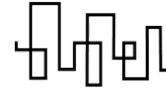




Escuela de Ciencias e
Ingeniería



Universidad del
Rosario



Facultad de Estudios
Internacionales,
Políticos y Urbanos

GESTIÓN SISTÉMICA E INTELIGENTE DE INUNDACIONES

Autora:

Aretuza de Oliveira Almeida
Laura Alejandra Castillo Pedraza

UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
MAESTRÍA EN CIUDADES INTELIGENTES Y SOSTENIBLES
ESCUELA DE CIENCIAS E INGENIERÍA
FACULTAD DE ESTUDIOS INTERNACIONALES, POLÍTICOS Y URBANOS

BOGOTÁ COLOMBIA, 2025



Escuela de Ciencias e
Ingeniería



Universidad del
Rosario



Facultad de Estudios
Internacionales,
Políticos y Urbanos

GESTIÓN SISTÉMICA E INTELIGENTE DE INUNDACIONES

Trabajo presentado para obtener el título de:
Magíster en Ciudades Inteligentes y Sostenibles

Autor:

Aretuza de Oliveira Almeida
Laura Alejandra Castillo Pedraza

Director:

Johan Manuel Redondo PhD.

UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
MAESTRÍA EN CIUDADES INTELIGENTES Y SOSTENIBLES
PROGRAMA – ESCUELA DE CIENCIAS E INGENIERÍA
FACULTAD DE ESTUDIOS INTERNACIONALES, POLÍTICOS Y URBANOS

BOGOTÁ COLOMBIA, 2025

ABSTRACT

Colombia's tropical location, complex topography and shifting hydro-climatic regimes make floods one of its most frequent and damaging hazards. This thesis proposes a systemic and intelligent framework for flood management that integrates six dimensions: Dynamic Hydrology, Territorial Architecture, Hybrid Infrastructure, Governance, Socio-Community Capacity, and Intelligence & Data to move from reactive responses to anticipatory, evidence-based decision-making. Chapter 1 formalizes each dimension with operational definitions, metrics, reference thresholds, measurement tools, and data sources suitable for national application. Chapter 2 translates this framework into four intervention routes: grey, green, hybrid, and socio-institutional, offering criteria for context-sensitive selection and implementation.

A national case study profiles all Colombian municipalities using indicators from public sources to calculate a systemic performance index. The analysis reveals consistent spatial patterns: lower relative performance tends to cluster in the Pacific and parts of the Amazon–Orinoco plains where extreme rainfall, extensive floodplains, infrastructure gaps, and data/connectivity limitations converge while higher relative performance concentrates in Andean urban corridors, where service coverage, institutional capacity, and information ecosystems partially offset physical hazard.

This approach provides a transparent, replicable first-pass tool to diagnose municipal strengths and bottlenecks by dimension, prioritize territories and indicators for deeper local studies, and align interventions across grey, green, hybrid, and socio-institutional strategies. Policy recommendations emphasize densifying hydro-meteorological networks, updating flood thresholds and scenarios, embedding risk into land-use planning, scaling nature-based and hybrid solutions, strengthening multi-level governance, and building robust, open data systems. Collectively, these actions enable Colombia to shift from reaction to anticipation and to build resilient, risk-sensitive territories.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	13
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	15
3.1 Marco teórico	15
3.2 Estado del arte	17
3.2.1 Europa: restaurar el espacio del río y coordinar múltiples niveles de decisión	17
3.2.2 Asia: infraestructura híbrida y adaptación urbana al cambio climático	18
3.2.3 África Subsahariana: Sudáfrica y Ghana	18
3.2.4 América Latina: ordenamiento territorial y adaptación inclusiva	18
3.3 Marco Normativo	19
4. METODOLOGÍA	24
4.1 Fase 1. Revisión de literatura	24
4.2 Fase 2. Construcción del marco de dimensiones y guía operativa (Resultados – Capítulo 1)	24
4.3 Fase 3. Estrategias de intervención y criterios de selección (Resultados – Capítulo 2)	24
4.4 Fase 4. Aplicación nacional: caso de estudio por municipios	25
4.4.1 Para la dimensión de Hidrología Dinámica	25
4.4.2 Para la dimensión de Arquitectura territorial	25
4.4.3 Para la dimensión de Infraestructura híbrida	25
4.4.4 Para la dimensión de Capacidad sociocomunitaria	26
4.4.5 Para la dimensión de Gobernanza	26
4.4.6 Para la dimensión de Inteligencia y Datos	26
4.4.7 Agregación por dimensiones y desempeño sistémico	28
4.4.8 Visualización y entrega de resultados	28
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1 Capítulo 1: Construcción de las dimensiones	30
5.1.1 Hidrología Dinámica	30
5.1.1.1 Indicadores	31
5.1.1.2 Umbrales de referencia	34
5.1.1.3 Fuentes de datos	35
5.1.1.4 Herramientas metodológicas	35
5.1.2 Arquitectura territorial	36
5.1.2.1 Indicadores	36
5.1.2.2 Umbrales de referencia	40
5.1.2.3 Fuentes de datos	41
5.1.2.4 Herramientas metodológicas	41
5.1.3 Infraestructura híbrida	42

5.1.3.1	Indicadores obtenidos de fuentes oficiales.....	43
5.1.3.2	Umbrales de referencia.....	45
5.1.3.3	Fuentes de datos	45
5.1.3.4	Herramientas metodológicas	46
5.1.4	Gobernanza.....	47
5.1.4.1	Indicadores	48
5.1.4.2	Umbrales de referencia.....	53
5.1.4.3	Fuentes de datos	53
5.1.4.4	Herramientas metodológicas	54
5.1.5	Capacidad socio comunitaria.....	54
5.1.5.1	Indicadores obtenidos de fuentes oficiales.....	55
5.1.5.2	Umbrales de referencia.....	62
5.1.5.3	Fuentes de datos	63
5.1.5.4	Herramientas metodológicas	64
5.1.6	Inteligencia y Datos.....	65
5.1.6.1	Indicadores	66
5.1.6.2	Umbrales de referencia.....	67
5.1.6.3	Fuentes de datos	67
5.1.6.4	Herramientas metodológicas	68
5.2	Capítulo 2: Criterios para determinar la conveniencia de estrategias	69
5.2.1	Estrategias grises	70
5.2.1.1	El sistema de diques del Delta Works en los Países Bajos	71
5.2.1.2	Sistemas de alcantarillado en Porto Alegre, Brasil	72
5.2.1.3	Estaciones de bombeo en Nueva Orleans, Estados Unidos	73
5.2.1.4	El sistema de drenaje profundo de Tokio, Japón	73
5.2.1.5	Discusión comparativa	75
5.2.2.	Estrategias verdes	76
5.2.1.6	Cubiertas verdes en Milán, Italia.....	77
5.2.1.7	Cubiertas verdes con recolección de agua pluvial en Lisboa, Portugal	78
5.2.1.8	Prácticas LID en Guangxi, China.....	78
5.2.1.9	Integración de soluciones basadas en la naturaleza en Seúl, Corea del Sur.....	79
5.2.1.10	Discusión comparativa	79
5.2.3.	Estrategias Híbridas.....	81
5.2.1.11	Room for the River en los Países Bajos	82
5.2.1.12	Parque Inundable La Marjal en Alicante, España	83
5.2.1.13	Rehabilitación del Río Cheonggyecheon en Seúl, Corea del Sur	83
5.2.1.14	Caso Sekondi-Takoradi, Ghana.....	84
5.2.1.15	Discusión comparativa	84
5.2.2	Estrategia socio-institucionales	86
5.2.2.1	Gobernanza adaptativa en cuencas europeas	88
5.2.2.2	Principios de gobernanza de la OCDE (<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>)	88
5.2.2.3	Participación comunitaria en cuencas altoandinas	89

5.2.2.4	Reformas institucionales en Singapur	89
5.2.2.5	Discusión comparativa	90
5.3	Diagrama del modelo conceptual	91
5.3.1	Bucle de Refuerzo 1: Aprendizaje institucional para la inteligencia del riesgo.....	92
5.3.2	Bucle de Balance 1: Gobernanza como modulador de la vulnerabilidad estructural.....	93
5.3.3	Bucle de Refuerzo 2: Exclusión territorial y exposición creciente al riesgo.....	94
5.3.4	Bucle de Refuerzo 3: Degradación ecológica e intensificación del riesgo hidrológico..	94
5.3.5	Bucle de Balance 2: Capacidad institucional como amortiguador del colapso.....	95
5.3.6	Bucle de Refuerzo 4: Fragilidad de los servicios urbanos ante el colapso físico.....	96
5.3.7	Bucle de Refuerzo 5: Urbanización desordenada y amplificación de amenazas	96
5.4	Caso de estudio.....	99
5.4.1	Análisis de datos.....	100
5.4.2	Recomendaciones de política pública	114
CONCLUSIONES		127
REFERENCIAS		130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Marco normativo. Fuente: Elaboración propia	23
Tabla 2.	Indicadores hidrología dinámica. Fuente: Elaboración propia	34
Tabla 3.	Indicadores arquitectura territorial. Fuente: Elaboración propia	40
Tabla 4.	Indicadores infraestructura híbrida. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 5.	Indicadores gobernanza. Fuente: Elaboración propia	53
Tabla 6.	Indicadores capacidad sociocomunitaria. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 7.	Indicadores inteligencia y datos. Fuente: Elaboración propia	67
Tabla 8.	Criterios de uso - Estrategias grises. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 9.	Criterios de uso - Estrategias verdes. Fuente: Elaboración propia	81
Tabla 10.	Criterios de uso - Estrategias híbridas. Fuente: Elaboración propia	86
Tabla 11.	Criterios de uso - Estrategias socio-institucionales. Fuente: Elaboración propia	91
Tabla 12.	Comportamientos bucles. Fuente: Elaboración propia	98
Tabla 13.	Puntos de palanca. Fuente: Elaboración propia	98
Tabla 14.	Intervenciones sistémicas. Fuente: Elaboración propia	99
Tabla 15.	Recomendaciones de política pública por dimensión. Fuente: Elaboración propia ...	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama causal. Fuente: Elaboración propia	92
Figura 2. Mapa de nivel de desempeño sistémico por municipios. Fuente: Elaboración propia	103
Figura 3. Promedio general por región. Fuente: Elaboración propia	104
Figura 4. Correlación entre Hidrología Dinámica e Infraestructura híbrida por municipio. Fuente: Elaboración propia	110
Figura 5. Correlación entre Hidrología Dinámica y Arquitectura territorial por municipio. Fuente: Elaboración propia	111
Figura 6. Correlación entre Gobernanza e Inteligencia y datos por municipio. Fuente: Elaboración propia.....	112
Figura 7. Correlación entre Gobernanza y Capacidad Sociocomunitaria por municipio. Fuente: Elaboración propia	113

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas representan uno de los riesgos hidrometeorológicos más recurrentes y devastadores en el contexto global contemporáneo, exacerbados por el cambio climático, la urbanización descontrolada y la degradación ambiental. Según informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, los eventos extremos de precipitación han aumentado en intensidad y frecuencia en las últimas décadas, afectando a más de 2.000 millones de personas en zonas urbanas vulnerables. A escala global, estos fenómenos generan pérdidas económicas anuales estimadas en cientos de miles de millones de dólares, además de impactos sociales como desplazamientos forzados, pérdidas humanas y interrupciones en servicios esenciales [1].

En América Latina, y particularmente en Colombia, este problema adquiere dimensiones críticas debido a la diversidad geográfica del país, que incluye cuencas hidrográficas complejas, regiones andinas propensas a deslizamientos y zonas costeras expuestas a marejadas ciclónicas. En Colombia, eventos históricos como las inundaciones asociadas al fenómeno de La Niña en 2010–2011 causaron daños superiores a los 6.000 millones de dólares, afectando a millones de personas y destacando la fragilidad de los sistemas urbanos frente a amenazas multifactoriales [2].

Este trabajo busca adoptar un enfoque sistémico, territorial e inteligente para la gestión del riesgo de inundaciones. El enfoque sistémico, inspirado en la teoría de sistemas complejos [3] y que considera las inundaciones no como eventos aislados, sino como resultados de interacciones no lineales entre componentes hidrológicos, urbanos, institucionales y sociales. Este enfoque enfatiza la morfología del paisaje y el uso del suelo como determinantes clave de la esorrentía y del daño, promoviendo una visión holística que integra escalas locales y regionales. A su vez, se reconoce la utilidad de incorporar tecnologías como sistemas de información geográfica (SIG) y modelos predictivos para generar datos en tiempo real y facilitar decisiones informadas [4]. En este sentido, la investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11 y 13) de las Naciones Unidas, contribuyendo a la construcción de ciudades más seguras y resilientes al clima [5].

El desarrollo de la presente investigación se estructura en torno a la creación de seis dimensiones, identificando indicadores para su evaluación en plataformas nacionales como TerriData, Datos Abiertos, IDEAM e IGAC, con el fin de medir el desempeño municipal frente al riesgo de

inundaciones. Esto permite obtener un municipio representativo por cada dimensión para un análisis detallado, complementado con visualizaciones mediante un tablero interactivo que integra datos georreferenciados y métricas clave.

Finalmente, este estudio promueve la transición hacia ciudades inteligentes y sostenibles, fomentando inversiones en infraestructuras híbridas y una gobernanza multinivel para reducir vulnerabilidades y potenciar la antifragilidad territorial contribuyendo así a una gestión del riesgo más proactiva y equitativa, alineada con los desafíos del siglo XXI en un país altamente expuesto al cambio climático [6].

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Desarrollar un marco analítico sistémico e inteligente para evaluar el desempeño frente a inundaciones en municipios colombianos, y establecer criterios verificables que determinen la conveniencia de implementar estrategias grises, verdes, híbridas o socio-institucionales, con el fin de generar herramientas aplicables a la política pública y la gestión territorial.

1.2 Objetivos específicos

- Definir indicadores sistémicos con umbrales cuantitativos y cualitativos para categorizar el desempeño de municipios colombianos en términos de riesgo de inundaciones, integrando dimensiones hidrológicas, territoriales, infraestructurales, de gobernanza, sociocomunitarias e inteligentes.
- Establecer criterios de conveniencia para la selección de estrategias grises, verdes, híbridas o socio-institucionales, basados en análisis de costos-beneficios, contexto territorial y capacidad adaptativa, acompañados de herramientas metodológicas para su implementación práctica.
- Aplicar el marco propuesto a un caso de estudio en municipios colombianos, resultando en una categorización por niveles de desempeño, selección de representantes por categoría, un tablero interactivo de visualización y la identificación de patrones geográficos de vulnerabilidad ante inundaciones.

2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Colombia, por su ubicación tropical y su compleja geografía andina, ha enfrentado históricamente graves inundaciones. Las intensas temporadas de lluvias influenciadas por fenómenos climáticos como La Niña y la Zona de Convergencia Intertropical, han provocado desbordamientos de ríos en todas las regiones naturales del país. Las llanuras costeras, las cuencas de ríos mayores y zonas montañosas sufren inundaciones recurrentes cada año. Como menciona Ayala-García y Ospino-Ramos [7], la combinación de una topografía variada, una gran riqueza hídrica y eventos de lluvia extremos hace que las inundaciones se ubiquen entre los desastres naturales más frecuentes y dañinos en Colombia. Estas inundaciones afectan extensas áreas del territorio, ocasionando pérdidas de vidas humanas, daños en cultivos e infraestructura, agravando las condiciones socioeconómicas de las poblaciones vulnerables.

La intensificación reciente de eventos extremos y los daños crecientes confirman la urgencia del problema. En el departamento del Chocó, uno de los territorios más lluviosos y vulnerables del país, las lluvias de finales de 2024 dejaron un saldo devastador de alrededor de 100.000 damnificados y el 85 % del territorio en emergencia por inundaciones, desbordamientos y deslizamientos [8].

En el plano nacional, los reportes oficiales de la actual segunda temporada de lluvias registran 484 incidentes en 26 departamentos y 167 municipios afectados, Antioquia concentra el 26,2 % de los casos (127 incidentes), con miles de emergencias asociadas a lluvias en su área metropolitana [9]. Históricamente, ciertas zonas han sido particularmente vulnerables, como la Depresión Momposina en la región Caribe, que recibe las aguas de los ríos Magdalena, Cauca, San Jorge y Cesar. Desde 2021, esta región enfrenta una crisis prolongada tras la ruptura de un dique, que mantiene bajo el agua a comunidades de Sucre, Bolívar, Córdoba y Antioquia, afectando a cerca de 200.000 personas [10]. Otras regiones como Magdalena, Atlántico, Valle del Cauca, y hasta zonas tradicionalmente secas como La Guajira, han experimentado inundaciones por lluvias extremas en 2023-2024 [11]. Incluso las grandes ciudades como Bogotá han sufrido emergencias por desbordamientos provocados por aguaceros intensos y drenajes urbanos insuficientes. Estas situaciones demuestran que ninguna región del país está libre del riesgo hídrico.

En este contexto, resulta evidente la necesidad de una transformación profunda en la manera en que se gestiona el riesgo de inundaciones. Es aquí donde se fundamenta la relevancia de esta tesis, que propone un enfoque de gestión sistémica e inteligente para las inundaciones en Colombia.

La solución planteada parte de la premisa de que Colombia enfrenta un riesgo de inundaciones que no puede gestionarse eficazmente con enfoques fragmentados o exclusivamente reactivos. Aunque existen avances normativos e institucionales, persisten brechas críticas: datos dispersos entre entidades, escaso acoplamiento entre monitoreo y toma de decisiones, modelos poco adaptados a condiciones locales cambiantes (uso del suelo, impermeabilización, pérdida de cobertura), e insuficiente participación comunitaria en el ciclo de gestión del riesgo. Como advierte Cárdenas [12], sin la debida conexión entre gestión del riesgo, ordenamiento territorial y conocimiento experto, se reproducen ineficiencias que agravan la vulnerabilidad y el daño.

Los beneficios de observar, analizar y afrontar la problemática de inundaciones desde un enfoque sistémico son amplios, ya que, desde el punto de vista social, significa reducir el número de víctimas, proteger comunidades vulnerables y mejorar la resiliencia de la población. En lo económico, implica minimizar las pérdidas materiales y los costos de reconstrucción, promoviendo una inversión preventiva que es más eficiente a largo plazo. Desde el punto de vista ambiental, permite restaurar ecosistemas reguladores como humedales, que son fundamentales para la mitigación del riesgo. Y en lo político, fortalece la capacidad del Estado para responder al cambio climático y proteger el bienestar de su población. Por tanto, la solución propuesta no solo atiende una necesidad crítica, sino que ofrece una herramienta replicable, basada en evidencia, que puede contribuir a construir un país más resiliente, seguro y sostenible. Para ello se busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo integrar análisis hidrológicos, territoriales, de infraestructura híbrida, gobernanza, capacidad comunitaria e inteligencia de datos para comprender el comportamiento municipal frente a inundaciones y, a partir de ello, seleccionar las estrategias de intervención más adecuadas?

