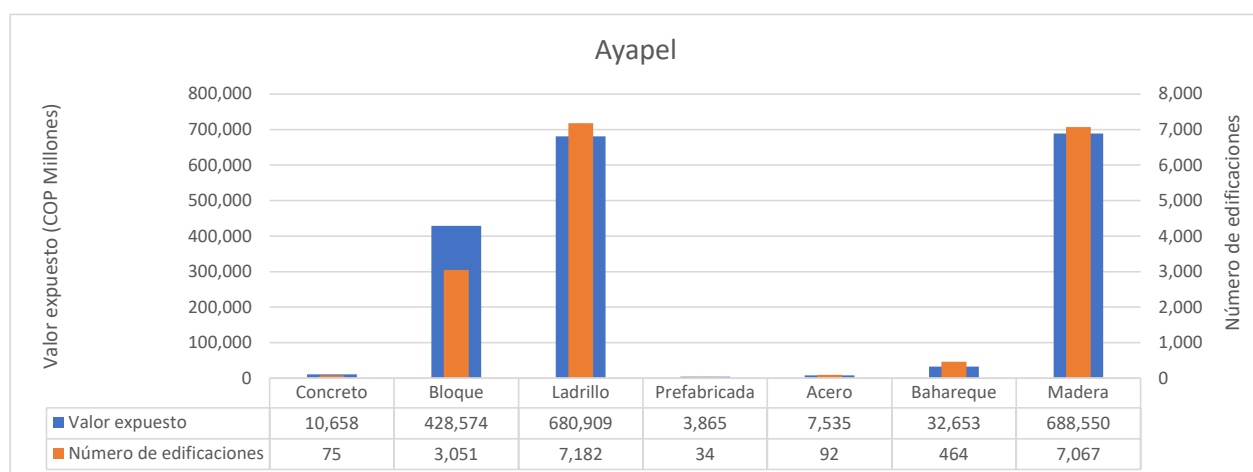


Figura 31. Sistema estructural – Ayapel

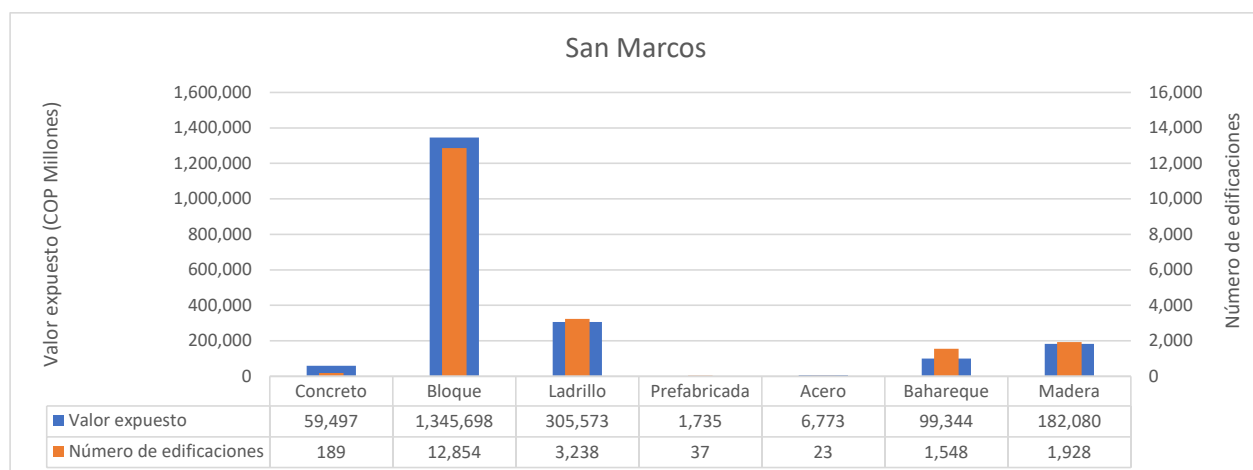


Figura 32. Sistema estructural – San Marcos

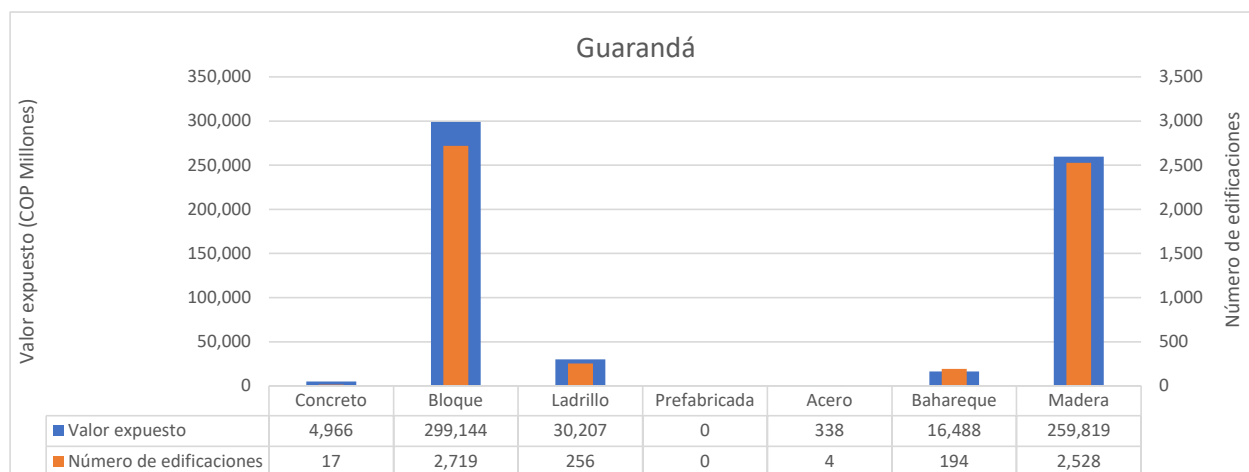


Figura 33. Sistema estructural – Guaranda

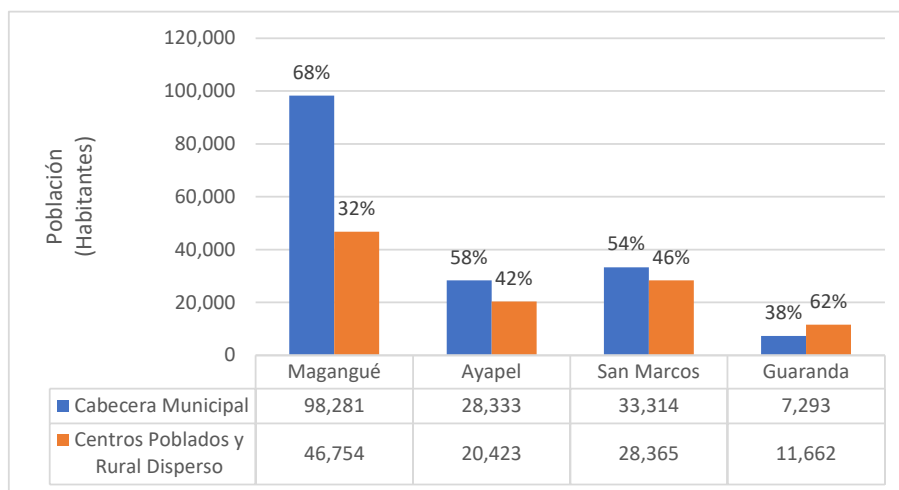


Figura 34. Población por municipio

4 MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad puede entenderse como las características del entorno construido para resistir el impacto derivado de la ocurrencia de un evento peligroso. Estas características determinan el grado en el cual la integridad del entorno construido, así como la vida y medios de subsistencia de quienes habitan dicho entorno, quedan en riesgo por cuenta del evento peligroso. La vulnerabilidad cuantifica entonces las condiciones de inseguridad del entorno construido, las cuales responden a un proceso social de generación, acumulación e incremento.

Por lo tanto, la vulnerabilidad debe entenderse como un fenómeno de origen social, controlado por las condiciones sociales, políticas y económicas de una región, el cual deriva en un estado vulnerable del entorno construido que, desde el punto de vista físico, materializa dicho proceso en términos de las pérdidas que pudieran ocurrir. Es esta vulnerabilidad física, asociada a pérdidas económicas directas, la que es objeto de modelación en esta sección. No obstante, se hace especial énfasis en establecer que la vulnerabilidad física del entorno construido en una región depende de factores no físicos, como los mencionados anteriormente, y que, los cuales serán considerados en fases posteriores de este proyecto como agravantes de los efectos físicos de los desastres.

En este sentido, la vulnerabilidad física es una característica intrínseca de los elementos expuestos y que caracteriza su comportamiento ante la acción adversa de un fenómeno peligroso. Está definida mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan los momentos de probabilidad (valor esperado y varianza) de la pérdida en el elemento expuesto, como función de la intensidad de la amenaza que ocurra en su ubicación.

4.1 Modelo probabilista de la pérdida

En modelación del riesgo catastrófico las pérdidas se tratan como variables aleatorias. Esto permite considerar directamente en los cálculos la incertidumbre inherente a los montos de pérdida causados por uno u otro evento de una amenaza que pueda manifestarse. La vulnerabilidad se define elemento por elemento dentro del portafolio de exposición, lo que significa que la pérdida a la cual se hace referencia aquí es la de un solo elemento expuesto. Para generalizar, la pérdida puede definirse como una variable en el intervalo de 0 a 1, es decir, desde cero hasta el 100% del valor expuesto del elemento (e.g., el valor de reposición de un bien inmueble). Esto significa que, en adelante y en general cuando se habla de vulnerabilidad, la pérdida corresponde siempre a una pérdida relativa de acuerdo con el grado de daño; es decir, es una fracción del valor expuesto.

En general, no se cuenta con información suficiente sobre daños y pérdidas causadas en eventos históricos que permitan ajustar un modelo de probabilidad a la pérdida con base en estimaciones estadísticas. Este no es un problema exclusivo del contexto alrededor del volcán Galeras, sino una condición de base que se cumple en cualquier contexto y para cualquier amenaza en cualquier sitio. Por lo tanto, la definición de un modelo de probabilidad que describa la aleatoriedad de la pérdida es una decisión que se considera razonable y apropiada, pero es inevitablemente arbitraria. El modelo más ampliamente usado corresponde a una distribución Beta, propuesta por Anne Kiremidjian y otros autores en el desarrollo del documento ATC-13 y su comentario ATC-13-1 (ATC, 1985, 2002), cuyo objetivo era la definición de modelos de probabilidad para el daño causado por terremotos en California. Desde entonces, el uso de la

distribución Beta como modelo de probabilidad de la pérdida se ha generalizado a nivel mundial para todos los peligros y todo tipo de elementos expuestos, al ser un modelo cuyo uso es práctico al cumplir los siguientes criterios:

- Describe una variable aleatoria continua dentro del intervalo real [0,1].
- Se define únicamente con dos parámetros (α y β).
- Admite múltiples formas como función de los valores de sus parámetros.

La función de densidad de probabilidad (f_p) de la distribución Beta se presenta a continuación.

$$f_p = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot p^{\alpha-1} \cdot (1-p)^{\beta-1} \quad \text{Ecuación 14}$$

en donde $\Gamma(\cdot)$ es la función *Gamma*. Dado que se trata de una distribución de dos parámetros, se requiere de dos momentos de probabilidad para caracterizarla. Esto implica que los modelos de vulnerabilidad deben dar cuenta de, por lo menos, dos momentos de probabilidad. Es usual definir modelos de vulnerabilidad en términos del valor esperado ($E(p)$) y varianza ($Var(p)$) de la pérdida. De esta manera, es posible determinar el valor de los parámetros α y β mediante la aplicación del método de los momentos:

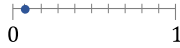

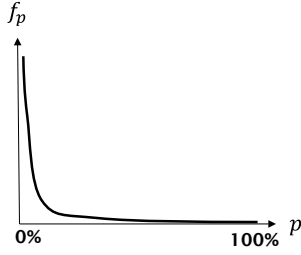


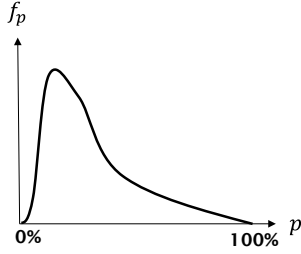

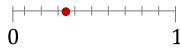
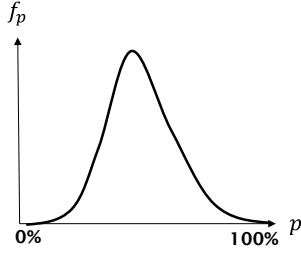


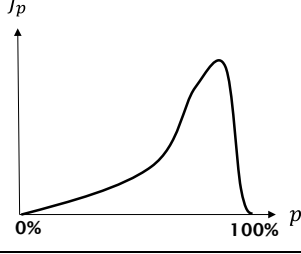

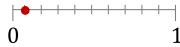
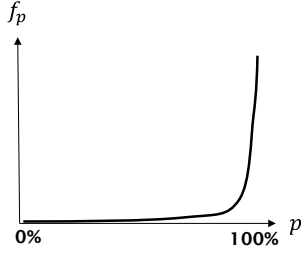
$$\alpha = \frac{1 - (1 + C^2) \cdot E(p)}{C^2} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\beta = \frac{\alpha \cdot (1 - E(p))}{E(p)} \quad \text{Ecuación 16}$$

En donde C es el coeficiente de variación (i.e. $C = \sqrt{Var(p)}/E(p)$). La manera como cambia de forma la distribución Beta depende entonces de los valores de los momentos de probabilidad que se estiman por medio de los modelos de vulnerabilidad. Como se mencionó, la capacidad de la distribución Beta de alterar su forma dentro del intervalo en el cual se define es uno de los criterios por los cuales es ampliamente usada en modelación del riesgo catastrófico. La Tabla 9 ilustra las formas esperadas de la distribución Beta ante diferentes combinaciones de valor esperado y varianza para la pérdida. La tabla incluye una descripción general de lo esperado ante eventos de amenaza de diferente nivel de intensidad², una ilustración de cantidades para el valor esperado y varianza dentro del intervalo [0,1], y una ilustración de la forma esperada de la distribución Beta. Puede concluirse que la distribución Beta se ajusta apropiadamente a las formas como se espera se distribuya la pérdida ante eventos de diferentes características.