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

3.1 Marco teórico

La gestión del riesgo de inundaciones ha transitado, en las últimas décadas, desde una visión centrada en el control hidráulico hacia un enfoque más amplio, que reconoce la naturaleza interdependiente de los sistemas humanos y naturales. Este cambio responde a la necesidad de comprender las inundaciones no como fenómenos aislados o puramente naturales, sino como el resultado de múltiples factores interconectados: el cambio climático, los patrones de ocupación del suelo, la degradación de ecosistemas, la infraestructura construida y las capacidades institucionales de los territorios [13]. En este sentido, la gestión moderna del riesgo se concibe como un proceso sistémico, en el cual las acciones humanas y las condiciones ambientales evolucionan, generando nuevos escenarios de amenaza y vulnerabilidad [14].

El enfoque sistémico parte de reconocer que en el territorio se encuentran interacciones ecológicas, sociales, tecnológicas y políticas, donde ningún elemento actúa de manera aislada. Por tanto, los eventos de inundación deben entenderse como manifestaciones de desequilibrios dentro de ese sistema complejo, más que como fallas puntuales o desastres imprevisibles. La perspectiva sistémica propone pasar de la gestión reactiva basada en la contención o el control físico del agua, a una gestión preventiva, adaptativa e integrada con el territorio, que articule el funcionamiento del ecosistema, la planificación urbana, la infraestructura y la gobernanza. En lugar de pelear contra las inundaciones, el enfoque sistémico promueve convivir con el agua y restaurar las condiciones que permiten su comportamiento natural dentro de límites seguros [10][15].

Este paradigma implica combinar conocimientos de diferentes campos como la hidrología, ecología, ingeniería, gestión pública, tecnología y ciencias sociales para abordar el riesgo de manera integral. Así, la gestión sistémica se apoya en la interdisciplinariedad como principio operativo, reconociendo que la efectividad de las medidas depende de la interacción entre componentes físicos e institucionales, infraestructura y comportamiento humano [14], [16]. Bajo esta lógica, la gestión del riesgo deja de ser un asunto exclusivo de los ingenieros o planificadores, para convertirse en un proceso compartido entre actores públicos, privados y comunitarios que intervienen sobre un mismo sistema territorial.

La gestión integrada de inundaciones, promovida por organismos internacionales y programas de cooperación, plantea que las inundaciones son procesos naturales del ciclo hidrológico que pueden ofrecer beneficios ecológicos y sociales si se gestionan adecuadamente. En ese sentido, se busca integrar las políticas de gestión del agua, ordenamiento territorial y desarrollo sostenible, equilibrando medidas estructurales y no estructurales en función de las características de cada cuenca [17]. Este enfoque reconoce que la reducción del riesgo no depende únicamente de la infraestructura, sino también de la manera en que los ecosistemas son conservados, las comunidades participan y las instituciones cooperan [18].

La noción de gestión sistémica e inteligente de inundaciones extiende esta mirada integral al incorporar la dimensión tecnológica y del conocimiento como elementos centrales. En la actualidad, la disponibilidad de datos en tiempo real, sensores de monitoreo, modelos de simulación y herramientas de análisis territorial permite construir sistemas de gestión inteligente que mejoran la capacidad de anticipar, prevenir y responder ante eventos extremos [15], [19]. No obstante, el valor de la gestión inteligente no radica únicamente en el uso de tecnología, sino en la capacidad institucional de interpretar, comunicar y transformar esos datos en decisiones coordinadas que fortalezcan la resiliencia del territorio.

Este marco también reconoce que la efectividad de las medidas depende de la gobernanza y la participación social. La gestión del riesgo requiere cooperación entre distintos niveles de gobierno y actores con responsabilidades compartidas sobre los recursos comunes, como los ríos, los humedales y los sistemas de drenaje [20], [15]. La experiencia internacional demuestra que los procesos de gobernanza policéntrica y participación ciudadana aumentan la legitimidad de las intervenciones y facilitan la sostenibilidad de las soluciones a largo plazo [21], [13]. En este sentido, la gestión sistémica no se limita a implementar medidas físicas o tecnológicas, sino que requiere una base institucional sólida, capaz de coordinar actores, promover la cooperación y articular el conocimiento científico con el saber local [14].

Finalmente, la gestión sistémica e inteligente del riesgo de inundaciones se alinea con las metas globales del desarrollo sostenible, en particular con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 sobre ciudades resilientes y el ODS 13 sobre acción climática. Ambos plantean la necesidad de fortalecer las capacidades de adaptación y reducir las vulnerabilidades urbanas frente a los desastres relacionados con el agua. Desde esta perspectiva, la gestión sistémica e inteligente representa una

estrategia orientada a transformar las ciudades y los territorios en sistemas resilientes, donde la infraestructura, la naturaleza, la tecnología y la sociedad actúan de manera complementaria para mitigar los impactos, aprovechar los beneficios y aprender de los eventos extremos [16]. Así, más que una técnica o un conjunto de herramientas, este enfoque constituye una nueva forma de comprender la relación entre las sociedades y el agua, presenta una visión integradora, adaptativa y colaborativa que busca garantizar la sostenibilidad y la seguridad de los territorios frente a un clima cambiante.

3.2 Estado del arte

En las últimas décadas, distintos países han adoptado enfoques de gestión sistémica e inteligente de inundaciones, que integran infraestructura, ecosistemas, gobernanza y tecnología para reducir el riesgo y fortalecer la resiliencia. Aunque las estrategias varían según el contexto geográfico, los casos más documentados coinciden en reconocer el agua como un elemento que hace parte del territorio y en priorizar intervenciones que permitan convivir con las crecidas, en lugar de intentar eliminarlas.

3.2.1 Europa: restaurar el espacio del río y coordinar múltiples niveles de decisión

En Europa, los Países Bajos son pioneros en la implementación de una gestión sistémica del riesgo. El programa *Room for the River*, desarrollado tras las inundaciones de 1993 y 1995, buscó reducir la presión sobre los diques y restablecer la capacidad natural del río para inundar de forma controlada. Para lograrlo, se reubicaron los diques tierra adentro, es decir, se alejaron del cauce para ampliar el espacio fluvial y permitir que el agua se expanda sin causar daños graves. Esta medida disminuyó los niveles de crecida y restauró ecosistemas ribereños, transformando la gestión hidráulica en una estrategia de ordenamiento territorial y mejora ambiental [22]. El proceso se gestionó mediante una gobernanza multinivel, en donde el gobierno nacional definió los objetivos de seguridad, las provincias coordinaron la ejecución y los municipios diseñaron proyectos locales junto a las comunidades [15].

Otro referente europeo es Copenhague (Dinamarca), donde tras las inundaciones de 2011 se implementó el *Cloudburst Management Plan*. Este plan combina infraestructura gris y verde para conducir y retener el agua lluvia durante eventos extremos, aquí las calles se rediseñaron como

canales temporales mientras que los parques actúan como zonas de almacenamiento controlado. Además, se utilizan modelos digitales y sensores para simular flujos y priorizar inversiones [23].

3.2.2 Asia: infraestructura híbrida y adaptación urbana al cambio climático

En Asia, la gestión sistémica se ha orientado principalmente a enfrentar el rápido crecimiento urbano y la intensificación de lluvias asociadas al cambio climático. En China, el programa nacional *Sponge Cities* promueve que las ciudades funcionen como “esponjas” capaces de absorber y reutilizar el agua lluvia. Las ciudades piloto, entre ellas Wuhan, Chongqing y Guangxi, han implementado soluciones basadas en la naturaleza como jardines de lluvia, pavimentos permeables, humedales urbanos y parques inundables, integrados a la red de drenaje convencional [24]. Estas medidas han reducido significativamente la escorrentía superficial y mejorado la calidad del agua. La clave de este modelo radica en su articulación institucional, en donde los ministerios nacionales establecen metas, los gobiernos locales adaptan las intervenciones y las universidades evalúan los resultados mediante monitoreo hidrológico y análisis satelital [24].

3.2.3 África Subsahariana: Sudáfrica y Ghana

En la región de Sudáfrica y Ghana, caracterizada por una alta exposición climática y desigualdad urbana, han emergido estrategias de gestión comunitaria e innovación tecnológica. En Sudáfrica, iniciativas de resiliencia urbana combinan sensores de bajo costo, análisis satelital y educación comunitaria para la gestión anticipada del riesgo [25]. Por otro lado, investigaciones como las de Douglas [26] evidencian que la vulnerabilidad a las inundaciones en ciudades africanas está estrechamente relacionada con la pobreza y la informalidad urbana. Por ello, las estrategias más efectivas en la región se basan en procesos de aprendizaje social, fortalecimiento de la gobernanza local y restauración de ecosistemas urbanos, más que en grandes infraestructuras.

3.2.4 América Latina: ordenamiento territorial y adaptación inclusiva

En Colombia, el caso de La Mojana representa una experiencia pionera en gestión sistémica del riesgo de inundaciones a nivel regional. Tras las inundaciones de 2010-2011, el gobierno formuló el Plan de Acción Integral de La Mojana (2016) [27], [28] orientado a reordenar el territorio alrededor del agua. Este plan articula obras hidráulicas sostenibles con restauración de humedales y canales naturales, reubicación de viviendas en zonas seguras, fortalecimiento institucional y creación de sistemas comunitarios de monitoreo y alerta. Su implementación evidencia una

transición hacia un modelo de coordinación intersectorial, en el que los sectores de ambiente, agricultura, vivienda y planeación trabajan conjuntamente.

En conjunto, los estudios revisados muestran una clara convergencia hacia modelos integrados y adaptativos de gestión del riesgo, sustentados en la combinación de soluciones estructurales y no estructurales, la restauración de ecosistemas, la gobernanza colaborativa y el uso de tecnologías inteligentes. Sin embargo, la literatura también identifica desafíos persistentes como la fragmentación institucional, las brechas de información, la dificultad de medir los co-beneficios de las SbN y la necesidad de marcos de evaluación más integrales [15].

3.3 Marco Normativo

Colombia cuenta con un marco legal e institucional robusto para la gestión del riesgo de desastres, dentro del cual se inscribe la gestión del riesgo de inundaciones. Las leyes, decretos y documentos destacables se presentan en la siguiente tabla:

Ley/ Decreto/Documento	Decreta:	Justificación
Ley 1523 de 2012	Congreso de Colombia	Eje central del marco normativo que adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). Esta ley marcó un hito al establecer la gestión del riesgo como una política pública de carácter obligatorio, transversal a todos los sectores y niveles de gobierno.

		<p>De acuerdo con su artículo 1, la gestión del riesgo es “un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes encaminadas al conocimiento, la reducción y el manejo del riesgo, con el propósito de proteger la vida, el bienestar y el desarrollo sostenible” [29]. La ley enfatiza que esta política es una condición necesaria para el desarrollo e integra la gestión del riesgo con la planificación territorial, ambiental y sectorial.</p> <p>Esta ley, define las responsabilidades dentro del SNGRD, incorporando actores públicos, privados y comunitarios bajo el principio de corresponsabilidad. El Estado asume la dirección y coordinación general, las entidades privadas deben</p>
--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

		<p>gestionar los riesgos asociados a sus operaciones y la ciudadanía tiene el deber de acatar las medidas de prevención y participar en los procesos de gestión.</p> <p>Esta ley dispuso la formulación del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD), cuya primera versión cubrió el período 2015-2030. Este plan define líneas de acción en reducción del riesgo hídrico, fortalecimiento institucional, financiamiento del riesgo y promoción de la resiliencia territorial. El PNGRD actualizado por la UNGRD (2023), incorpora la noción de riesgo sistémico y el enfoque de soluciones basadas en la naturaleza como estrategias prioritarias para la adaptación [30].</p>
Decreto 2157 de 2017	Presidente de la República de Colombia	Establece la obligación para ciertos sectores empresariales como servicios públicos, telecomunicaciones y energía,

		de formular planes del riesgo de desastres [31].
Decreto 19 de 2012	Presidente de la República de Colombia	Exige la incorporación de la gestión del riesgo en los POT, así como estudios de amenaza, vulnerabilidad, riesgo y restricciones de uso del suelo en zonas de amenaza alta. Este decreto ha cobrado especial relevancia desde la Guía Técnica para la Gestión del Riesgo en el POT publicada por el Ministerio de Vivienda, que orienta la evaluación de amenazas como las inundaciones con base en escenarios de cambio climático.
Ley 1931 de 2018 (Decreto 690 de 2022)	Congreso de Colombia	Consolidan el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), dentro del cual la gestión del riesgo se reconoce como instrumento de adaptación. El PNGRD también promueve la integración de la gestión del riesgo con la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático,

		formalizada en esta ley, que establece las bases para la planificación y ejecución de medidas de adaptación en los sectores productivos y territoriales.
CONPES 4076 de 2022 y CONPES 4084 de 2022	Departamento Nacional de Planeación	Enfocados en la región de La Mojana, institucionalizan la adopción de soluciones basadas en la naturaleza y obras hidráulicas sostenibles como medidas de reducción del riesgo de inundaciones [27] [28] .

Tabla 1. Marco normativo. Fuente: Elaboración propia

A nivel técnico, diversas entidades cumplen roles estratégicos. El IDEAM produce mapas de amenaza por inundaciones, modelaciones hidrológicas y estudios sobre variabilidad climática, el UNGRD implementó la plataforma Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo (SNGRD), que centraliza indicadores, alertas y mapas dinámicos del riesgo, el Fondo Adaptación ejecuta obras de mitigación y reconstrucción y el Ministerio de Ambiente emite lineamientos sobre reducción del riesgo por fenómenos hidrometeorológicos basado en ecosistemas.

En conjunto, estas disposiciones conforman un sistema normativo coherente que busca transitar desde una gestión reactiva hacia una gestión preventiva, integrada y resiliente, donde la reducción del riesgo de inundaciones se articula con la sostenibilidad y el desarrollo territorial.

4. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en cuatro fases articuladas que van desde la comprensión conceptual del problema hasta su operacionalización empírica y visualización para la toma de decisiones a escala municipal en Colombia.

4.1 Fase 1. Revisión de literatura

Iniciamos con una revisión dirigida de literatura científica en *ScienceDirect* y *Scopus* utilizando combinaciones de palabras clave como “gestión sistémica”, “inundaciones” y “*nature-based solutions*”. El propósito de esta primera etapa fue identificar cómo se ha abordado la problemática de inundaciones desde enfoques sistémicos en distintos países, qué componentes son recurrentes en las experiencias exitosas y qué implicaciones metodológicas y de implementación conllevan. A partir de esta lectura crítica, establecimos los componentes nucleares que debían integrar el análisis para el caso colombiano.

4.2 Fase 2. Construcción del marco de dimensiones y guía operativa (Resultados – Capítulo 1)

Con base en la revisión, definimos seis dimensiones que encapsulan el problema de fondo y las capacidades de gestión necesarias: hidrología dinámica, arquitectura territorial, infraestructura híbrida, gobernanza, capacidad sociocomunitaria e inteligencia y datos. Para cada dimensión elaboramos una ficha metodológica que incluye: definición operativa, métricas recomendadas, umbrales o rangos de referencia, herramientas de medición y fuentes de datos potenciales. La construcción de estas fichas se alimentó de consultas adicionales en páginas académicas, revistas científicas y portales gubernamentales nacionales con el fin de asegurar trazabilidad y aplicabilidad. El resultado de esta fase se organizó como un capítulo-guía de uso práctico para entidades territoriales, en el que se explica qué evaluar, con qué indicadores, cómo medir y dónde conseguir la información mínima necesaria.

4.3 Fase 3. Estrategias de intervención y criterios de selección (Resultados – Capítulo 2)

En este paso propusimos cuatro familias de estrategias aplicables a la gestión de inundaciones en el país: estrategias grises, infraestructura verde, soluciones híbridas (gris-verde) y estrategias socio-institucionales. Para cada familia se describieron los criterios de conveniencia y selección y algunos

ejemplos internacionales de implementación exitosa con sus aprendizajes operativos. Esta sección no solo enuncia alternativas, sino que provee un marco de decisión para que los territorios ponderen opciones según sus restricciones y objetivos.

4.4 Fase 4. Aplicación nacional: caso de estudio por municipios

La fase aplicada consistió en evaluar el desempeño municipal a partir de las seis dimensiones. Primero, realizamos un inventario de indicadores disponibles a nivel nacional en TerriData, IDEAM, IGAC, Datos Abiertos y DANE, entre otros repositorios, para identificar variables ya calculadas y comparables que pudieran mapearse a las métricas de cada dimensión. Los indicadores obtenidos fueron:

4.4.1 Para la dimensión de Hidrología Dinámica

- Avenidas torrenciales [32]
- Porcentaje del área de la entidad territorial amenazada por fenómenos hidrometeorológicos [32]
- Porcentaje de eventos de inundaciones [32]
- Velocidad de inundación TR 50 años [33]
- Profundidad de inundación TR 50 años [33]
- Precipitación [34]

4.4.2 Para la dimensión de Arquitectura territorial

- Porcentaje del área departamental en humedales que se encuentra en el municipio [32]

4.4.3 Para la dimensión de Infraestructura híbrida

- Cobertura de acueducto (REC) [32]
- Cobertura de alcantarillado (REC) [32]
- Cobertura de aseo (REC) [32]

4.4.4 Para la dimensión de Capacidad sociocomunitaria

- Vulnerabilidad y riesgo por cambio climático – capacidad adaptativa [32]
- Vulnerabilidad y riesgo por cambio climático – sensibilidad [32]
- Tasa de personas (muertas, heridas, desaparecidas y/o afectadas) por eventos recurrentes [32]
- Índice de pobreza multidimensional [35]
- Tasa de analfabetismo [32]
- Déficit cualitativo de vivienda [32]
- Déficit cuantitativo de vivienda [32]
- Hacinamiento crítico [36]

4.4.5 Para la dimensión de Gobernanza

- Inversión total en gestión del riesgo [32]
- Porcentaje en conocimiento del riesgo [32]
- Porcentaje en fortalecimiento institucional [32]
- Porcentaje en reducción del riesgo [32]
- Estrategia municipal de respuesta a emergencias [32]
- Plan de gestión del riesgo de desastres [32]

4.4.6 Para la dimensión de Inteligencia y Datos

- Total acumulado de eventos de desastres [32]
- Internet fijo penetración municipal [33]

Cuando no existían indicadores listos o con cobertura suficiente, diseñamos tres indicadores geoespaciales adicionales calculados en QGIS, a partir de insumos vectoriales (*shapefiles*) nacionales:

- Densidad de drenaje (km/km^2) por municipio para la dimensión de Hidrología Dinámica:

Se tomó la capa oficial de límites municipales [37] y la capa de rondas hídricas del mapa de cartografía base del IGAC [38]. Se recortó la red hidrológica total al interior de cada municipio y se calculó la longitud total (km) de la red por entidad territorial. Con el área municipal (km^2), se obtuvo la densidad de drenaje por municipio.