² En la Tabla 9 se describen niveles lingüísticos de intensidad con el objetivo de ilustrar el concepto. Sin embargo, en la modelación de la vulnerabilidad los momentos de probabilidad de la pérdida se indexan siempre a medidas físicas de intensidad.

Tabla 9. Ilustración de la variación de la distribución Beta ante eventos de diferente nivel de intensidad.

Descripción	Momentos de probabilidad	Distribución Beta
<p><u>Evento de muy baja intensidad:</u> Se espera un valor bajo de pérdida con una dispersión baja. Es decir, si la intensidad es muy baja se sabe que la pérdida será baja sin mucha variabilidad. La distribución exhibe un comportamiento exponencial negativo, con un rápido decrecimiento. Es decir que la mayor densidad de probabilidad se concentra cerca de pérdida cero, como es de esperarse ante un intensidad muy baja.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de intensidad baja:</u> Aumenta el valor esperado de la pérdida y también aumenta su varianza (es decir, la pérdida es más incierta). La distribución es más ancha, centrada más a la derecha, pero aún sesgada hacia pérdidas bajas</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de intensidad intermedia:</u> El valor esperado de la pérdida es mucho mayor y la varianza es también la mayor posible. La distribución es ahora simétrica, con forma de campana, y lo más ancha posible, indicando que nos encontramos en el punto de mayor variabilidad posible para la pérdida.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de intensidad alta:</u> El valor esperado de la pérdida aumenta pero su varianza disminuye debido a que ante altas intensidades es cada vez menos incierto un nivel de daño elevado. La distribución empieza a sesgarse a la derecha hacia valores grandes de pérdida, con algo de densidad en pérdidas bajas, pero muy concentrada hacia grandes daños.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	
<p><u>Evento de muy alta intensidad:</u> El valor esperado de la pérdida es muy alto y su varianza pequeña debido a que no existe mucha incertidumbre acerca del nivel de daño para una intensidad muy alta. La distribución adquiere una forma de función exponencial, con un rápido crecimiento en los valores de densidad, indicando que es casi seguro que las pérdidas sean muy elevadas.</p>	<p>$E(p)$</p>  <p>$Var(p)$</p> 	

4.2 Funciones de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad son una representación matemática de la vulnerabilidad física, que de hecho se compone de dos funciones diferentes: una función que describe la variación del valor esperado de la pérdida con la intensidad del fenómeno y otra que describe la variación de la varianza. Las funciones de vulnerabilidad son el modelo de vulnerabilidad preferido para bienes inmuebles o elementos de infraestructura en evaluaciones de riesgo catastrófico debido a que describen de manera apropiada la pérdida; es decir, su incorporación en el modelo no requiere de ningún preproceso.

La forma de las funciones de valor esperado y varianza no es totalmente libre. En general debe cumplirse lo ilustrado en la Tabla 9, es decir, la función de valor esperado es necesariamente creciente, mientras que la función de varianza debe ser primero creciente y después decreciente para dar cuenta de forma apropiada de su variabilidad esperada con la intensidad del fenómeno. Las formas funcionales más usadas en la literatura para describir funciones de vulnerabilidad son las propuestas en el documento ATC-13 (ATC, 1985, 2002), las cuales describen la variación del valor esperado y varianza de la pérdida ante cualquier medida física de intensidad (a). Para el valor esperado, se sabe que la función debe ser creciente, pero su tasa de crecimiento se asume variable a medida que la intensidad aumenta:

$$E(p) = 1 - e^{-\ln\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{a}{a_0}\right)^\varepsilon} \quad \text{Ecuación 17}$$

En donde a_0 corresponde a la intensidad que produce un valor esperado de pérdida del 0.5 y ε es un exponente que controla la pendiente de la curva para la intensidad a_0 .

Existe poca información para determinar la varianza de la pérdida. En este caso se asume, como se ilustra en la Tabla 9, que cuando el valor esperado de la pérdida es muy bajo la varianza también lo es. De igual forma, cuando el valor esperado de la pérdida es muy alto, la varianza es de nuevo muy baja. Para valores intermedios es difícil precisar, con bases empíricas, cuánto vale la varianza de la pérdida. Para modelar la variación de la varianza de la pérdida se emplea comúnmente la siguiente expresión (ATC, 1985, 2002):

$$Var(p) = Q \cdot (E(p))^{r-1} \cdot (1 - E(p))^{s-1} \quad \text{Ecuación 18}$$

En donde Q y s se definen como:

$$Q = \frac{V_{max}}{D_0^{r-1}(1 - D_0)^{s-1}} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$s = \frac{r-1}{D_0} - r + 2 \quad \text{Ecuación 20}$$

En donde V_{max} es la varianza máxima, D_0 es el nivel de daño para el que ocurre esta varianza máxima y r es un exponente que determina la forma de la función (usualmente se usa $r = 3$). La Figura 35 muestra una ilustración de una función de vulnerabilidad. Nótese las formas de las funciones de valor esperado y varianza.

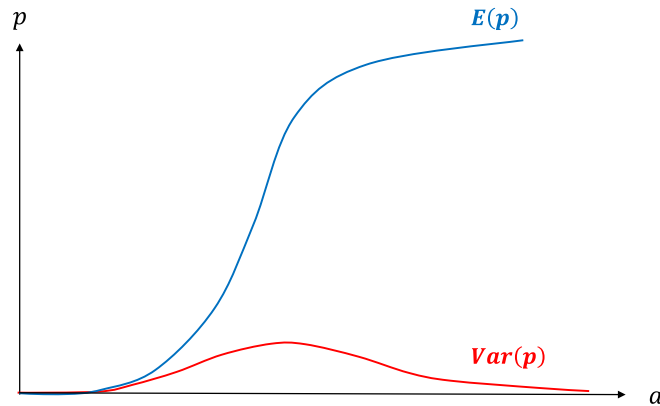


Figura 35. Ilustración de una función de vulnerabilidad

4.3 Tipologías consideradas

Los tipos constructivos empleados cambian según el fenómeno considerado. En el caso de inundaciones por desbordamiento de río, juegan un papel importante la altura del edificio y el material de la construcción, dado que algunos materiales son más susceptibles al daño por inundaciones que otros. La Tabla 10 presenta las variables seleccionadas que mejor describen el daño ante inundaciones, con su correspondiente descripción.

Tabla 10. Variables que describen la susceptibilidad al daño en edificaciones ante inundaciones

Variable descriptora	Posibles valores	Descripción
Número de pisos	1-15	-
Material de la estructura	Tierra	Adobe, tapia pisada, bahareque, u otros materiales de tierra.
	Madera	Estructura principal en pórticos o paneles de madera.
	Desecho	Estructura conformada por una diversidad de materiales sin uniformidad.
	Mampostería	Estructura de muros de mampostería simple, confinada o reforzada.
	Concreto y acero	Estructura principal en pórticos de concreto o acero, con o sin riostras o muros.
Categoría socioeconómica	Alta – Media - Baja	Asociada al estrato socioeconómico del predio (Baja: 1 y 2; Media: 3 y 4; Alta: 5 y 6)

4.4 Vulnerabilidad a la inundación

Para definir la vulnerabilidad de edificaciones se emplean relaciones matemáticas definidas por la FEMA Federal Emergency Management Agency de los Estados Unidos dentro del modelo de cálculo HAZUS. Considerando una forma general para edificaciones de varios niveles, y suponiendo que los valores y la densidad de contenidos se mantendrán constantes en todos los pisos, se establece la siguiente ecuación para el cálculo del daño (δ) ante cualquier altura de inundación. Cabe anotar que la variable daño (δ) definida en HAZUS es equivalente a la pérdida relativa (pérdida dividida por el valor de reposición del inmueble)

$$\delta = \frac{\delta_{N1max}(N_{st} - 1)}{N_T} + \frac{\delta_{N1}(\tilde{t})}{N_T}$$

Ecuación 21

en donde δ_{N1max} es el daño máximo de la función para un nivel para la profundidad máxima, $\delta_{N1}(\tilde{t})$ es el daño para una profundidad relativo sobre los niveles completamente inundados, $\tilde{t} = t - h_N \cdot (N_{st} - 1)$ es la profundidad relativa sobre los niveles inundados, h_N es la altura de entrepiso, $N_{st} = Ent_{SUP} \left(\frac{t}{h_N} \right)$ es el nivel donde se encuentra la superficie de inundación del agua, definido como el valor entero superior de la relación indicada, y N_T es el número total de niveles.

En el desarrollo de funciones de vulnerabilidad para inundaciones se tuvo en cuenta el número de pisos, la altura de entrepiso y el material de construcción, a partir de los cuales se definen los parámetros de daño para una profundidad relativa, $\delta_{N1}(\tilde{t})$, y el daño máximo para la profundidad máxima δ_{N1max} .

De acuerdo con los anteriores parámetros y aplicando la Ecuación 21 se pueden obtener las curvas de daño para cualquier número de niveles en función de las curvas obtenidas para un nivel. A continuación, se presentan las funciones de vulnerabilidad que relacionan la pérdida económica esperada sobre el valor de reposición de los elementos expuestos con la intensidad del fenómeno, que corresponde a profundidad de inundación. En la Figura 36 se presenta la curva para edificaciones en tierra, madera o desecho, en la Figura 37 se presentan las curvas para edificaciones de mampostería y en la Figura 38 se presentan las curvas para edificaciones en concreto.

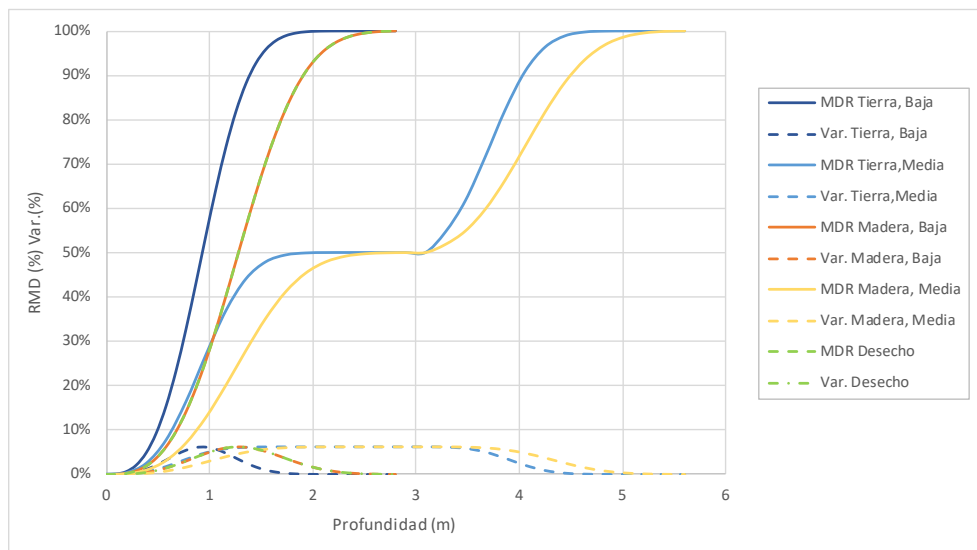


Figura 36. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en tierra, desecho o madera