- Porcentaje de área construida en zonas inundables para la dimensión de Arquitectura territorial:

Para el cálculo de este indicador se quería utilizar el perímetro urbano de cada municipio, sin embargo, no pudo ser obtenido en ninguna página de datos abiertos del país. Por consiguiente, se utilizó la capa nacional de construcciones tomada también del mapa de cartografía base del IGAC [38] como aproximación de superficie urbana. Se intersectaron las construcciones con la capa de zonas inundables y, posteriormente, con los límites municipales. El porcentaje se calculó como el área construida ubicada dentro de zonas inundables dividida por el área total construida del municipio. Este procedimiento aproxima la exposición urbana cuando el perímetro oficial no está disponible, y se documenta como tal.

- Porcentaje de impermeabilidad por municipio para la dimensión de Arquitectura territorial:

Para cada municipio se estimó la proporción del área construida (utilizando igualmente la capa de construcciones [38]) respecto al área municipal como medida de impermeabilización relativa. Dado que no se dispuso de una capa nacional homogénea de perímetro urbano ni de un producto oficial de cobertura impermeable, este indicador se declara como aproximación y se interpretó con cautela.

Una vez se obtuvieron todos los datos, se consolidó una base de datos con observaciones de los últimos diez años cuando fue posible. En variables sin series completas, se incorporó el dato más reciente disponible dentro de ese rango de tiempo como aproximación del estado más reciente de

dicho territorio. La limpieza incluyó estandarización de nombres de municipios y códigos, detección de duplicados, control de unidades y revisión de errores de captura. Para homogenizar escalas y permitir agregación, se aplicó normalización min-máx en $[0,1]$. Los indicadores que se pueden analizar como un componente negativo (como avenidas torrenciales o porcentaje de eventos de inundaciones) donde más es peor, se invirtieron para que todos apuntaran a “más es mejor”, facilitando comparaciones y síntesis.

4.4.7 Agregación por dimensiones y desempeño sistémico

Con los indicadores normalizados se calcularon promedios por dimensión a nivel municipal. Posteriormente, se obtuvo un índice de desempeño sistémico municipal como promedio de las seis dimensiones. Para facilitar la lectura, los resultados se clasificaron en niveles de desempeño (por ejemplo, 0 siendo nulo; 0–0,2 bajo; 0,2–0,4 bajo medio; 0,4–0,6 medio; 0,6–0,8 medio alto; 0,8–1,0 alto). Los municipios con indicadores faltantes se trataron bajo una regla: si al menos un indicador válido existía en la dimensión, se tomaron los indicadores inexistentes como 0 y se promediaron, si todos faltaban la dimensión quedó en “N/A” y el índice sistémico se calculó sobre las dimensiones existentes, dejando trazabilidad del conteo efectivo. Por otro lado, se calculó el desempeño por dimensión, para ello se calcularon los percentiles siendo el 20 para el nivel bajo, 40 para el medio bajo, 60 para el medio, 80 para el medio alto y 100 para el alto, permitiendo así evaluar el desempeño relativo de los municipios en el contexto de su propia dimensión.

4.4.8 Visualización y entrega de resultados

Finalmente, se construyó un tablero de control en Power BI con dos propósitos: primero explorar el comportamiento municipal en todo el país, con el fin de poder observar patrones a nivel nacional, y segundo, comparar el desempeño para cada dimensión entre municipios. El tablero incluye vistas del índice agregado, perfiles radiales por dimensiones, filtros por municipio y un mapa temático del promedio de los indicadores calculados. La estructura permite a tomadores de decisión identificar fortalezas y brechas, y priorizar estrategias (grises, verdes, híbridas o socio-institucionales) según los criterios definidos en el Capítulo 2.

Toda la metodología utiliza insumos públicos, procedimientos replicables y documentación de supuestos. De esta forma, cualquier entidad puede replicar el flujo con sus propias capas o actualizarlo cuando haya mejores datos. Esta estructura asegura que el marco propuesto funcione como guía escalable para la gestión sistémica e inteligente de inundaciones en Colombia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta primero, el capítulo 1 que consiste en la construcción del marco de seis dimensiones: hidrología dinámica, arquitectura territorial, infraestructura híbrida, gobernanza, capacidad sociocomunitaria e inteligencia y datos, explicando sus definiciones, métricas y umbrales. Luego, el Capítulo 2 desarrolla cuatro rutas de intervención (gris, verde, híbrida y socio-institucional) y los criterios para seleccionarlas según contexto. Posteriormente, el estudio de caso aplica el marco a todos los municipios de Colombia con indicadores nacionales con el fin de obtener un índice de desempeño sistémico. Finalmente, se explican los hallazgos derivados del análisis de datos y se discuten implicaciones, limitaciones y recomendaciones.

5.1 Capítulo 1: Construcción de las dimensiones

5.1.1 Hidrología Dinámica

El indicador de hidrología dinámica se refiere al análisis de las características y comportamiento de los eventos de inundación en un territorio, incluyendo su tipo, magnitud, frecuencia y la probabilidad de que ocurran. En este contexto, es fundamental identificar qué tipo de evento de inundación puede presentarse y con qué probabilidad o magnitud, abarcando desde lluvias extremas locales hasta crecidas de ríos de gran escala. Esta dimensión proporciona información clave para entender el peligro de inundación y sustenta la planificación del manejo del riesgo.

Tipos de inundación: En Colombia y a nivel global se distinguen varios tipos de inundaciones, cada uno con dinámicas hidrológicas particulares:

- **Inundación pluvial (urbana):** Ocurre por lluvias intensas que saturan la capacidad de drenaje local sin requerir el desborde de ríos. En zonas urbanas, cuando el alcantarillado se ve sobrecargado, el agua se acumula en las calles, generando inundaciones repentinas en la ciudad. También incluye la escorrentía superficial en laderas impermeables donde la lluvia no alcanza a infiltrarse. Estas inundaciones pluviales son de ocurrencia frecuente en centros urbanos colombianos durante aguaceros torrenciales [39].
- **Inundación fluvial (de río):** Se produce cuando el nivel de agua de un río crece más allá de la capacidad de su cauce, es decir que supera la cota de desbordamiento e inunda las planicies aluviales adyacentes. En Colombia son comunes en ríos de la región andina y

grandes ríos de la cuenca amazónica y Caribe, durante temporadas lluviosas intensas como durante el fenómeno de La Niña. La cota de inundación o nivel de desbordamiento de un río es un umbral crítico que se monitorea para emitir alertas, pues corresponde al nivel a partir del cual el agua empieza a salirse del cauce causando afectaciones en zonas habitadas [40].

- **Inundación relámpago (*flash flood*):** Es un caso extremo de inundación pluvial o fluvial caracterizado por su rapidez. Se desencadena por lluvias súbitas y muy intensas o por falla repentina de la infraestructura hidráulica, provocando crecientes abruptas en quebradas, arroyos o cauces secos en cuestión de minutos u horas. Son frecuentes en áreas de terreno empinado o árido, donde la escasa vegetación y suelo saturado o impermeable convierten la lluvia inmediata en torrentes violentos. Estas inundaciones repentinas representan un riesgo alto debido al poco tiempo de reacción para la población [41].
- **Inundación costera:** Tiene lugar en zonas litorales cuando condiciones oceánicas extremas elevan el nivel del mar por encima de lo normal. En ciudades costeras colombianas como Cartagena o Barranquilla, las inundaciones costeras pueden agravarse con lluvias locales intensas y drenajes deficientes, provocando encharcamientos en áreas bajas simultáneamente a la subida del nivel del mar [39].

5.1.1.1 Indicadores

Para caracterizar la hidrología dinámica de las inundaciones se emplean múltiples indicadores hidrológicos y estadísticos. Entre las variables más usadas están:

Indicador	Forma de integración	Unidad	Fuente	Descripción
Avenidas torrenciales	Normalización invertida	Eventos	Terridata - DNP a partir de información en la Unidad Nacional para la Gestión del	Frecuencia o amenaza de ocurrencia de flujos torrenciales en cauces de alta pendiente. Su presencia indica riesgo de eventos catastróficos localizados, típicamente

			Riesgo de Desastres	desencadenados por lluvias extremas en terrenos inestables [42].
Porcentaje del área de la entidad territorial amenazada por fenómenos hidrometeorológicos	Normalización invertida	Porcentaje (el valor está multiplicado por 100)	Terridata - DNP a partir de información en el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt	Este indicador, disponible en perfiles territoriales oficiales, sintetiza qué fracción del área está expuesta a inundaciones de cierto nivel de severidad. Un valor alto sugiere que gran parte de la zona podría verse afectada por lluvias extremas, orientando la priorización de planes de manejo del riesgo.
Porcentaje de eventos de inundación	Normalización invertida	Porcentaje (el valor está multiplicado por 100)	Terridata - DNP a partir de información en la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres	Peso relativo de las inundaciones dentro del conjunto de emergencias o desastres registrados en cierto período.
Profundidad y velocidad de inundación (para período de retorno de 50 años)	Normalización invertida	m/s	Datos abiertos Colombia	Estimaciones de la profundidad del agua y la velocidad del flujo durante un evento de cierta probabilidad, típicamente la inundación asociada a un período de retorno de 50 años. Ambos valores combinados permiten categorizar el nivel de peligro: aguas más allá de cierto umbral de profundidad y velocidad implican riesgos elevados para la población

				como el colapso de estructuras, arrastre de personas o vehículos.
Precipitación	Normalización invertida	mm	IDEAM	Indicador asociados a la lluvia que origina las inundaciones. Aquí se incluyen la precipitación acumulada y la intensidad de precipitación durante los eventos críticos. Son métricas base para entender la causa de la inundación. Un indicador típico es la precipitación anual con cierto período de retorno. Valores de lluvia extrema elevados indican potencial de generar inundaciones repentinas si la escorrentía no es controlada.
Densidad de drenaje	Normalización invertida	km/km ²	IGAC, creación propia	Índice que mide la relación entre la longitud total de los cursos de agua y el área total de la cuenca.
Coefficiente de escorrentía		Sin unidad	Parámetro hidrológico estándar	Es la fracción de la lluvia que se convierte en escorrentía superficial (valor entre 0 y 1). Este coeficiente resume el efecto integrado de la infiltración, la evaporación y el almacenamiento en la cuenca, valores cercanos a 1 implican que casi toda la lluvia termina fluyendo por la superficie (típico en zonas urbanas impermeables), mientras valores bajos indican alta infiltración y absorción.

Frecuencia o probabilidad de inundación		Sin unidad	Mapas de amenaza de inundación	Mapas de amenazas hídricas en Colombia utilizan estas frecuencias divididas en tres categorías: alta, moderada y baja probabilidad de ocurrencia de crecientes súbitas, niveles altos, tránsito de crecientes, crecientes por desembalse y desbordamientos.
Características de la cuenca de drenaje de un río		Humedad del suelo: % Temperatura: °C Topografía: pendiente % y elevación en m.s.n.m Área impermeable: %	IDEAM,SIAC, IGAC	Condiciones de humedad del suelo, temperatura del terreno, topografía, cobertura vegetal y área impermeable.

Tabla 2. Indicadores hidrología dinámica. Fuente: Elaboración propia

5.1.1.2 Umbrales de referencia

Los umbrales hidrológicos son valores críticos predefinidos de estas métricas, que sirven para activar alertas o clasificar la severidad de un evento. Algunos ejemplos de umbrales son:

- **Cotas de desbordamiento de ríos:** nivel del río a partir del cual inicia inundación en zonas aledañas. En Colombia, el IDEAM establece cotas de alerta amarilla, naranja y roja para distintos ríos que una vez se superen se declara alarma máxima.
- **Umbrales de lluvia para alertas tempranas:** en cuencas propensas a avenidas torrenciales, se determinan acumulaciones de lluvia en ciertas horas que si se alcanzan, se disparan alarmas. Sistemas como el *Flash Flood Guidance System* (FFGS), implementado

por la OMM, calculan umbrales de escorrentía lluvia-suelo a escala de cuenca que, de excederse, indican probabilidad alta de inundación relámpago [43].

- **Clasificación de niveles de inundación:** se pueden utilizar categorías de Inundación como Leve/Moderada/Mayor según rangos de altura de agua o caudal en puntos de control.
- **Índices compuestos de riesgo hídrico:** combinan probabilidad y consecuencias. Un umbral puede ser un valor de índice a partir del cual se considera “riesgo alto”. Estos se calibran según las condiciones de cada territorio.

5.1.1.3 Fuentes de datos

La hidrología dinámica requiere datos hidro-meteorológicos precisos. Las fuentes principales incluyen estaciones pluviométricas y estaciones de aforo hidrométrico.

- **Redes de monitoreo hidrometeorológico:** Son la base para cuantificar la hidrología dinámica. Incluyen estaciones pluviométricas y estaciones hidrométricas de aforo en ríos. En Colombia, por medio del IDEAM opera el sistema DHIME con cientos de estaciones que registran lluvias y caudales históricos. Estos datos alimentan tanto los análisis estadísticos como la calibración de modelos.
- **Satélites y teledetección:** imágenes satelitales para estimar precipitación y para mapear la extensión de inundaciones incluso en zonas sin instrumentos terrestres.
- **LIDAR:** provee modelos digitales de elevación de alta resolución, esenciales para simular rutas de flujo y delimitar zonas inundables con precisión.
- **Registros históricos y comunitarios:** cronologías de eventos pasados, encuestas a la población sobre hasta dónde llegó el agua, marcas de nivel del agua en paredes, fotografías aéreas históricas, entre otros, complementan los datos para validar modelos y entender patrones a largo plazo.

5.1.1.4 Herramientas metodológicas

La evaluación de la hidrología dinámica de inundaciones se apoya en diversas herramientas técnicas y modelos. Algunas de las más utilizadas son:

- **Modelos hidrológico/hidráulicos:** simulan la generación de escorrentía y propagación de flujos. Por ejemplo, modelos lluvia-escorrentía como HEC-HMS (del *US Army Corps*) y modelos hidráulicos de cauce e inundación como HEC-RAS son ampliamente empleados para estimar niveles de agua bajo escenarios de lluvia dados. Otros modelos populares: SWMM (EPA, muy usado para drenaje urbano con módulos de Soluciones Basadas en la Naturaleza) o SWAT (orientado a cuencas rurales/agriculturas).
- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** permiten integrar datos espaciales (topografía, uso de suelo) y elaborar mapas de amenaza y riesgo. Herramientas SIG, como ArcGIS o QGIS, poseen módulos hidrológicos para delinear cuencas, calcular flujo acumulado, identificar zonas bajas, etc. También facilitan la superposición de resultados de modelos con elementos expuestos como viviendas o infraestructuras para evaluar impactos.
- **Herramientas de monitoreo y alerta temprana:** plataformas tipo *dashboard* que reciben datos en tiempo real de sensores, modelos numéricos y pronósticos meteorológicos, generando alertas automáticas. En Colombia, el IDEAM emite boletines de alertas hidrológicas diariamente.

5.1.2 Arquitectura territorial

Este indicador describe la estructura espacial, la morfología urbana y los patrones de ocupación del suelo que influyen en la generación y distribución de la escorrentía durante eventos de lluvia. En otras palabras, la arquitectura territorial se enfoca en cómo el uso del suelo, la forma de la ciudad y las características geográficas del terreno afectan tanto la cantidad de agua que escurre superficialmente como el daño potencial por inundaciones. En áreas urbanas, una mayor impermeabilidad del terreno (calles, edificios) implica menos infiltración de lluvia y más escorrentía, lo que puede agravar inundaciones pluviales, asimismo, la ocupación de planicies de inundación aumenta la exposición al peligro fluvial.

5.1.2.1 Indicadores

Para evaluar la arquitectura territorial en la gestión sistémica del riesgo por inundaciones, se tiene indicadores como los siguientes:

Indicador	Forma de integración	Unidad	Fuente	Descripción
Porcentaje del área departamental en humedales que se encuentra en el municipio	Normalización	Porcentaje (el valor está multiplicado por 100)	Terridata - DNP a partir de información en la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres	Proporción de la superficie municipal ocupada por humedales (según los inventarios departamentales de humedales presentes en el municipio). Los humedales actúan como esponjas naturales que almacenan agua, reduciendo y retardando los picos de crecida, por lo tanto, un mayor porcentaje de área en humedales suele asociarse a una mayor capacidad natural de atenuación de inundaciones [44]. Este indicador permite apreciar qué tanto del territorio municipal conserva esas áreas de regulación hídrica.
Porcentaje de área urbana construida en zonas inundables	Normalización invertida	Porcentaje	IGAC, creación propia	Representa la fracción de las zonas de amenaza de inundación (identificadas en el Mapa Nacional de Zonas Potencialmente Inundables del IDEAM) que está ocupada por áreas urbanizadas o construidas. Este indicador es fundamental para cuantificar la exposición física, aquí un valor alto indica que gran parte del territorio susceptible a inundación tiene desarrollos urbanos, lo que supone alto riesgo de daños.

Porcentaje de superficie impermeable	Normalización invertida	Porcentaje	IGAC, creación propia	Corresponde al porcentaje de la superficie municipal que está cubierta por superficies impermeables donde el agua de lluvia no se infiltra al subsuelo. Este es un indicador directo del grado de urbanización y tiene alta incidencia hidrológica, pues numerosos estudios muestran que, a mayor cobertura impermeable, mayor escorrentía superficial se genera y más se reducen la infiltración y recarga de acuíferos [45].
Porcentaje del área departamental deforestada que se encuentra en el municipio	Normalización invertida	Porcentaje	Terridata	Permite identificar qué tan relevante es el municipio dentro de la dinámica de deforestación del departamento. Un mayor porcentaje indica que el territorio municipal concentra una proporción significativa de la pérdida de cobertura vegetal, lo que puede incrementar la escorrentía superficial, reducir la infiltración y aumentar la susceptibilidad a inundaciones y movimientos en masa. Además, la deforestación altera la capacidad de regulación hídrica de la cuenca, disminuye la protección del suelo y afecta ecosistemas estratégicos.
Uso y cobertura del suelo			Mapas de Cobertura de la Tierra del	Analizar los tipos de uso del suelo (residencial, industrial,

			IDEAM y los Mapas de Capacidad de Uso del Suelo del IGAC.	agrícola, natural) y su compatibilidad con las funciones hidrológicas del territorio es un punto esencial para el entendimiento de las inundaciones. La urbanización o las actividades agrícolas en zonas naturalmente inundables alteran la dinámica del agua y aumentan la escorrentía [46]. De igual manera, la deforestación y el cambio de coberturas naturales hacia usos impermeables reducen la infiltración y aumentan la velocidad de escurrimiento [45].
Pendiente y morfología		Pendiente: % Ancho de valle: m Elevación: m.s.n.m	Modelos digitales de elevación	La pendiente del terreno y la forma general del relieve condicionan directamente la generación y velocidad de la escorrentía. En zonas con pendientes altas, el agua fluye con mayor rapidez, aumentando su poder erosivo y reduciendo el tiempo de concentración [46]. Por el contrario, en terrenos planos con drenaje deficiente, el agua tiende a acumularse y prolongar la duración de las inundaciones. La literatura sugiere analizar la morfología urbana, es decir el ancho de valle, la forma de la cuenca, la ubicación de la mancha urbana respecto al cauce principal, ya que permite identificar áreas con mayor susceptibilidad a la inundación [38].