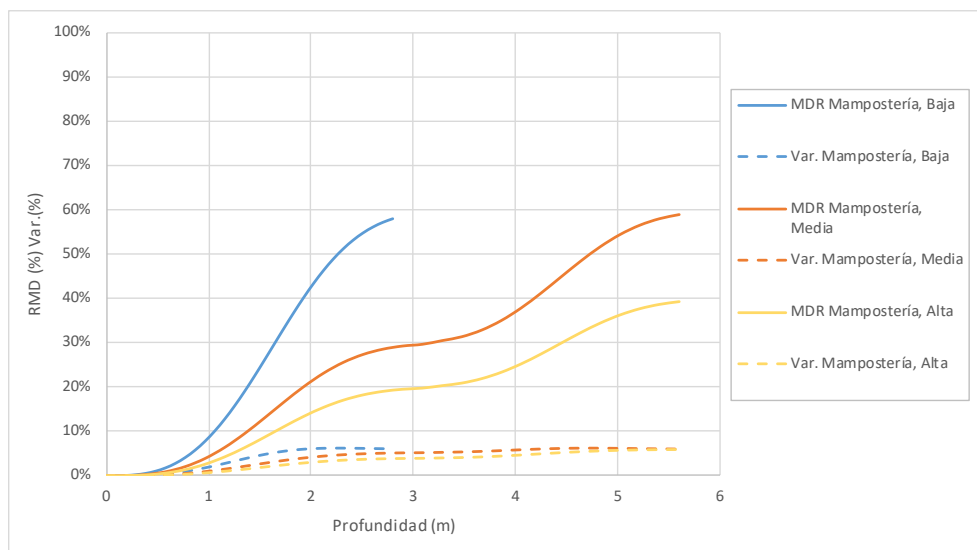


Figura 37. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en mampostería

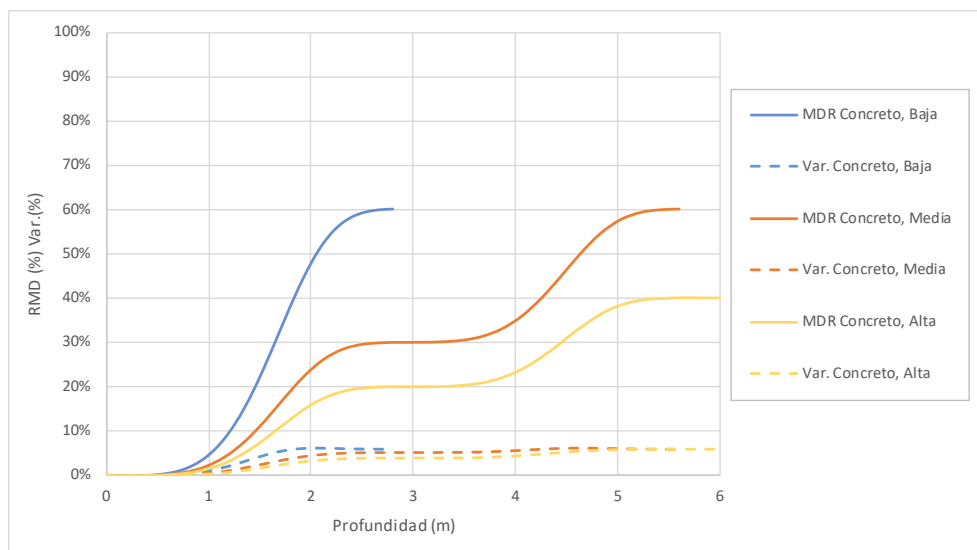


Figura 38. Funciones de vulnerabilidad ante inundación para edificaciones en concreto

5 EVALUACIÓN DEL RIESGO

El riesgo se determina mediante la convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad, en la ubicación ocupada por los elementos expuestos y para la totalidad de estos. En el cálculo probabilista de las pérdidas la amenaza y la vulnerabilidad están representadas también de manera probabilista. La amenaza tiene una representación probabilista tanto temporal como espacial. La ocurrencia en el tiempo de los escenarios de amenaza se modela como un proceso de Poisson, lo que conlleva a modelar mediante una distribución de probabilidad exponencial el tiempo que transcurre entre los escenarios.

Las incertidumbres asociadas a la amenaza y a la vulnerabilidad son entonces definidas en su propia naturaleza; temporal y espacial para la amenaza y dependiente de la intensidad para la vulnerabilidad. De esta manera, el principal resultado del modelo es una distribución de probabilidad específica de la pérdida para cada escenario de riesgo. La función de densidad de probabilidad de la pérdida en el elemento j , condicional a la ocurrencia del escenario i , $f(p_j|E_i)$, se calcula como,

$$f(p_j|E_i) = \int_0^\infty f(p_j|s)f(s|E_i)ds \quad \text{Ecuación 22}$$

en donde el primer término de la integral tiene que ver con la vulnerabilidad ($f(p_j|s)$, la densidad de probabilidad de la pérdida dada una intensidad s) y la segunda parte tiene que ver con la amenaza ($f(s|E_i)$, la densidad de probabilidad de la intensidad, dada la ocurrencia de un escenario).

La pérdida total del escenario i corresponde a la suma de todas las pérdidas individuales (p_j) de los elementos expuestos. Dado que los sumandos son variables aleatorias, debe usarse la aritmética correcta para determinar la pérdida del escenario i . La suma se hace sobre los momentos de probabilidad de las variables p_j como se indica a continuación.

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(p_j) \quad \text{Ecuación 23}$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} cov(p_k, p_j) \quad \text{Ecuación 24}$$

en donde $E(p|E_i)$ es el valor esperado de la pérdida del escenario i , $\sigma^2(p|E_i)$ es su varianza, NE es el número total de elementos expuestos, $E(p_j)$ es el valor esperado de la pérdida en el elemento j , $\sigma^2(p_j)$ es su varianza, y $cov(p_k, p_j)$ es la covarianza de la pérdida de dos elementos expuestos diferentes. La ecuación 24 puede escribirse entonces como,

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \rho_{k,j} \sigma(p_k) \sigma(p_j) \quad \text{Ecuación 25}$$

De esta manera queda completamente determinada, en términos de probabilidad, la pérdida asociada a la ocurrencia del escenario i .

El riesgo es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* la cual especifica las frecuencias de ocurrencia de eventos en que se exceda un valor específico de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como *tasa de excedencia*, y se calcula de la siguiente manera,

$$v(p) = \sum_{i=1}^N Pr(P > p | E_i) \cdot F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 26}$$

en donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , N es el número total de escenarios de amenaza, $F_A(E_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario i , y $Pr(P > p | E_i)$ es la probabilidad de que p sea excedida dado que ocurrió el escenario i . La suma cubre todos los escenarios de amenaza que pueden generar pérdidas. El inverso de $v(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr . La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de las pérdidas.

Es importante hacer notar que la curva de excedencia de pérdidas no tiene incertidumbre. Es común asociar los resultados de un modelo probabilista de riesgo a un nivel de confianza o de variabilidad de los mismos. Pues bien, las tasas de excedencia calculadas en un modelo probabilista de riesgo consideran directamente la incertidumbre en las pérdidas, por lo cual dichas tasas de excedencia no pueden tener una incertidumbre o variabilidad propia. Esto debido a que, en términos matemáticos, son una medida de probabilidad calculada para una cantidad de pérdida específica. En el contexto de la modelación del riesgo, la pérdida es la variable aleatoria, no las tasas anuales de excedencia.

5.1 Métricas del riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

5.1.1 La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como la integral de la curva de excedencia de pérdidas,

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad \text{Ecuación 27}$$

Desde el conjunto de evento de pérdida, puede determinarse la PAE como,

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P | E_i) F_A(E_i) \quad \text{Ecuación 28}$$

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser insensible a la incertidumbre, debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual, y no su incertidumbre.

5.1.2 La pérdida máxima probable (PML)

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. El periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia de pérdidas,

$$Tr(p) = \frac{1}{v(p)} \quad \text{Ecuación 29}$$

En realidad, la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Bernal et al. (2021).