Rondas hídricas y compatibilidad de usos		Porcentaje o unidad de área de la ronda (ha o km ²)	IGAC, POT con mapas de usos, IDEAM	La ronda hídrica es el área paralela a los ríos, cuyo propósito es proteger cuerpos de agua, amortiguar contaminantes y mitigar riesgos. La ocupación urbana en rondas y planicies agrava la exposición a inundación, por ello, el acotamiento y el uso del suelo en estas franjas son puntos críticos a tener en cuenta [47].
Verde urbano y cobertura vegetal		Área verde per cápita: m ² /hab, Cobertura: %, ha o km ²	DANE, IGAC, SIAC, IDEAM	La superficie de áreas verdes per cápita es un indicador que permite obtener beneficios en regulación térmica, control de inundaciones y servicios ecosistémicos [48]. En paralelo, la cobertura de vegetación natural provee contexto ecosistémico para corredores, humedales y rondas.

Tabla 3. Indicadores arquitectura territorial. Fuente: Elaboración propia

5.1.2.2 Umbrales de referencia

Dado que la hidrología urbana y la geomorfología tienen variabilidad local, se sugiere interpretar la arquitectura territorial con una escala de desempeño por variable, priorizando marcos publicados y normativos:

- **Impermeabilidad:** Uno de los umbrales más ampliamente documentados es el del *Impervious Cover Model*, desarrollado a partir de numerosos estudios de cuencas urbanas en Estados Unidos. Según este modelo, cuando la proporción de superficie impermeable supera ciertos límites, los sistemas hidrológicos comienzan a degradarse progresivamente. A partir de 10% de impermeabilidad, se evidencia una degradación incipiente en la condición de los cauces, acompañada de mayor escorrentía, erosión y pérdida de hábitats acuáticos. Entre 10% y 25%, las cuencas ya presentan un impacto con alteraciones significativas en su régimen hidrológico y por encima del 25%, la degradación se considera severa o no sostenible, caracterizada por caudales pico elevados,

sedimentación, contaminación y pérdida de estabilidad fluvial [49]. Aunque estos valores se originaron en contextos templados, su consistencia en diferentes regiones los ha convertido en una referencia útil para la planificación urbana. Estudios posteriores como el de Jacobson [46] confirman que el aumento del área impermeable es el predictor más robusto del incremento de escorrentía en ambientes urbanos.

- **Compatibilidad con rondas/planicies:** En el contexto colombiano, la ocupación de rondas hídricas se considera un indicador crítico de inadecuada gestión territorial. El Decreto 2245 de 2017 establece que estas franjas son determinantes ambientales y deben destinarse exclusivamente a usos compatibles como restauración ecológica, parques o infraestructura verde [43]. Teniendo esto en cuenta, se puede establecer una escala de desempeño: ocupación cero en ronda hídrica puede significar una condición ideal o de protección de las personas en caso de inundación, mientras que, una ocupación alta puede significar una condición crítica, que incrementa la exposición y vulnerabilidad ante crecidas de los ríos.

5.1.2.3 Fuentes de datos

En el contexto colombiano, la información geoespacial proviene principalmente de fuentes públicas y verificadas:

- **IGAC - Colombia en Mapas:** incluye coberturas de uso del suelo, agrología, límites administrativos, entre otros.
- **IDEAM:** ofrece mapas de amenaza por inundación, hidrografía y variables climáticas.
- **SIAC:** integra datos ambientales, como áreas protegidas, ecosistemas y rondas hídricas.
- **DANE:** proporciona información demográfica y censal, útil para analizar la exposición humana.
- **Ministerio de Ambiente y DNP:** publican guías técnicas, normativas y lineamientos para la integración de la gestión del riesgo en los POT.

5.1.2.4 Herramientas metodológicas

Para analizar estos datos y derivar indicadores de arquitectura territorial, se emplean principalmente herramientas de SIG y teledetección:

- **Sistemas de Información Geográfica:** permiten superponer capas (uso del suelo, elevación, población) y calcular métricas espaciales. Por ejemplo, usando ArcGIS o QGIS se puede calcular automáticamente la superficie impermeable de una zona a partir de una clasificación de imagen satelital o determinar cuánta área de planicie aluvial está urbanizada.
- **Teledetección satelital:** con software como Google Earth Engine se puede hacer seguimiento temporal de la expansión urbana, cambios en cobertura vegetal y relacionarlos con registros de inundaciones. Imágenes satelitales como Sentinel-2 o Landsat 8 ya permiten obtener datos más precisos como clasificar las superficies de acuerdo a la vegetación, uso de suelo, red hídrica y áreas construidas. Asimismo, se pueden obtener índices como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para estimar áreas verdes [51].
- **Análisis multicriterio con AHP:** para identificar zonas prioritarias de intervención, combinando variables de vulnerabilidad física (impermeables, pendiente) con variables socioeconómicas (densidad poblacional). Este enfoque ayuda en planeación para decidir dónde sería más efectivo implementar una estrategia de infraestructura verde o azul.
- **Modelos digitales de elevación (MDE):** Los modelos digitales de elevación (MDE) obtenidos mediante sensores satelitales o tecnología LIDAR, son herramientas esenciales para analizar la topografía y la morfología del terreno. A partir de ellos se derivan mapas de pendiente, acumulación de flujo, dirección del drenaje y delimitación de microcuencas urbanas [52].
- **Datos catastrales y de planeación urbana:** Los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) aportan información normativa, de catastro y estructural sobre los usos del suelo, la zonificación y las áreas destinadas a equipamientos o expansión urbana.

5.1.3 Infraestructura híbrida

Este indicador evalúa la composición, distribución y desempeño de las soluciones para la gestión del agua urbana que combinan infraestructura gris con infraestructura verde-azul, la cual está basada en ecosistemas o soluciones naturales. Se le denomina infraestructura “híbrida” porque

reconoce que la resiliencia hídrica urbana depende tanto de alcantarillados, diques o canales como de humedales, parques inundables, jardines de lluvia y otras intervenciones verde-azul. Según Chen [53], aunque la infraestructura gris ofrece alta capacidad hidráulica, su efectividad es limitada bajo escenarios de cambio climático y urbanización acelerada, por lo que integrar elementos verdes mejora la retención, reduce el caudal pico y amplía la adaptabilidad del sistema. Por su parte, Lamond y Everett [54] subrayan que el éxito de la infraestructura azul-verde también depende de su aceptación en las prácticas sociales cotidianas, ya que los usos, cuidados y significados que las comunidades le atribuyen a estos espacios determinan su sostenibilidad.

5.1.3.1 Indicadores obtenidos de fuentes oficiales

Los siguientes indicadores, tomados de fuentes oficiales y otros sugeridos por la literatura permiten evaluar de forma aproximada la infraestructura híbrida:

Indicador	Forma de integración	Unidad	Fuente	Descripción
Cobertura de acueducto	Normalización	Porcentaje (el valor está multiplicado por 100)	Terridata - DNP a partir de información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios	Representa el porcentaje de la población con acceso a agua potable mediante la red pública. Aunque es un componente de infraestructura de abastecimiento y no de drenaje, su existencia indica el grado de desarrollo de la infraestructura hídrica urbana instalada.
Cobertura de alcantarillado	Normalización	Porcentaje	Terridata - DNP a partir de información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios	Indica el porcentaje de la población conectada a sistemas de alcantarillado. Es particularmente relevante para evaluar la extensión de la infraestructura gris de drenaje pluvial y sanitario, y sirve como referencia para identificar zonas

				donde sería necesario complementar con soluciones verde-azules.
Cobertura de aseo	Normalización	Porcentaje	Terridata - Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios	Corresponde al porcentaje de la población que cuenta con servicio formal de recolección de residuos sólidos. Si bien este indicador no mide infraestructura de drenaje directamente, tiene efectos indirectos sobre la función del sistema ya que la acumulación de residuos puede obstruir canales, sumideros o cauces naturales y artificiales, reduciendo su eficiencia durante eventos de lluvia.
Capacidad hidráulica instalada		m ³ /s	Empresas de servicios públicos	Suma de la capacidad o almacenamiento de agua en las infraestructuras. Incluye la capacidad de drenaje de alcantarillados, como cuántos m ³ /s pueden evacuar, la capacidad de retención en tanques de tormenta o embalses, y también la capacidad de retención/infiltración estimada de soluciones verdes como calcular cuánta agua puede capturar un sistema de bio-retención antes de saturarse.
Volumen de agua retenido o infiltrado por la infraestructura verde		Porcentaje	Empresas de servicios públicos, constructoras	Mide la eficacia de las soluciones verde-azul en manejar la escorrentía en la fuente. A mayor

				porcentaje, menor carga para la infraestructura gris.
Costos de ciclo de vida y relación costo-beneficio		COP	Constructoras	Aunque no es físico, es común en evaluaciones de infraestructura híbrida. Se calculan los costos totales de implementar y mantener soluciones verdes vs grises y los beneficios obtenidos como la reducción de daños por inundación o el valor ecológico [55].

Tabla 4. Indicadores infraestructura híbrida. Fuente: Elaboración propia

5.1.3.2 Umbrales de referencia

En infraestructura híbrida, los umbrales suelen estar ligados a objetivos de desempeño o de política pública. Se podría medir este indicador en términos de:

- **Objetivo de reducción de caudal pico:** Se pueden fijar metas cuantitativas. Por ejemplo, reducir al menos 50% del caudal pico de una tormenta de 10 años mediante intervenciones verdes. Esto se traduce en dimensionar suficientes obras verdes para que el sistema manejado combinado cumpla ese objetivo.
- **Metas de implementación de infraestructura verde:** Se proponen metas como construir 200 hectáreas de techos verdes o jardines de lluvia para 2030. Este tipo de metas en política pública son umbrales de cumplimiento que reflejan compromiso con la hibridación.
- **Niveles de servicio del drenaje urbano:** Un criterio de evaluación puede ser que las inundaciones urbanas no ocurran para lluvias con periodo de retorno de 5 años o menos, lo que implica que tanto la infraestructura gris como la verde deben ser capaces de manejar ese nivel. Si la ciudad sufre inundaciones en lluvias menores a esa frecuencia, está por debajo del umbral de servicio deseado.

5.1.3.3 Fuentes de datos

Para evaluar infraestructura híbrida, las fuentes de información abarcan tanto registros técnicos de infraestructura como observaciones ambientales:

- **Inventarios municipales de infraestructura de drenaje:** Datos de los departamentos de obras públicas o empresas de acueducto: longitud y diámetro de tuberías, ubicación de sumideros, estaciones de bombeo, capacidad de alcantarillado existente. Estos permiten modelar el sistema gris.
- **Catálogo de proyectos de infraestructura verde:** Muchas ciudades llevan un registro de proyectos de sostenibilidad urbana. Por ejemplo, un listado de todos los parques, tanques de tormenta subterráneos, urbanizaciones nuevas con pavimento permeable, etc.
- **Monitoreos in situ de desempeño:** Sensores en algunas intervenciones verdes (medidores de nivel de agua en un jardín de lluvia) que miden cuánta agua está capturando. Pueden ser valiosos para validar cuánto aportan las soluciones basadas en la naturaleza.
- **Modelos hidrológicos integrados:** Herramientas de simulación (como SWMM con módulos LID, o modelos distribuidos en GIS) donde se ingresa la infraestructura verde proyectada y se estiman sus efectos. Estos modelos, calibrados con eventos reales, generan datos simulados de reducción de escorrentía, que se usan como insumos equivalentes a datos empíricos cuando estos faltan [56].
- **Indicadores financieros y administrativos:** Presupuesto invertido en infraestructura verde vs gris, número de actores participando en proyectos de NbS, entre otros. Estas fuentes proveen contexto del compromiso institucional con la infraestructura híbrida.
- **Percepción ciudadana y datos participativos:** encuestas o reportes ciudadanos sobre inundaciones antes y después de ciertas intervenciones para evaluar si las soluciones funcionan. Ayuda con la aceptabilidad y mantener a la comunidad activa y participativa lo cual es clave para el éxito de la infraestructura verde a largo plazo.

5.1.3.4 Herramientas metodológicas

La evaluación de infraestructura híbrida combina métodos de ingeniería y de análisis de políticas y beneficios:

- **Modelación hidráulica urbana integrada:** Software como EPA SWMM, InfoWorks ICM, MIKE Urban, permite representar conjuntamente tuberías, canales y componentes

LID (*Low Impact Development*). Con estos modelos se pueden correr tormentas de diseño y cuantificar indicadores.

- **Análisis costo-beneficio multicriterio:** Se utilizan metodologías para valorar no solo la reducción de daños por inundación, sino también los beneficios ecosistémicos.
- **Métodos participativos y de gobernanza:** Talleres con *stakeholders* y análisis de redes institucionales para entender cómo se está implementando la infraestructura híbrida. Aunque esto se cruza con el indicador de gobernanza, aquí importa porque muchas veces la eficacia de lo verde depende de la colaboración entre sectores. Herramientas como diagramas de flujo causales basados en la Dinámica de Sistemas se pueden usar para mapear estas interacciones, aportando una visión sistémica del desempeño de la infraestructura híbrida.

5.1.4 Gobernanza

La gobernanza se entiende como el conjunto de reglas, prácticas y procesos formales e informales, mediante los cuales actores estatales y no estatales toman e implementan decisiones, articulan intereses, rinden cuentas y gestionan recursos comunes [57]. En gestión del riesgo de desastres, gobernanza no es sinónimo de gobierno, esta implica arreglos policéntricos, coordinación multinivel y participación social efectiva para acordar y ejecutar decisiones sobre bienes comunes (ríos, humedales, drenajes urbanos) [20]. En Colombia, esta visión se ancla jurídicamente en la Ley 1523 de 2012, que crea y ordena el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) como soporte de entidades públicas, privadas y comunitarias con funciones de conocimiento, reducción y manejo del riesgo, incluyendo la coordinación interinstitucional y la información pertinente para la toma de decisiones.

Estas ideas respaldan el uso de “simetrías” para evaluar si los acuerdos alcanzados son inclusivos, legítimos, ejecutables y verificados en el tiempo [58]

En el contexto de inundaciones, el recurso de uso común objeto de decisión es todo el sistema fluvio-hidrosocial, es decir, los cauces y lechos de ríos y quebradas, sus rondas hídricas y planicies de inundación, los humedales interconectados mientras que en el medio urbano serían los corredores y redes de drenaje pluvial que gobiernan el flujo del agua. La decisión sobre ese

recurso común es policéntrica y anidada: a nivel nacional, el SNGRD define políticas y coordina actores, el IDEAM produce boletines y mapas hidrometeorológicos que informan la decisión y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible regula instrumentos como el Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), donde los Consejos de Cuenca integran la representación pública, privada y comunitaria. A nivel regional, las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) administran y controlan el uso del recurso hídrico y las rondas. En el nivel local, alcaldías y concejos definen usos del suelo en los POT y son responsables junto con las empresas de servicios públicos de la prestación y operación del alcantarillado, decisiva para la gestión de aguas lluvias y el control de inundaciones urbanas. Precisar este objeto de uso común y los nodos o actores decisorios permite medir con mayor rigor las simetrías de toma de decisiones: quién participa, con qué reglas, cómo se monitorea y sanciona y si las decisiones de cuenca, región y municipio mantienen coherencia y verificación en el tiempo.

5.1.4.1 Indicadores

A partir de la teoría de Ostrom y los principios de buena gobernanza, se propone evaluar la calidad de la gobernanza mediante simetrías que buscan apreciar el equilibrio e inclusión en diferentes dimensiones del proceso decisorio. A continuación, se definen cada una de ellas, así como varios indicadores cuantitativos y cualitativos:

Indicador	Forma de integración	Unidad	Fuente	Descripción
Simetría de la participación		Sin unidad		Mide la representatividad y diversidad de actores que participan de manera efectiva en los espacios decisorios como las entidades públicas de distintos niveles, las autoridades ambientales, las empresas de servicios públicos, las organizaciones comunitarias y veedurías, la academia y el sector privado. La participación en Colombia está garantizada por la Ley

				1757 de 2015 y las veedurías ciudadanas por la Ley 850 de 2003, el SINA (Ley 99 de 1993) integra Estado, sociedad y conocimiento ambiental. Una simetría de la participación asegura que los grupos afectados tengan voz, voto y canales de incidencia en los acuerdos.
Simetría de la deliberación		Sin unidad		Evalúa si las personas y organizaciones pueden expresar argumentos, objeciones y alternativas en condiciones de información suficiente y tiempos razonables, y si esa deliberación queda registrada por medio de actas.
Simetría de poder		Sin unidad		Observa si el derecho a decidir, es decir, votar, aprobar planes, priorizar inversiones, está distribuido de manera coherente con el principio de subsidiariedad y con la asignación de competencias en el SNGRD y el régimen de servicios públicos (Ley 142 de 1994).
Simetría de los acuerdos		Sin unidad		Contrasta lo acordado en mesas y consejos con lo que queda en actos administrativos. El Decreto 1640 de 2012 exige que los POMCA (Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas) se

				construyan con participación y que sean norma de superior jerarquía para ordenar acciones en la cuenca.
Simetría de los beneficios		Sin unidad		Analiza si los beneficios como obras, servicios, información o reducción del riesgo se distribuyen sin sesgos territoriales, de género o socioeconómicos.
Simetría de la acción		Sin unidad		Verifica que las tareas como quién hace qué, cuándo y con qué recursos, estén asignadas conforme a competencias y capacidades.
Simetría de la adaptación		Sin unidad		Juzga si los actores cuentan con capacidades para cumplir lo acordado y si hay mecanismos de aprendizaje como capacitaciones, protocolos o manuales.
Simetría del seguimiento		Sin unidad		Observa la regularidad de los espacios de seguimiento, la publicación de actas e indicadores y la corrección de desvíos. La gobernanza eficaz requiere monitoreo y evaluación, registro documental y trazabilidad de decisiones.
Simetría de sexo		Sin unidad		Considera igualdad y liderazgo femenino en espacios y cargos con decisión. La Ley 581 de 2000 (ley de

				cuotas) establece mínimos de participación de mujeres en cargos decisorios de la administración pública, aunque su cumplimiento varía, brinda un referente normativo para metas y planes de mejora.
Simetría intergeneracional		Sin unidad		Mide la inclusión de juventudes y personas mayores en decisiones. El Estatuto de Ciudadanía Juvenil (Ley 1622 de 2013) reconoce instancias y garantías de participación juvenil, alinearlos con consejos de gestión del riesgo y mesas de cuenca ayuda a mejorar la legitimidad y sostenibilidad de acuerdos.
Inversión en gestión del riesgo de desastres	Normalización	Miles de pesos constantes	Terridata - DNP a partir de información del FUT	Un mayor volumen de inversión total en gestión del riesgo sugiere un compromiso más fuerte de las autoridades con el tema, lo cual se relaciona con la simetría de la acción, puesto que se asignan recursos para cumplir las tareas planificadas y la simetría de la adaptación ya que mide el fortalecimiento de capacidades financieras para hacer frente al riesgo.
Porcentaje de la inversión dedicado al conocimiento del	Normalización	Porcentaje	Terridata - DNP a partir de	Estos indicadores revelan el enfoque estratégico de la gobernanza local, por ejemplo, una proporción

riesgo, el porcentaje enfocado al fortalecimiento institucional y el porcentaje orientado a la reducción del riesgo			información del FUT	significativa en conocimiento del riesgo, es decir en investigaciones, sistemas de alerta, estudios de amenaza y vulnerabilidad, denota preocupación por la base informativa para la toma de decisiones (simetrías de deliberación y seguimiento), mientras que una alta inversión en fortalecimiento institucional como la formación de personal, dotación de equipos, consolidación de los Consejos de Gestión del Riesgo, refleja esfuerzos por mejorar la capacidad de acción y coordinación de las entidades responsables (simetrías de adaptación y acción). Por su parte, el porcentaje en reducción del riesgo como la construcción de obras de infraestructura, medidas de mitigación en comunidades, reubicaciones, entre otros, indica cuánto se está destinando a acciones concretas para disminuir la exposición o la vulnerabilidad, evidenciando así resultados tangibles para la población (simetría de beneficios).
Estrategia Municipal de Respuesta a Emergencias y el Plan Municipal de Gestión	Normalización	Puntos	Terridata - UNGRD	La Ley 1523 de 2012 exige que cada municipio formule y adopte mediante decreto tanto su plan de gestión del riesgo como estrategia de

del Riesgo de Desastres				respuesta a emergencias, en concordancia con su respectivo Consejo Municipal de Gestión del Riesgo [59]. Esto se relaciona directamente con la simetría de los acuerdos ya que muestra que las políticas nacionales y departamentales se aterrizan en planes locales concretos y con la simetría de poder, pues implica que las autoridades locales ejercen su competencia y asumen liderazgo en la planificación del riesgo.
----------------------------	--	--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 5. Indicadores gobernanza. Fuente: Elaboración propia

5.1.4.2 Umbrales de referencia

Se propone un esquema ordinal de 6 niveles por simetría (0=nulo; 0-0,2=muy bajo; 0,2-0,4=bajo; 0,4-0,6=medio; 0,6-0,8=alto y 0,8-1=muy alto) que puede agregarse como promedio simple o ponderado. Un nivel “Muy bajo” describe arreglos con representación mínima, sin reglas claras, sin trazabilidad de acuerdos, ni seguimiento. Un nivel “Medio” corresponde a presencia formal de espacios y reglas como comités creados, actos administrativos publicados, pero con baja calidad deliberativa y poca ejecución. Un nivel “Alto” implica representación amplia y balanceada, voz efectiva, decisiones votadas con actas públicas, asignación de tareas y cronogramas cumplidos. “Muy alto” añade equidad en beneficios, igualdad de género y juventud según metas locales, coordinación vertical-horizontal-territorial y mejora continua con monitoreo e indicadores.

5.1.4.3 Fuentes de datos

Para participación, deliberación, poder y acuerdos se puede utilizar actas, resoluciones y decretos de Consejos de Gestión del Riesgo (Ley 1523 de 2012), actas y documentos de Consejos de Cuenca y POMCA (Decreto 1640 de 2012), reglamentos internos de comités sectoriales y empresas de servicios públicos (Ley 142 de 1994). Para seguimiento y acción, se debe reunir cronogramas, matrices de responsabilidades, POAI (Plan Operativo Anual de Inversiones) y

reportes trimestrales. Para beneficios, contraste planes, inversiones y coberturas (como drenaje, alcantarillado, restauración de infraestructura verde-gris) con mapas de exposición y grupos vulnerables. Para sexo e intergeneracional, se puede revisar composición de instancias y cumplimiento de la Ley 581 de 2000 y la Ley 1622 de 2013. Complementariamente, se puede considerar veedurías ciudadanas (Ley 850 de 2003) y portales de transparencia para validar publicidad y acceso a la información.

5.1.4.4 Herramientas metodológicas

Para recolectar y analizar la información anterior de manera sistemática, se recomiendan varias herramientas metodológicas de carácter cualitativo y participativo.

- **Revisión documental estructurada:** Elaborar una guía breve para leer sistemáticamente actas, actos administrativos y planes para así conocer: ¿quiénes asistieron?, ¿quién tuvo voz y voto?, ¿qué acuerdos se adoptaron?, ¿se asignaron responsables y plazos?, ¿hubo seguimiento? Este ejercicio nutre la participación, deliberación, poder, acuerdos y seguimiento.
- **Mapeo de actores y relaciones:** Con una tabla o diagrama, se puede listar actores, señalar roles, recursos y vínculos como la coordinación, el conflicto y la cooperación.
- **Contraste de lo acordado con el “papel”:** Se debe tomar una muestra de acuerdos priorizados y verificar su traducción a un instrumento formal como una resolución, un convenio y a su ejecución en contratos o informes. Esta técnica demuestra el cumplimiento de la simetría de los acuerdos.
- **Enfoque de inclusión:** Para simetría de sexo e intergeneracional, se puede realizar un inventario de integrantes, sea por función y nivel decisorio que contraste con metas propuestas. Si hay brechas, se debe acordar medidas de corrección.
- **Monitoreo periódico:** Definir una frecuencia mínima (trimestral o semestral) para actualizar el indicador, publicar actas y retroalimentar decisiones.

5.1.5 Capacidad socio comunitaria

En el contexto de la gestión sistémica de inundaciones urbanas, la capacidad sociocomunitaria se refiere al conjunto de recursos relacionales y culturales como la confianza mutua, la cohesión social, las normas de reciprocidad, la eficacia colectiva, las redes de apoyo y los vínculos con

instituciones, que permiten a una comunidad aprender, prepararse, actuar de forma coordinada y recuperarse ante eventos de inundación. En otras palabras, se puede decir que equivale al capital social comunitario orientado a la resiliencia frente a desastres.

La literatura clásica brinda las bases conceptuales de este concepto. Richardson [60] conceptualiza el capital social de Bourdieu como “la suma de los recursos reales o potenciales vinculados a la posesión de una red duradera de relaciones de conocimiento y reconocimiento mutuo”, enfatizando que las conexiones sociales brindan acceso a recursos valiosos. Esta definición destaca que la capacidad sociocomunitaria no es algo intangible, sino un activo medible que se traduce en comportamientos observables.

5.1.5.1 Indicadores obtenidos de fuentes oficiales

Para evaluar operativamente esta dimensión, se obtuvieron 8 indicadores cuantitativos obtenidos de fuentes oficiales que cubren aspectos de vulnerabilidad social, adaptabilidad y condiciones socioeconómicas de la comunidad y se listan a continuación junto con su relación con el capital social comunitario:

Indicador	Forma de integración	Unidad	Fuente	Descripción
Vulnerabilidad y riesgo por cambio climático - Capacidad adaptativa	Normalización	Puntos	Terridata - IDEAM	Índice compuesto que mide los mecanismos de adaptación al cambio climático en el municipio. Un valor alto de capacidad adaptativa indica que la comunidad cuenta con mayor capital social e institucional para hacer frente a amenazas climáticas.
Vulnerabilidad y riesgo por cambio climático - Sensibilidad	Normalización invertida	Puntos	Terridata	Índice complementario que evalúa la susceptibilidad o fragilidad socio-demográfica ante impactos climáticos. Una sensibilidad elevada

				refleja características sociales que aumentan la vulnerabilidad.
Tasa de personas afectadas por eventos de inundación recurrentes	Normalización invertida	Tasa por cada 100.000 habitantes	Terridata - UNGRD	Proporción de la población que ha resultado afectada por inundaciones repetidas en años recientes. Este indicador evidencia el impacto acumulado de las inundaciones sobre la comunidad. Un porcentaje alto sugiere exposición frecuente y posibles déficits en las capacidades de respuesta o prevención.
Índice de Pobreza Multidimensional (IPM)	Normalización invertida	Puntos	TerriData-DANE	Porcentaje de hogares que sufren múltiples privaciones sean educativas, sanitarias, de vivienda, ingresos, entre otras. Este indicador, proveniente de TerriData (calculado por el DNP con base en metodologías DANE), capta la vulnerabilidad socioeconómica. Altos niveles de pobreza multidimensional suelen explicar que comunidades sumidas en la pobreza tienden a tener menor acceso a información y menor resiliencia financiera ante desastres.
Tasa de analfabetismo	Normalización invertida	Porcentaje	Terridata - DANE	Proporción de la población mayor de 15 años que no sabe leer ni escribir. Un alto analfabetismo indica bajos niveles educativos, lo cual dificulta la comprensión de alertas tempranas

				y puede limitar la participación informada en planes de emergencia.
Déficit cualitativo de vivienda	Normalización invertida	Porcentaje	Terridata - DANE	Porcentaje de hogares que habitan en viviendas inadecuadas o con materiales deficientes. Este indicador refleja la calidad de la vivienda así como parte de las condiciones de vida de la comunidad. Un alto déficit cualitativo implica muchas familias viviendo en condiciones precarias, haciendo que sean más susceptibles al daño ante inundaciones.
Déficit cuantitativo de vivienda	Normalización invertida	Porcentaje	Terridata - DANE	Porcentaje de hogares que requieren una vivienda pero no la tienen. Este déficit cuantitativo indica escasez de viviendas adecuadas frente a la demanda poblacional. Valores altos sugieren presencia de familias sin vivienda propia o en situación de cohabitación indeseada, lo cual suele coincidir con hacinamiento y asentamientos informales.
Hacinamiento crítico	Normalización invertida	Porcentaje	DANE	Porcentaje de hogares con más de tres personas por cuarto en la vivienda. Este indicador tomado del DANE mide la superpoblación por vivienda, un factor ligado a la calidad de vida y a la exposición al riesgo. Un hacinamiento elevado implica

				que muchas personas compartirían espacios reducidos durante una inundación, dificultando su evacuación y aumentando el impacto por hogar afectado.
Dimensiones de capital social medidas por encuestas		Sin unidad		Autores recomiendan evaluar directamente componentes del capital social mediante cuestionarios estandarizados a la población. Chen [61] por ejemplo, demuestran que el capital social comunitario puede desagregarse en cinco dimensiones: cohesión social, eficacia colectiva, sentido de pertenencia, confianza/reciprocidad y control social informal, que se pueden sintetizar en un índice compuesto que explica significativamente la resiliencia comunitaria. Cada dimensión se puede medir presentando enunciados como “En mi barrio nos ayudamos mutuamente en caso de problemas”, lo cual permite evaluar la cohesión o “Creemos que unidos podemos lograr mejoras en la comunidad”, lo que permite evaluar la eficacia colectiva.
Preparación y capacidades de los hogares ante desastres		Sin unidad		La existencia de conductas de precaución y preparación a nivel familiar es considerada un indicador clave de la capacidad

				<p>sociocomunitaria. Abunyewah [62] evidencia que el capital social influye en la preparación doméstica al tener un plan familiar de emergencia, un kit de suministros, adecuaciones en la vivienda, seguros contra inundaciones, entre otros, y que esa preparación mediatiza la relación entre el capital social y la resiliencia observada. Por tanto, se sugiere monitorear la tasa de hogares preparados. Este indicador orienta las políticas de reducción del riesgo, como por ejemplo campañas para aumentar ese porcentaje y permite demostrar en cierta medida la conciencia de riesgo y proactividad comunitaria.</p>
Percepción de riesgo y autoeficacia colectiva				<p>Se sugiere incorporar mediciones de cómo percibe la comunidad la amenaza de inundaciones y qué tan capaz se cree para afrontarla. Hudson [63] encuentra correlaciones positivas entre el capital social y una mayor percepción de riesgo compartida, es decir que las redes sociales ayudan a difundir información y concientizar sobre la amenaza, así como una mayor autoeficacia colectiva e individual. Se recomiendan encuestas con preguntas</p>

				<p>como: “¿Cree que su comunidad está en riesgo de inundación?”, “¿Confía en que ustedes como vecinos pueden reducir el impacto de una inundación si trabajan juntos?”. El monitoreo de este indicador puede alertar sobre exceso de confianza o por el contrario un fatalismo que puede llegar a paralizar a la población.</p>
Participación comunitaria en gestión del riesgo				<p>Otro indicador sugerido es medir el grado de participación ciudadana relacionado con el riesgo de inundación. Por ejemplo: porcentaje de barrios con Comités Comunitarios de Emergencia activos, número de voluntarios en brigadas de rescate, frecuencia de reuniones comunitarias sobre prevención de inundaciones o tasa de asistencia a simulacros y talleres de preparación. Estos indicadores pueden obtenerse a través de registros locales o encuestas municipales. Un nivel alto de participación indica capital social activo y genera resiliencia ante desastres.</p>
Densidad y diversidad de organizaciones sociales locales				<p>La presencia de organizaciones de base como juntas de acción comunal, asociaciones de vecinos y ONGs locales es un indicador estructural del capital sociocomunitario. Un</p>

				<p>municipio podría medir, por ejemplo, el número de organizaciones comunitarias activas.</p>
Enlaces institucionales				<p>La literatura reciente pone énfasis en medir la calidad de los vínculos entre comunidad e instituciones en la gestión del riesgo. Algunos indicadores que se podrían medir son: la existencia de convenios o mesas de trabajo entre líderes comunitarios y autoridades de gestión del riesgo, el porcentaje de barrios integrados a sistemas de alerta temprana comunitarios o la frecuencia de actividades de mapeo participativo de riesgos. Shrestha [64] señala que cuando la comunidad participa en mapear las zonas inundables y reportar impactos, los sistemas de alerta temprana logran mayor penetración y eficacia y de tal forma se mejora notablemente el ciclo de recepción - comprensión - acción de los mensajes de alerta. Por ello, se sugiere monitorear si se realizan talleres participativos periódicos y si la comunidad tiene acceso a canales de información oficiales como boletines o aplicaciones y los utiliza.</p>

Tabla 6. Indicadores capacidad sociocomunitaria. Fuente: Elaboración propia

Es importante señalar que, si bien ninguno de los indicadores tomados de TerriData mide directamente aspectos intangibles como la confianza o la participación, todos inciden causalmente en la resiliencia comunitaria, pues comunidades con menor pobreza y analfabetismo y con mejores condiciones de vivienda tienden a organizarse mejor y sufrir menos pérdidas ante inundaciones. Estos indicadores permiten identificar brechas sociales que reducen la capacidad adaptativa comunitaria. Por tanto se mencionan indicadores adicionales que complementan las métricas socioeconómicas tradicionales, pues permiten a los tomadores de decisiones capturar de forma más cercana la resiliencia comunitaria, identificando fortalezas intangibles como la alta confianza, y el fuerte liderazgo local o debilidades escondidas tras los promedios como la baja percepción de riesgo a pesar de la alta exposición.

5.1.5.2 Umbrales de referencia

A diferencia de indicadores físicos como en la dimensión de hidrología dinámica con umbrales absolutos, en términos de lo social es preferible establecer umbrales relativos o comparativos.

- **Uso de terciles/cuartiles relativos:** se puede calcular un índice compuesto de capacidad sociocomunitaria agregando varios indicadores o dimensiones y luego clasificando los territorios en categorías relativas (bajo, medio, alto) según la distribución de los datos. Esto permite estandarizar los puntajes para ubicar cada unidad territorial en el tercil o cuartil correspondiente a nivel de comparación deseado.
- **Metas programáticas graduales:** Se pueden adoptar una meta a la cual se quiera llegar, basado en porcentajes deseables. Por ejemplo, Abunyewah [62] sugiere establecer metas de preparación familiar dado el vínculo demostrado entre capital social y adopción de medidas protectoras. Un municipio podría aspirar a que al menos cierto porcentaje de hogares tengan plan de emergencia y kit en cierto año, aumentando a un porcentaje más elevado en un mayor plazo. La idea es crear estándares que permitan revisar y ajustar la meta conforme mejora la cultura de prevención.
- **Umbrales para participación en alertas tempranas:** Dado que la eficacia de los sistemas de alerta depende en buena parte de la respuesta comunitaria, es útil fijar umbrales de desempeño social en este proceso. Por ejemplo: realizar al menos 2 simulacros al año en cada zona inundable con participación efectiva de más del 50% de los habitantes o que

durante eventos al menos 80% de la población expuesta reciba y comprenda la alerta y que al menos 50% ejecute acciones de protección. Estos umbrales sirven para identificar brechas pues si solo un porcentaje bajo de personas actúa tras la alerta hay un problema de confianza o comprensión a tener en cuenta.

5.1.5.3 Fuentes de datos

Para medir la capacidad sociocomunitaria es crucial apoyarse en fuentes de datos existentes, complementándolas con la recolección de nueva información cuando sea necesario. Algunas fuentes clave incluyen:

- **TerriData (DNP):** Como ya se mencionó, TerriData recopila numerosos indicadores territoriales estandarizados para Colombia. Varios de los indicadores socioeconómicos y de vulnerabilidad utilizados (IPM, analfabetismo, vivienda, etc.) provienen de esta plataforma oficial.
- **DANE:** Es la principal fuente de datos demográficos y socioeconómicos. A través de censos de población y vivienda, encuestas de calidad de vida, de educación y salud, provee insumos como tasas de alfabetización, pobreza monetaria y estratificación socioeconómica que pueden alimentar indicadores de esta dimensión.
- **IDEAM y SAT:** El IDEAM genera boletines y alertas tempranas sobre crecientes súbitas, lluvias extremas e inundaciones a nivel nacional. La información de los SAT sirve para evaluar la exposición en tiempo real y la reacción de la comunidad.
- **Registros administrativos locales:** Dependiendo del municipio, pueden existir fuentes valiosas como actas de comités locales de gestión del riesgo, listados de organismos de ayuda voluntaria, reportes de proyectos de obras mitigadoras o juntas de acción comunal registradas en la alcaldía.
- **Encuestas y trabajo de campo estructurado:** Cuando se requiere información que ninguna fuente existente ofrece, como el nivel de confianza entre vecinos o los porcentaje de hogares con plan de emergencia, es necesario planear recolecciones de datos por medio de encuestas.

- **Registros participativos y comunitarios:** Es de gran ayuda e importancia la información generada por la propia comunidad a partir de sistemas de información local o reportes ciudadanos.