5.2 Resultados de la evaluación

La Tabla 11 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 4 municipios, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 39 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 40 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 11. Pérdidas Anuales Esperadas por inundación

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	Clima base		RCP2.6		RCP4.5	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Magangué	\$ 4,371,819	\$ 29,728	6.8	\$ 27,980	6.4	\$ 31,040	7.1
Ayapel	\$ 1,852,744	\$ 8,893	4.8	\$ 8,523	4.6	\$ 9,449	5.1
San Marcos	\$ 2,000,700	\$ 20,807	10.4	\$ 19,807	9.9	\$ 21,808	10.9
Guaranda	\$ 610,962	\$ 367	0.60	\$ 312	0.51	\$ 379	0.62

Municipio	Valor expuesto (COP millones)	RCP6.0		RCP8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
Magangué	\$ 4,371,819	\$ 27,542	6.3	\$ 28,854	6.6	\$ 29,728	6.8
Ayapel	\$ 1,852,744	\$ 8,708	4.7	\$ 8,708	4.7	\$ 9,078	4.9
San Marcos	\$ 2,000,700	\$ 19,607	9.8	\$ 20,407	10.2	\$ 21,007	10.5
Guaranda	\$ 610,962	\$ 299	0.49	\$ 373	0.61	\$ 373	0.61

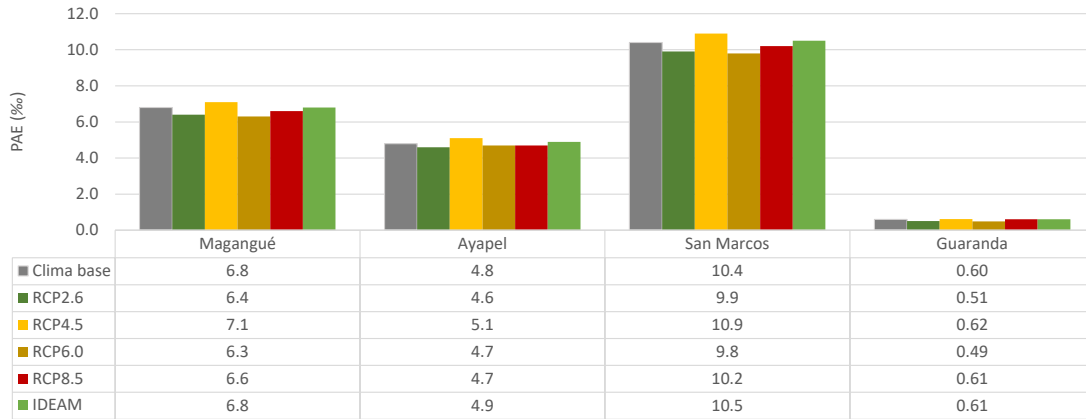


Figura 39. Pérdida anual esperada relativa por inundación (al millar) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

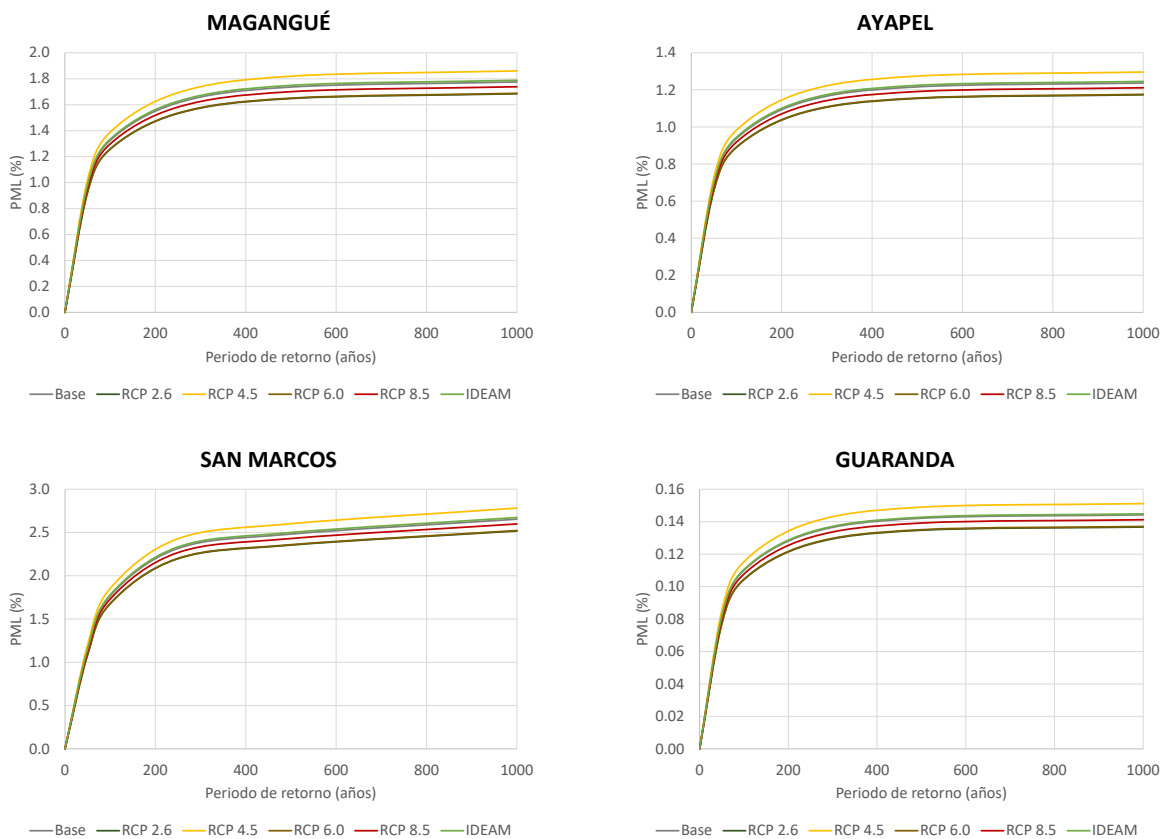


Figura 40. Curvas de PML relativa por inundación (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

Dado que la evaluación se realiza a una escala detallada (edificio a edificio) es posible construir mapas de pérdida anual esperada por ubicación, para cada municipio. De la Figura 41 a la Figura 44 se presentan mapas de PAE para las cabeceras municipales. No se muestran los municipios completos debido a la alta resolución de la información, que impide que sea vivible a esa escala. Se requiere de acercamientos, que para los mapas presentados se realizaron sobre las cabeceras municipales. No obstante, el resultado se ha calculado para la totalidad de edificaciones del municipio, como puede consultarse en el Anexo Digital.