5.1.5.4 Herramientas metodológicas

- **Encuestas estructuradas de capital social y resiliencia:** Las encuestas son la principal metodología de medición de indicadores cualitativos, por eso se sugiere diseñar una encuesta corta, aplicada a hogares y organizaciones comunitarias, que indague las dimensiones antes mencionadas (cohesión, confianza/reciprocidad, eficacia colectiva, sentido de pertenencia, control social informal) mediante respuestas de acuerdo o desacuerdo. Adicionalmente, la encuesta debe incorporar preguntas sobre comportamientos de preparación como: ¿tiene plan de emergencia?, ¿kit de inundación?, ¿ha hecho simulacro en su hogar?, sobre percepción/autoeficacia: ¿cree que su barrio puede enfrentar una inundación?, ¿confía en las instituciones?). Estas encuestas se pueden repetir anualmente para ver la evolución en el tiempo.
- **Evaluación del desempeño social de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT):** Consiste en implementar un sencillo registro post alerta enfocado en el ciclo recepción - comprensión - acción. Tras un simulacro o una alerta real de inundación, se pregunta a una muestra de hogares, por ejemplo: “¿Recibió usted el mensaje de alerta?”, “¿Lo entendió claramente?”, “¿Tomó alguna acción? ¿Cuál? y “¿En cuánto tiempo reaccionó?”. Esta herramienta de monitoreo traduce el capital social en conductas observables ya que una fuerte cohesión y confianza debería reflejarse en más gente respondiendo adecuadamente a la alerta. A su vez, las respuestas obtenidas permiten identificar fallas específicas, por ejemplo, si la recepción es baja puede significar que hay un problema en los canales de difusión o si la comprensión falla, quiere decir que tal vez el mensaje no era claro para el nivel educativo promedio en dicho sitio o si muchos reciben la información, pero no actúan, podría significar apatía o que las personas no saben cómo actuar. Este seguimiento puede realizarse con breves entrevistas in situ después del evento por medio de mensaje de texto.
- **Mapeo participativo de impactos y recursos:** la idea es dibujar o marcar sobre un mapa del territorio la información local clave: zonas que se inundan frecuentemente, rutas de

evacuación conocidas, sitios seguros o altos, puntos críticos como colegios, centros de salud en áreas de riesgo y también la ubicación de sedes de juntas de acción comunal, iglesias u otros refugios. Esta actividad no solo produce un mapa útil para planificación sino que el proceso mismo genera discusión y aprendizaje comunitario pues permite que los vecinos compartan experiencias de inundaciones pasadas, identificando barreras en el territorio y proponiendo soluciones locales.

- **Mapa de actores y redes:** permite visualizar las conexiones de la comunidad con los principales actores con los que se relaciona en temas relevantes como salud, educación, empresa de acueducto, alcaldía, defensa civil, ONG ambiental u otros barrios vecinos. Luego, los participantes trazan líneas desde la comunidad hacia cada actor con quien existe algún tipo de cooperación, apoyo o intercambio de información. El resultado es un mapa de redes local, que al contar las conexiones y analizar su diversidad se obtiene un indicador rápido de la capacidad de coordinación de la comunidad y de los vacíos donde faltan enlaces institucionales. El mapa de actores se convierte así en una ruta para fortalecer la red comunitaria.
- **Sistematización y documentación:** Todas las actividades anteriores generan información que debe ser guardada y analizada. Es fundamental implementar mecanismos de registro para mantener las actas de reuniones y talleres, listas de asistencia, fotografías, copias de mensajes de alerta enviados, acuerdos firmados, etc. Esta evidencia documental permite dar seguimiento a los avances en el tiempo y que luego se puedan cruzar los datos obtenidos para obtener una visión más completa.

5.1.6 Inteligencia y Datos

Este indicador evalúa la capacidad del territorio para producir, compartir y usar información relevante y oportuna para prevenir, prepararse y responder a inundaciones. Se enfoca en conocer si el flujo informacional es oportuno, abierto, confiable y efectivamente usado por instituciones y comunidad. Se puede evaluar u observar si un ecosistema de datos es aceptable y completo si presenta una clara gobernanza de los datos, así como disponibilidad y si la información se utiliza para el mejoramiento de la decisiones públicas y comunitarias [65]. En el contexto de gestión de inundaciones, una base informativa “sana” combina fuentes abiertas y oficiales (teledetección,

estaciones, catálogos abiertos) con canales de difusión claros, de esa forma la información circula a tiempo y es reutilizable [59] [66].

5.1.6.1 Indicadores

Para cuantificar esta dimensión, se emplea un conjunto de indicadores medibles que cubren tanto la dimensión de riesgo como la de capacidades tecnológicas del territorio. Los primeros dos fueron tomados de TerriData y el DANE, mientras que los otros se mencionan como sugerencia para complementar las métricas de evaluación.

Indicador	Forma de integración	Unidad	Fuente	Descripción
Eventos de desastres acumulados	Normalización invertida	Eventos	Terridata - DNP	Número total de eventos de desastre registrados históricamente en el municipio. Este indicador contextualiza la exposición histórica y la necesidad de datos para esos eventos.
Penetración de internet fijo municipal	Normalización	Porcentaje	Datos abiertos Colombia	Porcentaje de hogares con acceso a internet de banda ancha fija en el municipio. Una mayor conectividad favorece la distribución y uso de alertas y datos en línea.
Cobertura de monitoreo y alertas				Presencia de estaciones hidrometeorológicas operativas, sensores IoT y sistemas de alerta temprana.
Disponibilidad y apertura de datos públicos				Cantidad y calidad de conjuntos de datos abiertos relevantes como mapas de amenaza, registros de emergencias y planes de riesgo disponibles para la comunidad. Se

				evalúa si el municipio publica datos con metadatos adecuados y licencias abiertas. Una mayor oferta de datos abiertos y documentados refleja mejor capacidad informacional.
--	--	--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 7. Indicadores inteligencia y datos. Fuente: Elaboración propia

5.1.6.2 Umbrales de referencia

En lugar de umbrales numéricos fijos, proponemos tres niveles de madurez que son flexibles para que cada municipio pueda aterrizar a su realidad:

- **Básico:** La información existe, pero está fragmentada o poco accesible. Por ejemplo, pdfs sin metadatos o publicaciones irregulares. Hay dependencia de pocos canales de difusión de la información y escasa trazabilidad.
- **Intermedio:** La información se publica periódicamente en formatos accesibles. Por ejemplo, existen boletines oficiales frecuentes o conjuntos de datos en el portal nacional de datos abiertos. Ya se cuenta con al menos un tablero o informe consolidado de indicadores para uso del ciudadano.
- **Avanzado:** El flujo de datos es casi en tiempo real para variables críticas como lluvias, niveles de río u otras alertas. Se dispone de datos abiertos con servicios interoperables, metadatos completos y uso sostenido de la información en sistemas de alerta temprana. Además, existe una gobernanza de datos clara con roles definidos para gestionar la información. Este nivel de madurez representa un ecosistema donde el dato genera valor social.

5.1.6.3 Fuentes de datos

Para evaluar este indicador, se puede apoyar en una variedad de fuentes de información que abarcan desde datos oficiales nacionales hasta insumos comunitarios e información global. Entre las principales fuentes se destacan:

- **Institutos nacionales:** En Colombia, el IDEAM provee boletines y alertas hidrológicas e hidrometeorológicas que sirven de referencia central sobre lluvias, caudales y pronósticos. Estos boletines periódicos son fundamentales para medir la oportunidad de la información

y alimentan tanto a las autoridades locales como a los sistemas de alerta nacionales. Así mismo, se tienen páginas como Datos Abiertos, Colombia en Mapas, el DANE, que también presentan sus datos al público.

- **Observación de la Tierra y datos globales:** Para complementar vacíos locales, se recurre a fuentes de teledetección satelital y datos globales de libre acceso. Estos permiten obtener imágenes de radar de alta resolución útiles para mapear inundaciones aún bajo cobertura de nubes.
- **Otras fuentes locales y comunitarias:** Registros históricos municipales como inventarios de eventos pasados, publicaciones en periódicos y el conocimiento de la comunidad aporta también datos cualitativos y cuantitativos. Aunque pueden ser menos formales, estos datos permiten dar un contexto y enriquecen la inteligencia colectiva sobre el riesgo y pueden incorporarse a los sistemas de información geográfica locales.

5.1.6.4 Herramientas metodológicas

Para fortalecer este indicador y guiar su mejora, se proponen varias herramientas metodológicas basadas en buenas prácticas de gestión de datos:

- **Inventario y mapeo de flujo de datos:** se puede realizar un inventario rápido de las fuentes de información existentes y un diagrama de flujo que muestre cómo los datos se generan, transforman y difunden. Algunas preguntas clave pueden ser: ¿qué datos existen y quién los produce?, ¿con qué frecuencia se actualizan y en qué formato?, ¿cómo llegan esos datos a los sistemas de alerta o tableros municipales? Además, representar gráficamente el flujo ayuda a detectar datos críticos ausentes y oportunidades de mejora en la circulación de la información.
- **Diagnóstico de apertura e interoperabilidad:** Con base en el Manual de Gobierno Digital, se debe evaluar qué tan abiertos e integrables son los datos actuales. Se debe verificar la accesibilidad pública de la información, la presencia de metadatos completos, la existencia de una licencia de uso clara y el uso de formatos abiertos. Este diagnóstico revela si el ecosistema de datos cumple con la calidad necesaria y si es fácil su reutilización por terceros.

- **Establecer mecanismos de gobernanza de datos locales:** como comités o responsables que supervisen la calidad de la información así como protocolos para actualizarla regularmente. También se pueden aprovechar capacitaciones para el entendimiento de datos de funcionarios y comunidades, de modo que sepan interpretar y usar la información disponible.

5.2 Capítulo 2: Criterios para determinar la conveniencia de estrategias

La gestión integral del agua en contextos urbanos y periurbanos se enfrenta actualmente a un escenario caracterizado por incertidumbre climática, acelerada urbanización, creciente presión demográfica y deterioro ambiental. El cambio climático ha venido intensificando fenómenos como inundaciones, sequías prolongadas, tormentas torrenciales que afectan en particular a las ciudades debido a su densidad poblacional, impermeabilización del suelo y la exposición de infraestructuras críticas [1]A ello se le suma el crecimiento no planificado de la periferia urbana que aumenta la vulnerabilidad en áreas con escasa provisión de servicios básicos y altos niveles de informalidad [67].

Los indicadores, sus respectivos umbrales, las herramientas metodológicas para su implementación se abarcaron en el capítulo 1, donde se evaluaron las 6 dimensiones, conformando así un sistema que permite evaluar riesgos y oportunidades con un alto nivel de precisión. Lo anterior permite proceder a aplicar dichos parámetros al análisis de la conveniencia relativa de distintas estrategias de gestión con el fin de obtener un marco analítico más robusto para la planificación hídrica.

En este marco, la literatura internacional reconoce cuatro grandes enfoques estratégicos:

1. Estrategias grises, centradas en infraestructuras de ingeniería convencional como diques, embalses, canales o drenajes que históricamente han constituido la primera respuesta frente a inundaciones y sequías [68]. Su criterio central de conveniencia es la seguridad hidráulica inmediata, evaluada mediante métricas como caudales de diseño, periodos de retorno o tiempo de evacuación de aguas.
2. Estrategias verdes o soluciones basadas en la naturaleza (SbN), como humedales, jardines de lluvia, techos verdes para gestionar el agua al tiempo que generan cobeneficios ambientales y sociales [69]. Su conveniencia se define por métricas de infiltración, retención, provisión de servicios ecosistémicos y mejora de la resiliencia urbana.

3. Estrategias híbridas, que integran elementos grises y verdes en un mismo sistema, combinando la robustez hidráulica con la multifuncionalidad ecosistémica [70]. Sus criterios de conveniencia responden a balances costo-beneficio y a la capacidad de cumplir simultáneamente umbrales de seguridad y sostenibilidad.
4. Estrategias socio-institucionales, que incluyen marcos normativos, esquemas de gobernanza, participación comunitaria y mecanismos de financiamiento [71]. Son las que permiten garantizar la legitimidad, continuidad y escalabilidad de las demás estrategias. Sus criterios de conveniencia están vinculados a métricas de gobernanza, cohesión social y capacidad institucional, definidos también en el capítulo anterior.

La selección de la estrategia más adecuada depende entonces de un conjunto de criterios de conveniencia que integran:

- la capacidad de cumplir umbrales técnicos de desempeño, como caudales máximos admisibles, reducción de tiempo de evacuación, porcentaje de infiltración;
- la viabilidad económica y financiera como los costos de inversión, operación y mantenimiento;
- los impactos ambientales y territoriales como la conservación de ecosistemas y compatibilidad con el ordenamiento territorial;
- la aceptación social y legitimidad institucional en términos de gobernanza y participación comunitaria.

En las siguientes secciones de este capítulo, se explicará cada una de las estrategias, haciendo mención a los criterios para evaluar la conveniencia de aplicar dicha estrategia, así como casos internacionales donde se evidencia su aplicabilidad.

5.2.1 Estrategias grises

Las estrategias grises constituyen la estrategia tradicional de la gestión del agua en entornos urbanos y rurales. Estas se basan en infraestructuras construidas de gran escala como diques, canales, alcantarillados y estaciones de bombeo que buscan controlar, almacenar, desviar o evacuar los flujos de agua con un enfoque principalmente ingenieril [68]. Estas infraestructuras han permitido durante décadas proteger asentamientos humanos, sostener el crecimiento urbano industrial y garantizar condiciones mínimas de salubridad.

Sin embargo, teniendo en cuenta los retos actuales del cambio climático, la urbanización acelerada y la degradación ambiental, se ha venido cuestionando su sostenibilidad a largo plazo[72]. Los sistemas grises presentan limitaciones como los altos costos de construcción y mantenimiento, los impactos negativos sobre los ecosistemas, la rigidez frente a escenarios de incertidumbre climática y la dependencia de capacidades institucionales fuertes para su operación.

La conveniencia de optar por estrategias grises depende de criterios específicos:

- Eficiencia hidráulica: capacidad de manejar caudales extremos, proteger contra inundaciones y mantener la funcionalidad urbana.
- Viabilidad económica: costo de inversión inicial y de operación a largo plazo.
- Durabilidad técnica: vida útil de la infraestructura frente a procesos de desgaste y riesgos sísmicos o hidrometeorológicos.
- Impactos ambientales: alteración de cursos de agua, pérdida de hábitats, incremento de contaminación.
- Aceptación y necesidad social: urgencia de proteger vidas humanas y activos en territorios vulnerables.
- Capacidad institucional: marcos regulatorios, financiamiento y mantenimiento.

Metodológicamente, la planificación y evaluación de infraestructuras grises se realiza con base en herramientas como:

- Modelación hidráulica e hidrológica (HEC-RAS, SWMM, MIKE11).
- Análisis de riesgo probabilístico para estimar periodos de retorno de eventos extremos.
- Análisis costo-beneficio y optimización multiobjetivo para evaluar alternativas.
- Sistemas de información geográfica (SIG) para modelar zonas de inundación.

A continuación, se presentan cuatro estudios que ilustran cómo la conveniencia de las estrategias grises se fundamenta en la aplicación de estos criterios y herramientas metodológicas.

5.2.1.1 El sistema de diques del Delta Works en los Países Bajos

El estudio de Van Koningsveld analiza el desarrollo del Delta Works, un megaproyecto de defensa costera implementado en los Países Bajos tras las inundaciones de 1953. Se trata de una de las

infraestructuras grises más reconocidas a nivel mundial, concebida para garantizar la seguridad nacional frente a marejadas extremas y el aumento del nivel del mar [73].

Tras la catástrofe de 1953, que provocó más de 1.800 muertes y la inundación de 165.000 hectáreas, el país reconoció la necesidad de una estrategia integral. El criterio de conveniencia fue explícito: establecer un umbral de seguridad de 1/10.000 años de periodo de retorno, muy superior al de otras naciones.

Metodológicamente, el estudio describe el uso de modelaciones hidráulicas avanzadas, curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), análisis probabilístico del riesgo y evaluaciones costo-beneficio. Los resultados muestran una notable reducción del riesgo de inundación, lo que permitió expandir la urbanización y consolidar la seguridad hídrica como pilar del desarrollo económico. No obstante, señalan que el sistema alteró ecosistemas estuarinos y redujo la biodiversidad, lo que derivó en programas de compensación ambiental.

En síntesis, este caso demuestra que los diques y barreras móviles son convenientes cuando el riesgo compromete la seguridad nacional, aunque su sostenibilidad exige la integración de criterios ambientales y sociales.

En conclusión, los sistemas de drenaje profundo son convenientes en megaciudades con subsidencia severa y riesgo sanitario crítico, aunque plantean desafíos económicos y ambientales.

5.2.1.2 Sistemas de alcantarillado en Porto Alegre, Brasil

El estudio realizado en Porto Alegre, Brasil[74], documenta la evolución de los sistemas de alcantarillado pluvial en Porto Alegre, diseñados como respuesta a las inundaciones urbanas recurrentes en la cuenca del río Guaíba. Estos sistemas constituyen una referencia en América Latina para comprender cómo las infraestructuras grises urbanas buscan reducir vulnerabilidades sociales.

El criterio de conveniencia fue reducir la exposición de poblaciones urbanas densamente asentadas a lluvias intensas. Para ello, se estableció como parámetro de diseño la evacuación del agua acumulada en 2 horas y más durante tormentas con periodo de retorno de 10 años.

Metodológicamente, el caso se sustentó en modelaciones hidrológicas, planes maestros de drenaje urbano y análisis de capacidad de conducción. Los resultados iniciales mostraron un descenso en la frecuencia de inundaciones críticas. Sin embargo, el sistema evidenció limitaciones por la falta de mantenimiento regular y la expansión urbana no planificada, lo que redujo progresivamente su efectividad.

En este caso, se concluye que los alcantarillados pluviales son convenientes en ciudades densamente urbanizadas con alta exposición social, siempre que exista capacidad institucional para sostener el mantenimiento.

5.2.1.3 Estaciones de bombeo en Nueva Orleans, Estados Unidos

El estudio en Nueva Orleans, EUA [75] analizó la reestructuración del sistema hidráulico de Nueva Orleans tras el huracán Katrina en 2005. El colapso de los diques y la insuficiencia de las estaciones de bombeo causó la inundación del 80% de la ciudad y más de 1.800 muertes, lo que evidenció las debilidades de la infraestructura gris existente.

El criterio de conveniencia fue la protección de vidas y activos urbanos en contextos de riesgo extremo, a través del refuerzo de diques y la ampliación de estaciones de bombeo. El programa *Hurricane and Storm Damage Risk Reduction System* (HSDRRS) incluyó infraestructuras capaces de evacuar millones de m³/día frente a huracanes categoría 5.

Metodológicamente, se aplicaron simulaciones hidrodinámicas, modelación probabilística de escenarios de huracanes y monitoreo en tiempo real. Los resultados mejoraron la resiliencia urbana, aunque la dependencia energética y los altos costos de mantenimiento plantean dudas sobre su sostenibilidad.

Este caso ilustra que las estaciones de bombeo combinadas con diques son convenientes en territorios expuestos a ciclones extremos, aunque requieren una gobernanza sólida y diversificación de estrategias.

5.2.1.4 El sistema de drenaje profundo de Tokio, Japón

El estudio analizó el diseño e implementación del sistema de drenaje profundo de Tokio y otro estudio posterior examinó el *Metropolitan Area Outer Underground Discharge Channel*

(MAOUDC) en Tokio [76], considerado uno de los proyectos de infraestructura gris más ambiciosos del mundo. Inaugurado en 2006, el sistema fue diseñado para proteger la metrópolis frente a inundaciones recurrentes causadas por lluvias torrenciales, tifones y crecidas de los ríos Naka, Kuramatsu y otros afluentes. La infraestructura consiste en un túnel principal de 6,3 km de longitud y 10,6 metros de diámetro, conectado a cinco silos verticales de 70 metros de profundidad, con capacidad de almacenar y desviar hasta 200 m³/s de caudal hacia el río Edo [77].