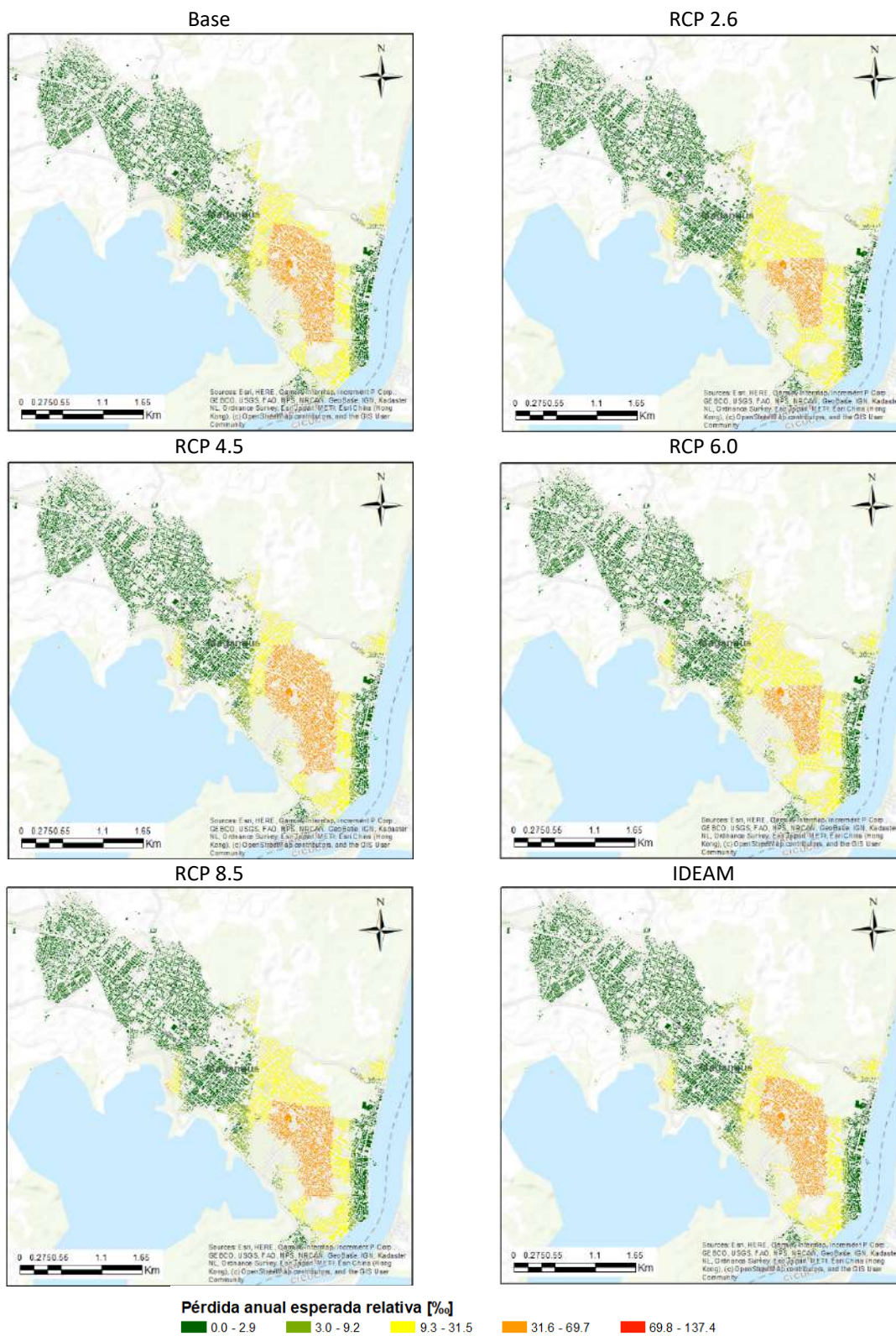


Figura 41. Pérdida anual esperada relativa (%) para Magangué



Figura 42. Pérdida anual esperada relativa (%) para Ayapel

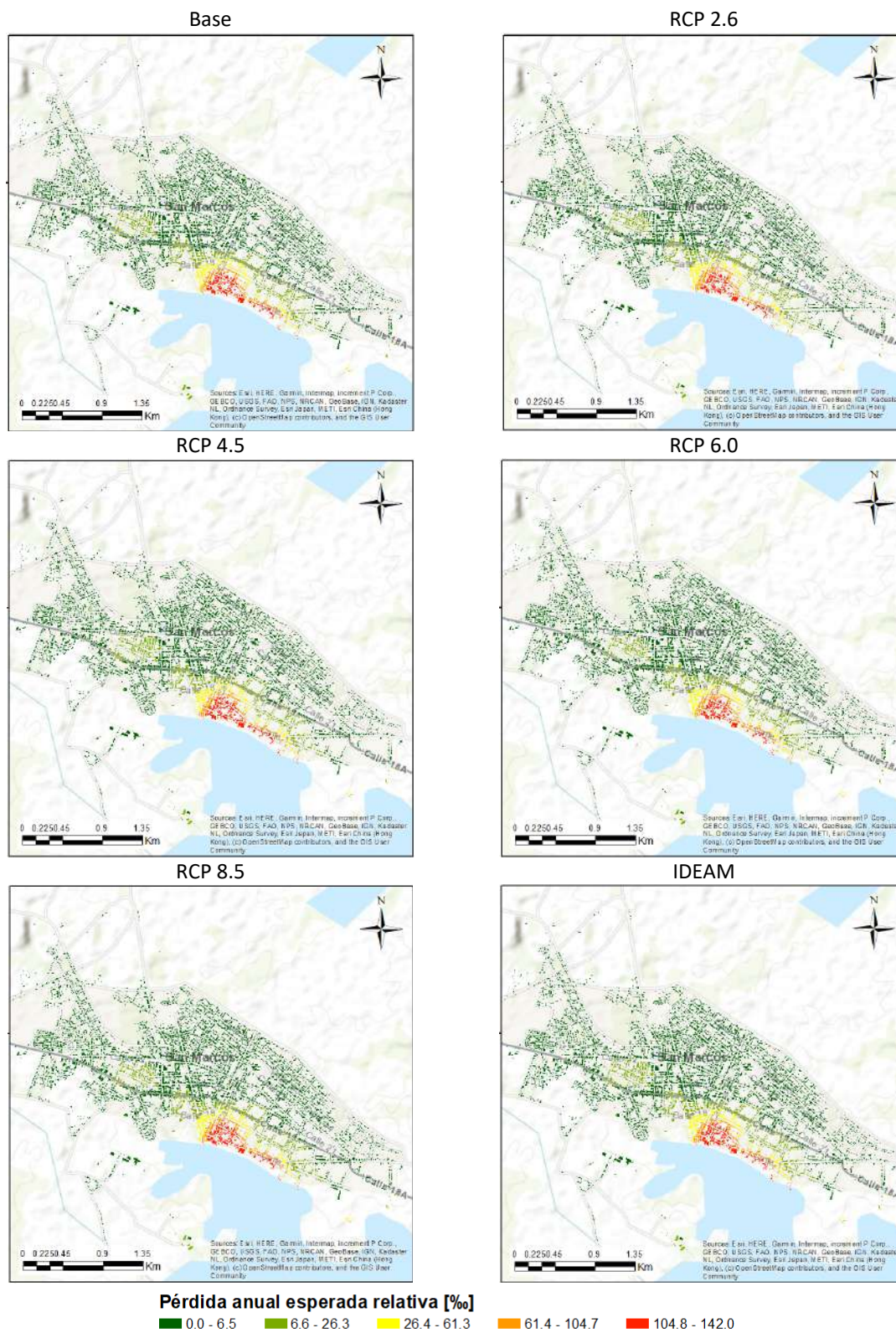


Figura 43. Pérdida anual esperada relativa (%) para San Marcos

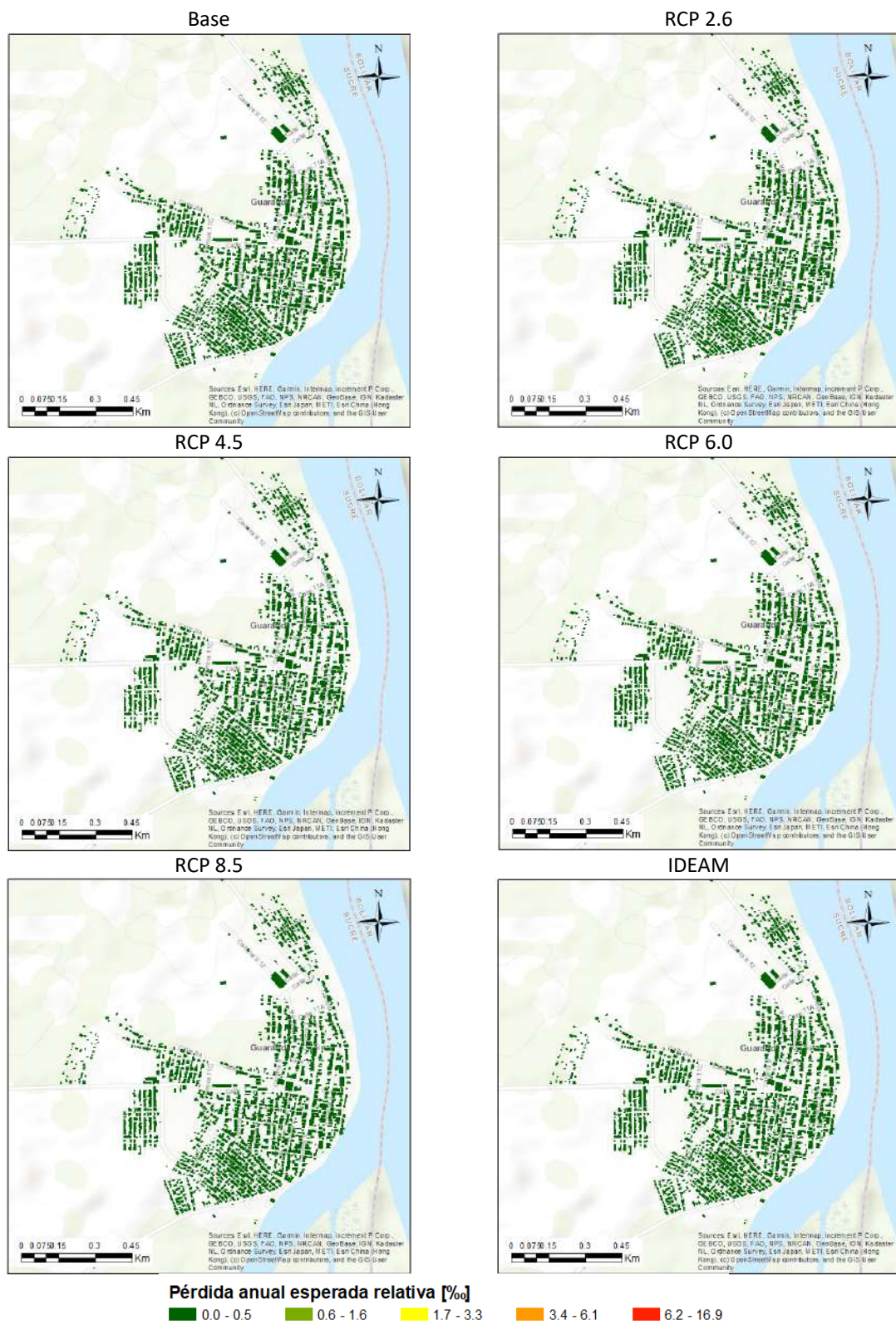


Figura 44. Pérdida anual esperada relativa (%) para Guaranda

6 REFERENCIAS

ATC - Applied Technology Council. (1985). ATC-13 Earthquake damage evaluation for California. FEMA.

Bernal, G., Cardona, O.D., Marulanda, M., Carreño, M. L. (2021). Dealing with Uncertainty using Fully Probabilistic Risk Assessment for Decision Making. Chapter 14 in: Eslamian, S., & Eslamian, F. (Eds): Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience. Springer.

Brunner, G., & Bonner, V. (1994). Hydrologic Engineering Center - River Analysis System HEC-RAS (TP-147). Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/publications/TechnicalPapers/TP-147.pdf>

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., & Saldarriaga, J. G. (1994). Hidrología aplicada (No. 551.48 C4H5).

Clark, C.O. (1945). Storage and the unit hydrograph. Trans. Am. Soc. Civ. Engrg., 100, 1419-1446.

European Commission. (2023). GHSL Data Package. Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/098587, JRC133256

Cardona, O.D. 2015. Evaluación probabilista del riesgo de inundación en la Región de La Mojana para su estado actual (Sin intervenciones). Producto E de consultoría. Fondo de Adaptación

Obregón, N., Plazas, C. G., Macías, J. P., Vanegas, M. A., Moreno, J. A., Valencia, M. C., Hernández, M. A., Martín, C. G., Rodríguez, A. T., Sánchez, J. E. (2014). Modelación hidrodinámica de la Mojana: Informe de construcción del modelo conceptual. Fondo Adaptación.

Fondo Adaptación. (2015) Plan de acción integral para la reducción del riesgo de inundaciones y adaptación al cambio climático en la región de La Mojana.

W. Sirko, S. Kashubin, M. Ritter, A. Annkah, Y.S.E. Bouchareb, Y. Dauphin, D. Keyzers, M. Neumann, M. Cisse, J.A. Quinn. (2021). Continental-scale building detection from high resolution satellite imagery. arXiv:2107.12283.