El criterio de conveniencia fue reducir la vulnerabilidad de más de 30 millones de habitantes en el área metropolitana de Tokio frente a eventos extremos de precipitación, cuya frecuencia se intensificó a lo largo del siglo XX. La necesidad de garantizar la seguridad urbana, la continuidad de servicios críticos y la protección de activos económicos justificó la elección de una solución gris de gran escala.

Metodológicamente, la planificación y operación del sistema se apoyaron en modelaciones hidrológicas e hidráulicas avanzadas, análisis de riesgo probabilístico con escenarios de recurrencia de hasta 1/200 años y estudios de impacto económico. Además, se aplicaron herramientas de simulación para optimizar la capacidad de bombeo y minimizar el riesgo de sobrecarga en eventos extremos.

Los resultados muestran que, desde su entrada en operación, el MAOUDC ha permitido mitigar inundaciones urbanas severas y reducir pérdidas económicas estimadas en miles de millones de dólares. Asimismo, el sistema ha servido como referencia internacional en el diseño de obras subterráneas de drenaje masivo. Sin embargo, los estudios también señalan limitaciones importantes: los altos costos de construcción (superiores a 2.000 millones de dólares) y mantenimiento, la dependencia energética del bombeo y la rigidez frente a escenarios climáticos que podrían superar su capacidad en el futuro.

En síntesis, los dos casos de Tokio [76], [77] demuestran que las infraestructuras grises de gran escala son convenientes en contextos urbanos densamente poblados donde el riesgo hídrico amenaza la seguridad nacional, aunque su sostenibilidad exige complementar la obra con políticas de eficiencia energética y con estrategias verdes e híbridas que aporten resiliencia adicional.

5.2.1.5 Discusión comparativa

Los cuatro casos presentados muestran que la conveniencia de las estrategias grises se fundamenta en criterios que varían según el contexto territorial, social y económico. En los Países Bajos, el Delta Works fue concebido bajo un criterio de seguridad nacional, estableciendo umbrales de protección extremadamente elevados (1/10.000 años) como respuesta a la inundación catastrófica de 1953[73]. En Porto Alegre, Brasil, la construcción de sistemas de alcantarillado pluvial se justificó principalmente por criterios de urgencia social, al mitigar inundaciones que afectaban directamente a poblaciones vulnerables en áreas densamente urbanizadas [74]. En Nueva Orleans, USA, tras el huracán Katrina, el refuerzo de diques y la ampliación de estaciones de bombeo se basó en un criterio de protección de vidas humanas y activos estratégicos, en un contexto de riesgo extremo ante huracanes de categoría 5[75]. Finalmente, en Tokio, Japón, el sistema de drenaje profundo MAOUDC se construyó con base en un criterio de seguridad urbana y continuidad económica, protegiendo a una metrópolis de más de 30 millones de habitantes frente a lluvias torrenciales, tifones y crecidas de ríos [76], [77].

La comparación evidencia que, aunque los contextos son distintos, las estrategias grises comparten una característica: se implementan cuando los riesgos hídricos superan los umbrales aceptables de seguridad definidos por métricas hidrológicas, sociales o económicas. Asimismo, muestran que la eficiencia hidráulica y la durabilidad técnica suelen ser los criterios dominantes, mientras que los impactos ambientales y los altos costos a largo plazo son limitaciones recurrentes.

En términos metodológicos, todos los casos se apoyaron en modelaciones hidráulicas avanzadas, análisis probabilísticos de riesgo y evaluaciones costo-beneficio, confirmando la importancia de enfoques cuantitativos rigurosos en la planificación de infraestructura gris. No obstante, también revelan un patrón de rigidez estructural y dependencia energética, lo que cuestiona su sostenibilidad bajo escenarios de cambio climático.

Todos los ejemplos anteriormente mencionados demuestran que las infraestructuras grises son convenientes en contextos donde la protección inmediata de la población y la economía es prioritaria, pero su permanencia a largo plazo requiere ser complementada con estrategias verdes, híbridas o socio-institucionales que aporten flexibilidad y resiliencia.

Estrategias Grises - Criterios de uso		
Autores	Estrategia	Criterios de uso
[73] Van Koningsveld et al.	Sistema de diques	Conveniente aplicar diques y barreras móviles cuando el riesgo de inundación compromete la seguridad nacional y se requiere protección frente a marejadas extremas y aumento del nivel del mar. Adecuado para contextos donde se dispone de capacidad técnica y financiera para garantizar altos estándares de seguridad (1/10.000 años de periodo de retorno).
[74] Tucci	Sistemas de alcantarillado pluvial	Conveniente implementar sistemas de alcantarillado pluvial en ciudades densamente urbanizadas con alta exposición social, orientados a reducir vulnerabilidades frente a lluvias intensas. Su efectividad depende de una gestión institucional sólida y mantenimiento continuo.
[75] R. W. Kates, C. E. Colten	Estaciones de bombeo y refuerzo de diques	Conveniente aplicar estaciones de bombeo combinadas con diques en contextos de huracanes extremos y alta exposición urbana, donde se requiere evacuación masiva de caudales. Recomendable cuando existen recursos energéticos y capacidades de gestión para sostener operaciones de emergencia.
[76], [77] H. Nakamura. H. Takagi	Sistema de drenaje profundo	Conveniente aplicar túneles y sistemas subterráneos de drenaje de gran escala en megaciudades con alta densidad poblacional y riesgo hídrico crítico. Apropiado para proteger infraestructuras críticas y reducir pérdidas económicas, aunque con altos costos de inversión y dependencia energética.

Tabla 8. Criterios de uso - Estrategias grises. Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Estrategias verdes

Las estrategias verdes, también conocidas como soluciones basadas en la naturaleza (SbN), han emergido en las últimas dos décadas como una alternativa a la infraestructura gris convencional. Se fundamentan en la utilización, restauración o imitación de procesos ecosistémicos para gestionar los recursos hídricos, mitigar riesgos de inundación y mejorar la resiliencia climática de las ciudades [78]. A diferencia de los enfoques tradicionales, las infraestructuras verdes ofrecen beneficios múltiples que combinan la regulación hidrológica con la conservación de la biodiversidad y la mejora del bienestar humano.

En el contexto del cambio climático, las SbN se han consolidado en la agenda internacional de la ON [79] U al demostrar su capacidad para proporcionar soluciones costo-eficientes y sostenibles, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas y en regiones donde la infraestructura gris resulta insuficiente o insostenible.

La conveniencia de optar por estrategias verdes depende de criterios específicos:

- Capacidad de retención y regulación hídrica: infiltración de aguas pluviales, reducción de caudales pico, recarga de acuíferos.
- Beneficios ecosistémicos: conservación de hábitats, mejora de la biodiversidad y conectividad ecológica.
- Co-beneficios climáticos: reducción de islas de calor urbano y mejora de la calidad del aire
- Viabilidad económica y social: costos reducidos de implementación y mantenimiento en comparación con grandes obras grises, aceptación ciudadana elevada por sus beneficios visibles.
- Flexibilidad y adaptabilidad: capacidad de responder a escenarios de incertidumbre climática mediante soluciones modulares y replicables.
- Metodológicamente, la planificación y evaluación de estrategias verdes se apoya en:
- Modelación hidrológica y climática (SWMM, InVEST, MIKE SHE) para simular caudales y efectos de infiltración.
- Métricas ecosistémicas y de servicios ambientales (biodiversidad, cobertura vegetal, evapotranspiración).
- Análisis multicriterio (AMC) para ponderar beneficios ambientales, sociales y económicos.
- SIG y teledetección para identificar áreas prioritarias de implementación.
- A continuación, se presentan cuatro experiencias internacionales que ilustran la aplicación de estrategias verdes bajo estos criterios.

5.2.1.6 Cubiertas verdes en Milán, Italia

El estudio analizó el desempeño de cubiertas verdes como medida de gestión pluvial en Milán. Este es un caso paradigmático en ciudades densamente urbanizadas, donde la impermeabilización del suelo agrava las inundaciones urbanas y el efecto de isla de calor. El criterio de conveniencia consistió en reducir y retrasar los picos de escorrentía en tormentas moderadas, además de mejorar el confort térmico urbano. La metodología incluyó simulaciones probabilísticas del rendimiento hidráulico, modelaciones del retardo de escorrentía y evaluaciones de costo-eficiencia en distintos escenarios de precipitación. Los resultados indicaron que las cubiertas verdes pueden reducir significativamente el volumen de escorrentía en eventos de baja y media intensidad, además de retrasar el tiempo de concentración en el sistema de alcantarillado. El estudio concluye que son

estrategias convenientes en centros urbanos compactos, aunque requieren mantenimiento continuo y políticas de incentivo fiscal para favorecer su implementación masiva [80].

5.2.1.7 Cubiertas verdes con recolección de agua pluvial en Lisboa, Portugal

El estudio evaluó la hidrología de cubiertas verdes en Lisboa, Portugal, dentro de un clima mediterráneo. Este es un caso relevante para ciudades densamente urbanizadas donde la impermeabilización del suelo agrava tanto las inundaciones urbanas como el efecto de isla de calor. El criterio de conveniencia consistió en reducir la escorrentía superficial y mejorar la gestión pluvial mediante soluciones verdes. La metodología incluía simulaciones de eventos de precipitación artificial, análisis de retención del agua de lluvia, retraso del caudal de salida y atenuación de picos de escorrentía. Los resultados mostraron que las cubiertas verdes pueden retener entre 37 % y 100 % del agua de lluvia por evento con un promedio cercano al 81 % y con retrasos en el tiempo de concentración del orden de 2 a 18 min. El estudio concluyó que estas estrategias pueden contribuir de forma eficiente a la gestión de aguas pluviales en estructuras urbanas compactas, aunque subraya que su implementación requiere mantenimiento, políticas de incentivo y una integración adecuada [81].

5.2.1.8 Prácticas LID en Guangxi, China

El estudio examinó la aplicación de prácticas de *Low Impact Development* (LID) en Guangxi, una de las regiones piloto del programa *Sponge City* en China. Las intervenciones incluyeron bioretención, pavimentos permeables y áreas verdes diseñadas para infiltrar y almacenar agua de lluvia. El criterio de conveniencia consistió en gestionar lluvias intensas en un contexto de urbanización acelerada, donde los sistemas de drenaje convencional resultaban insuficientes. La metodología se basó en modelaciones hidrológicas con el software SWMM, análisis de reducción de escorrentía anual y simulaciones de capacidad de infiltración en distintos tipos de suelo urbano. Los resultados evidenciaron que las prácticas LID lograron reducir hasta aproximadamente un 75% del volumen anual de escorrentía y mejorar la calidad del agua urbana al filtrar contaminantes. El estudio explica que la efectividad depende de la integración de distintas tipologías y de una gestión institucional sólida que garantice su mantenimiento[82].

5.2.1.9 Integración de soluciones basadas en la naturaleza en Seúl, Corea del Sur

En Seúl, Corea del Sur se implementaron cubiertas verdes (*green roofs*) en áreas altamente urbanizadas como estrategia para la gestión de aguas pluviales. Las intervenciones consistieron en la instalación de techos verdes diseñados para retener agua de lluvia y retrasar los picos de escorrentía. El criterio de conveniencia fue mitigar inundaciones locales y reducir la presión sobre los sistemas de drenaje convencional en un contexto de alta densidad urbana. La metodología aplicada se basó en monitoreo hidrológico de eventos de lluvia y análisis del volumen de escorrentía superficial generado en los techos verdes. Los resultados evidenciaron que las cubiertas verdes lograron reducir entre aproximadamente un 10 % y un 60 % del volumen de escorrentía, dependiendo de la intensidad y duración de la precipitación, demostrando su efectividad como solución verde para la gestión urbana de aguas pluviales. El estudio explica que la efectividad depende del diseño adecuado de las cubiertas y del mantenimiento regular. [83].

5.2.1.10 Discusión comparativa

Los cuatro casos analizados muestran que la conveniencia de las estrategias verdes depende en gran medida de las condiciones climáticas, la densidad urbana y la capacidad institucional de cada territorio. En Milán (Italia), las cubiertas verdes se adoptaron como respuesta a la creciente impermeabilización del suelo y al aumento del efecto de isla de calor, priorizando criterios de eficiencia hidráulica y de mejora del confort térmico en entornos urbanos densos [80] muestran que las cubiertas verdes son particularmente útiles en entornos urbanos densos, donde la disponibilidad de espacio libre es limitada y se requiere mitigar tanto la escorrentía como la isla de calor urbano. En Lisboa [81], la implementación de cubiertas verdes con sistemas de recolección de agua pluvial respondió a un criterio de optimización hídrica en un clima mediterráneo caracterizado por precipitaciones irregulares, donde las estrategias de retención y reutilización del agua adquieren especial relevancia

El caso de Guangxi en China las prácticas de *Low Impact Development* (LID) se orientaron hacia la gestión integral de lluvias intensas en un contexto de urbanización acelerada, destacando la importancia de integrar múltiples tipologías verdes dentro de marcos de gobernanza sólidos y coordinados [82]. Finalmente, en el caso de Seúl, Corea del Sur las cubiertas verdes se

implementaron con el propósito de mitigar inundaciones locales y reducir la presión sobre los sistemas de drenaje urbano, en una ciudad altamente urbanizada y con elevada exposición social [83].

La comparación entre estos casos evidencia que, pese a las diferencias climáticas, topográficas e institucionales, las estrategias verdes comparten una serie de rasgos comunes. En primer lugar, buscan reducir la escorrentía superficial y retrasar los picos de caudal, disminuyendo así la carga sobre la infraestructura gris existente. En segundo lugar, promueven beneficios ecosistémicos y térmicos adicionales, contribuyendo a mejorar la habitabilidad y la resiliencia de los entornos urbanos. No obstante, su efectividad a largo plazo depende de la existencia de políticas de mantenimiento continuo, incentivos institucionales y un diseño técnico adecuado, factores que condicionan su sostenibilidad operativa.

Asimismo, los resultados de los estudios revisados demuestran que las estrategias verdes tienden a ser más eficaces en la gestión de eventos de precipitación de baja y media intensidad, mientras que su capacidad de respuesta ante lluvias extremas sigue siendo limitada si no se complementan con infraestructuras grises o enfoques híbridos. Desde el punto de vista metodológico, todos los estudios emplearon modelaciones hidrológicas, simulaciones de escorrentía y análisis de costo-eficiencia, lo que confirma la relevancia de incorporar herramientas técnico-científicas rigurosas en su planificación y diseño.

En conjunto, los casos de Italia, Portugal, China y Corea del Sur ponen de manifiesto que las estrategias verdes representan una alternativa viable y sostenible para la gestión de aguas pluviales en entornos urbanos densamente poblados. Estas soluciones aportan flexibilidad, resiliencia y beneficios ambientales adicionales, pero su efectividad y permanencia dependen, en última instancia, de su integración en marcos institucionales robustos, de la continuidad del mantenimiento y de su articulación con estrategias híbridas capaces de afrontar de manera más eficaz los crecientes desafíos asociados a la variabilidad climática y a la urbanización intensiva.

Estrategias verdes – Criterios de Uso

Autores	Estrategia	Criterios de uso
---------	------------	------------------

[80] A. Raimondi et al.	Cubiertas verdes extensivas	Conveniente implementar cubiertas verdes en zonas densamente urbanizadas con alta impermeabilización del suelo y presencia del efecto isla de calor, priorizando la retención de escorrentía y la mejora del confort térmico.
[81] M. L. Santos et al.	Cubiertas verdes con recolección pluvial	Conveniente aplicar cubiertas verdes con sistemas de captación y almacenamiento de agua pluvial en climas mediterráneos con precipitaciones irregulares, orientadas a optimizar la retención y reutilización hídrica.
[82] Li et al.	Desarrollo urbano de bajo impacto (LID)	Conveniente implementar prácticas de desarrollo urbano de bajo impacto (LID) en ciudades en rápida expansión, expuestas a lluvias intensas, donde se busca integrar múltiples tipologías verdes bajo marcos de gobernanza sólidos.
[83] M. Shafique et al.	Cubiertas verdes multifuncionales	Conveniente aplicar cubiertas verdes en áreas altamente urbanizadas y expuestas a inundaciones locales, con el fin de reducir la presión sobre los sistemas de drenaje y generar co-beneficios ambientales y sociales.

Tabla 9. Criterios de uso - Estrategias verdes. Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Estrategias Híbridas

A diferencia de las estrategias exclusivamente grises o verdes descritas anteriormente, las estrategias híbridas representan un enfoque emergente que busca integrar los elementos de ambos paradigmas. Este tipo de soluciones combina la eficiencia hidráulica y la predictibilidad de la ingeniería gris con la flexibilidad, resiliencia y co-beneficios ambientales de las soluciones basadas en la naturaleza. Es así que las estrategias híbridas se presentan como una alternativa para contextos donde la incertidumbre climática, la urbanización acelerada y las demandas sociales requieren respuestas más integrales y adaptativas [69].

Entre los ejemplos más frecuentes se incluyen diques reforzados con cinturones verdes o humedales, alcantarillados combinados con jardines de lluvia, estaciones de bombeo complementadas por lagunas de retención natural y canales de drenaje diseñados como corredores ecológicos [84]. Estas configuraciones demuestran que la conveniencia de las soluciones híbridas radica en su capacidad para mitigar riesgos hidrológicos extremos al tiempo que generan beneficios adicionales en biodiversidad, calidad del aire, recreación y cohesión social.

Los criterios de conveniencia que orientan la adopción de estas soluciones son múltiples y complementarios. En primer lugar, se destaca la robustez hidráulica y ecológica, es decir, la capacidad de manejar eventos extremos sin comprometer la funcionalidad ecosistémica. En segundo lugar, se destaca la optimización costo-beneficio ya que los procesos naturales reducen

gastos de operación y mantenimiento de la infraestructura gris. Un tercer criterio es la adaptabilidad climática, pues las soluciones híbridas pueden ampliarse o redimensionarse de acuerdo con escenarios futuros de precipitación y cambio de uso del suelo. Además, su legitimidad social e institucional es generalmente más alta que la de las obras exclusivamente grises, ya que integran espacios verdes de valor recreativo y cultural [85]. Finalmente, la compatibilidad territorial garantiza coherencia entre planificación urbana, ordenamiento ecológico y necesidades de protección frente a desastres.

Desde una perspectiva metodológica, la implementación de soluciones híbridas exige enfoques interdisciplinarios y procesos participativos. Se utilizan modelos integrados hidrológico-ecológicos que combinan herramientas como HEC-RAS o SWMM con modelos de servicios ecosistémicos para evaluar simultáneamente caudales, retención y provisión de beneficios ambientales. Asimismo, se recurre a la evaluación multicriterio (MCA) para ponderar variables técnicas, sociales y ambientales, y al análisis de resiliencia y vulnerabilidad, con métricas que miden el desempeño frente a escenarios de inundaciones o sequías extremas. Adicionalmente, se promueven procesos participativos que articulan a los actores técnicos, comunitarios e institucionales en la toma de decisiones, aumentando la aceptación social y la legitimidad de las intervenciones [79].

En conclusión, las estrategias híbridas representan un paso intermedio respecto a los enfoques grises o verdes. Su conveniencia radica en la capacidad de integrar criterios técnicos, sociales, ambientales e institucionales en un marco adaptativo, lo que las convierte en una herramienta clave para avanzar hacia la gestión integral y resiliente del agua en el siglo XXI.

5.2.1.11 Room for the River en los Países Bajos

El programa *Room for the River*, iniciado en 2006 en los Países Bajos, constituye un ejemplo emblemático de estrategias híbridas en gestión fluvial. Este plan combinó la infraestructura tradicional de diques y canales con medidas de infraestructura verde, como la creación de espacios de inundación controlada, restauración de llanuras aluviales y corredores verdes, aumentando así la capacidad de los ríos. La conveniencia de esta estrategia se fundamentó en la necesidad de incrementar la seguridad frente a inundaciones sin depender exclusivamente del reforzamiento de diques, especialmente ante escenarios de cambio climático. La metodología incluyó análisis de planificación hidráulica y consideraciones de gobernanza y ambientales para integrar las soluciones

verdes. Los resultados muestran mejoras en la resiliencia y flexibilidad del sistema fluvial, demostrando que las soluciones híbridas pueden ofrecer ventajas frente a las infraestructuras grises convencionales[87].

5.2.1.12 Parque Inundable La Marjal en Alicante, España

En el ámbito urbano, el Parque Inundable La Marjal, inaugurado en 2015 en Alicante, España, es un caso innovador de infraestructura híbrida. El proyecto combina un tanque de tormentas subterráneo con capacidad de 60.000 m³ (infraestructura gris) con un parque urbano multifuncional (infraestructura verde) que actúa como espacio de retención temporal. El criterio de conveniencia fue gestionar de manera simultánea el riesgo de inundaciones urbanas y la necesidad de espacios públicos recreativos. La metodología incluyó modelaciones hidrológicas para dimensionar la capacidad de almacenamiento, análisis costo-beneficio que justificó la inversión pública y consultas ciudadanas que orientaron el diseño del parque. Los resultados muestran que el parque ha permitido controlar episodios de lluvias torrenciales en zonas críticas de Alicante, al tiempo que se consolidó como un espacio de recreación y educación ambiental. El caso ha sido reconocido en foros europeos como un ejemplo innovador de gestión integrada del riesgo [88].

5.2.1.13 Rehabilitación del Río Cheonggyecheon en Seúl, Corea del Sur

El proyecto de restauración del Río Cheonggyecheon, implementado a principios de los años 2000 en Seúl, es un referente global en soluciones híbridas. Se desmontó una autopista elevada (infraestructura gris) y se rehabilitó el cauce del río mediante corredores verdes, zonas de retención y sistemas de control hidráulico. El criterio de conveniencia fue la necesidad de recuperar la funcionalidad hidrológica y ambiental del río en un entorno urbano densamente poblado, mientras se revitalizaba el espacio público. La metodología incluyó simulaciones hidrodinámicas para calcular la capacidad de retención, estudios de impacto ambiental para evaluar la restauración ecológica y procesos de participación ciudadana que legitimaron el proyecto. Los resultados fueron notables pues el proyecto redujo riesgos de inundación, mejoró la calidad ambiental, aumentó la biodiversidad urbana y revitalizó un eje urbano estratégico, consolidándose como símbolo de transformación híbrida en Asia [89].

5.2.1.14 Caso Sekondi-Takoradi, Ghana

El estudio en Sekondi-Takoradi, Ghana analizó la implementación de infraestructura híbrida para la gestión del riesgo de inundaciones en contextos urbanos vulnerables. El proyecto combinó obras de drenaje tradicionales con soluciones basadas en la naturaleza como la restauración de humedales y la creación de jardines pluviales y zonas de retención vegetadas. Estas intervenciones se enmarcaron en un enfoque integral de resiliencia climática promovido por el *Nature-Based Infrastructure Global Resource Centre del IISD*.

El criterio de conveniencia fue reducir el riesgo de inundaciones urbanas y también generar beneficios ambientales y sociales, mejorando así la calidad del aire, el acceso a espacios verdes y la creación de empleo local. Para ello se realizaron análisis hidrológicos y económicos para comparar diferentes escenarios de intervención, así como la consideración de actores comunitarios y municipales en el diseño de las medidas. Los resultados evidenciaron que las soluciones híbridas proporcionaron una reducción significativa en los daños por inundación y un aumento en la resiliencia urbana, con un retorno estimado entre 3,26 y 13,53 USD por cada dólar invertido. Además, se observaron co-beneficios ambientales y sociales, como la mejora de espacios verdes y oportunidades de empleo local. El estudio demuestra que la efectividad de estas estrategias depende de la integración de componentes verdes y grises, del mantenimiento a largo plazo y de la participación de las comunidades locales [90].

5.2.1.15 Discusión comparativa

Los cuatro casos analizados muestran que la conveniencia de las estrategias híbridas se sustenta en la necesidad de integrar eficiencia hidráulica, adaptación climática y beneficios socioambientales en un mismo sistema. En los Países Bajos, el programa *Room for the River* representó una transformación paradigmática en la gestión fluvial: sustituyó la lógica del confinamiento por la de convivencia con el agua, combinando infraestructuras grises con la restauración de llanuras aluviales y espacios de inundación controlada. El criterio de conveniencia fue aumentar la seguridad frente a inundaciones sin depender exclusivamente del refuerzo estructural, incorporando flexibilidad territorial ante escenarios de cambio climático [87].

En Alicante (España), el Parque Inundable La Marjal ejemplifica la aplicación urbana de soluciones híbridas, al integrar un tanque de tormentas subterráneo con un parque multifuncional de retención

temporal. Este modelo respondió simultáneamente a criterios de gestión del riesgo y de creación de espacios públicos, mostrando que la infraestructura hidráulica puede cumplir funciones sociales y ambientales sin perder eficacia técnica [88].

En Seúl (Corea del Sur), la rehabilitación del río Cheonggyecheon constituyó un caso emblemático de reconversión urbana híbrida, al desmontar una autopista y restaurar un corredor fluvial mediante soluciones verdes y sistemas hidráulicos de control. El criterio de conveniencia fue recuperar la funcionalidad ecológica del río, reducir riesgos de inundación y revitalizar un eje urbano estratégico, demostrando que las estrategias híbridas pueden servir como catalizadores de regeneración urbana y ambiental [87].

Por último, en Sekondi-Takoradi (Ghana), la implementación de infraestructuras híbridas combinó obras de drenaje convencionales con soluciones basadas en la naturaleza, como humedales restaurados y jardines pluviales. El criterio de conveniencia se centró en reducir la vulnerabilidad ante inundaciones y generar co-beneficios ambientales y sociales en contextos urbanos con recursos limitados [90].

La comparación entre los casos revela que aunque los contextos geográficos y socioeconómicos son diversos, las estrategias híbridas comparten un mismo principio que es la integración funcional entre lo gris y lo verde para optimizar el desempeño hidráulico, la resiliencia climática y el valor social del territorio. A diferencia de las infraestructuras puramente grises, las híbridas incorporan flexibilidad adaptativa, capacidad de autorregeneración ecológica y potencial de uso público, mientras que, las exclusivamente verdes, garantizan un nivel de control hidráulico más fuerte ante eventos extremos.

En términos metodológicos, los estudios coinciden en emplear herramientas de modelación hidrológica, análisis costo-beneficio y evaluaciones de gobernanza, subrayando la importancia de procesos participativos y planificación interdisciplinaria. Sin embargo, también evidenciaron desafíos comunes, como los altos costos iniciales, la complejidad institucional y la necesidad de mantenimiento sostenido.

En conjunto, los casos de los Países Bajos, España, Corea del Sur y Ghana demuestran que las estrategias híbridas representan un enfoque intermedio y altamente prometedor para la gestión del

riesgo hídrico urbano y fluvial. Al combinar la robustez técnica de la infraestructura gris con los beneficios ecosistémicos de la verde, estas soluciones ofrecen una vía eficaz hacia sistemas más resilientes, sostenibles y socialmente integrados, capaces de responder de manera flexible a los desafíos de la variabilidad climática y la urbanización contemporánea.

Estrategias Híbridas – Criterios de Uso		
Autor	Estrategia	Criterios de uso
[87] C. Zevenbergen, et al	Programa Room for the River	Conveniente aplicar estrategias híbridas en sistemas fluviales donde se requiere aumentar la capacidad de los ríos sin depender exclusivamente de diques, integrando medidas de restauración ecológica, espacios de inundación controlada y corredores verdes.
[88] Morote S.	Parque Inundable La Marjal	Conveniente implementar infraestructuras híbridas urbanas que combinen tanques de tormenta con parques multifuncionales en zonas propensas a lluvias torrenciales, donde se busca compatibilizar la gestión del riesgo con el uso recreativo y educativo del espacio público.
[89] C. Jeon et al	Restauración del río	Conveniente aplicar soluciones híbridas en entornos urbanos densos para recuperar cauces fluviales degradados, integrando sistemas de control hidráulico con corredores verdes que reduzcan la vulnerabilidad ante inundaciones y mejoren la calidad ambiental urbana.
[90] N. Niño et al.	Infraestructura híbrida	Conveniente implementar soluciones híbridas en contextos urbanos vulnerables, combinando drenaje convencional con restauración de humedales, jardines pluviales y zonas vegetadas, cuando se busca simultáneamente reducir riesgos de inundación y generar beneficios sociales y ambientales.

Tabla 10. Criterios de uso - Estrategias híbridas. Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Estrategia socio-institucionales

Las estrategias socio-institucionales constituyen un pilar fundamental en la gestión integral del agua, al situar la atención no en las infraestructuras físicas, sino en los procesos de gobernanza, las normas, la participación social y el fortalecimiento institucional. En un contexto caracterizado por la acelerada urbanización, el cambio climático y la creciente presión sobre los ecosistemas acuáticos, la acción colectiva y la capacidad institucional se convierten en factores determinantes para la resiliencia hídrica [91]

A diferencia de las estrategias grises, verdes o híbridas que materializan soluciones en el espacio físico, las socio-institucionales funcionan como el marco habilitador que condiciona su diseño, implementación y sostenibilidad. Tal como se discutió anteriormente, la definición de métricas y umbrales técnicos constituye un insumo esencial para orientar decisiones. Sin embargo, su eficacia depende de la capacidad de los marcos socio-institucionales para traducirlos en políticas públicas, regulaciones y mecanismos de gobernanza adaptativa. En este sentido, dichas estrategias son claves para garantizar que los avances técnicos se acompañen de legitimidad social, equidad distributiva y sostenibilidad a largo plazo [92]

La conveniencia de adoptar estrategias socio-institucionales responde a una serie de criterios interdependientes que reflejan la complejidad de la gestión hídrica:

- **Capacidad de gobernanza** es un criterio central ya que implica la existencia de marcos regulatorios claros, la coordinación efectiva entre diferentes actores y la coherencia interinstitucional. Sin estos elementos, los esfuerzos técnicos carecen de un entorno que asegure su continuidad.
- **Participación social** constituye un elemento imprescindible para legitimar las decisiones, reducir conflictos y garantizar la sostenibilidad de las medidas adoptadas. La inclusión de comunidades locales ayuda a fortalecer el sentido de apropiación y refuerza la justicia hídrica.
- **Equidad y justicia hídrica** que exige una distribución justa de beneficios y cargas vinculadas al agua. Este es un aspecto que es particularmente relevante en contextos de alta desigualdad socioeconómica, donde las políticas de agua pueden generar tensiones.
- **Fortalecimiento institucional** es esencial para contar con recursos financieros, técnicos y humanos que aseguren la implementación de programas y el monitoreo continuo. Si no se tiene unas capacidades institucionales robustas, incluso las mejores propuestas carecen de eficacia.
- **Adaptabilidad** representa otro criterio clave, dado que las instituciones deben ser capaces de ajustarse frente a escenarios de incertidumbre climática y transformaciones sociales.
- **Compatibilidad con marcos internacionales**, como la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), asegura la coherencia global y la posibilidad de acceder a mecanismos de cooperación y financiamiento internacional.

El diseño y la evaluación de estrategias socio-institucionales requieren metodologías diversas que permiten capturar la complejidad de los procesos de gobernanza. El análisis de políticas públicas constituye la base para identificar fortalezas y vacíos en los marcos normativos. Los enfoques de gobernanza adaptativa y resiliencia socio-ecológica propuestos por Pahl-Wostl [92] ofrecen marcos analíticos para evaluar cómo las instituciones responden a la incertidumbre climática y a las presiones sociales.

Las herramientas participativas, como los talleres comunitarios y la cartografía social, son empleadas para incluir la visión de actores locales y asegurar los procesos de co-producción del conocimiento. Al mismo tiempo, las evaluaciones multicriterio (MCA) permiten ponderar de forma integrada los aspectos técnicos, sociales, ambientales e institucionales, generando así una visión holística de la gestión hídrica. Finalmente, las métricas globales de monitoreo, como los desarrollados por UN-Water [93] para dar seguimiento al ODS 6, constituyen un referente internacional que facilita la evaluación comparativa entre países y regiones.

5.2.2.1 Gobernanza adaptativa en cuencas europeas

El estudio en las cuencas europeas constituye una referencia en la transición hacia modelos de gobernanza adaptativa en Europa. Este estudio analiza varias cuencas como el Rin y el Danubio, donde los enfoques tradicionales, que son rígidos y jerárquicos no lograban responder a la creciente incertidumbre climática y a la presión de múltiples usos del agua. El criterio de conveniencia fue fortalecer la flexibilidad institucional mediante esquemas de participación social y mecanismos de aprendizaje colectivo. Metodológicamente, la autora aplicó estudios comparativos de cuencas, entrevistas a gestores del agua y simulaciones de dinámicas socio-ecológicas. Los resultados evidenciaron que aquellas cuencas con estructuras más horizontales que incorporaron a usuarios locales y ONGs en el diseño de políticas, fueron más resilientes frente a sequías e inundaciones. En síntesis, este caso nos demuestra que la gobernanza adaptativa es particularmente útil en contextos europeos con diversidad de actores y alta complejidad entre ellos [71].

5.2.2.2 Principios de gobernanza de la OCDE (*Organization for Economic Cooperation and Development*)

La *Organization for Economic Cooperation and Development* sistematizó un marco de 12 principios de gobernanza del agua tras evaluar políticas en países miembros como Francia, México

y Corea del Sur. Estos principios abarcan dimensiones como transparencia, participación, rendición de cuentas, eficiencia institucional y coherencia multiescalar. El criterio de conveniencia fue la necesidad de fortalecer las capacidades institucionales frente a los retos de urbanización, cambio climático y fragmentación sectorial. Metodológicamente, la organización empleó comparaciones de políticas nacionales, métricas de eficiencia institucional y encuestas a expertos en gobernanza hídrica. Los hallazgos mostraron que la coherencia entre niveles de gobierno y la existencia de mecanismos de monitoreo transparente constituyen factores decisivos para sostener reformas estructurales. Este marco ha sido adoptado como referencia global para evaluar la calidad institucional en gestión hídrica [94].

5.2.2.3 Participación comunitaria en cuencas altoandinas

El estudio en cuencas altoandinas documenta experiencias de gestión participativa en comunidades campesinas de cuencas altoandinas del Perú, en zonas altamente vulnerables al retroceso glaciar y a la variabilidad climática. El criterio de conveniencia fue reducir vulnerabilidades sociales y climáticas mediante la inclusión activa de las comunidades en la toma de decisiones sobre uso, distribución y conservación del agua. La metodología combinó talleres participativos, cartografía social y evaluaciones de vulnerabilidad climática en comunidades rurales. Los resultados evidenciaron que los proyectos con mayor participación comunitaria alcanzaron un grado más alto de legitimidad social, lograron acuerdos de distribución más equitativos y redujeron conflictos locales por el agua. Además, estos procesos fortalecieron el conocimiento tradicional y su integración con políticas de adaptación y manejo hídrico sostenible [95].

5.2.2.4 Reformas institucionales en Singapur

El análisis del modelo hídrico de Singapur documenta una estrategia institucional exhaustiva que ha transformado al país de dependencia externa hacia autosuficiencia en agua. El criterio de conveniencia fue consolidar la eficiencia hídrica en un contexto de urbanización acelerada, escasez de recursos naturales y alta presión sobre el agua. Metodológicamente, los autores aplicaron análisis de políticas, estudios de caso institucionales y comparaciones de marcos regulatorios. Los resultados muestran que Singapur constituye un referente global de gobernanza hídrica eficaz gracias a marcos regulatorios sólidos, financiamiento estable, integración coherente entre políticas urbanas, ambientales y de agua, y una agencia única que gestiona el ciclo completo del agua[96].

5.2.2.5 Discusión comparativa

Los cuatro casos analizados permiten identificar cómo la conveniencia de las estrategias socio-institucionales depende del contexto territorial, político y social. En Europa, la gobernanza adaptativa en cuencas como el Rin y el Danubio evidenció que los enfoques tradicionales rígidos no logran enfrentar la incertidumbre climática y la presión de múltiples usos del agua. La flexibilidad institucional, la participación de actores locales y los mecanismos de aprendizaje colectivo aumentaron la resiliencia frente a sequías e inundaciones [71].

En el marco de la OCDE, los principios de gobernanza del agua mostraron la importancia de fortalecer capacidades institucionales frente a la urbanización, el cambio climático y la fragmentación sectorial. La coherencia entre niveles de gobierno, la transparencia y los mecanismos de monitoreo resultaron decisivos para sostener reformas estructurales y establecer estándares globales de gobernanza [94].

En las cuencas altoandinas del Perú, la participación comunitaria fue esencial para reducir vulnerabilidades sociales y climáticas. La inclusión activa de las comunidades, la integración de saberes locales y los procesos participativos generaron mayor legitimidad social, acuerdos de distribución más equitativos y disminución de conflictos, evidenciando que la sostenibilidad depende de la interacción directa con los usuarios locales [95].

Finalmente, en Singapur, las reformas institucionales enfocadas en la eficiencia hídrica mostraron que marcos regulatorios sólidos, financiamiento estable y la integración coherente de políticas urbanas, ambientales y de agua permiten alcanzar autosuficiencia hídrica y resultados sostenibles en contextos urbanos de alta presión sobre el recurso [96].

La comparación evidencia que las estrategias socio-institucionales no reemplazan a las infraestructuras físicas, sino que habilitan su efectividad y sostenibilidad. La capacidad de integrar criterios técnicos, sociales y ambientales en marcos de gobernanza coherentes y adaptativos constituye un elemento clave para asegurar intervenciones equitativas, resilientes y duraderas.

Estrategias socio-institucionales - Criterios de Uso

Autor

Estrategia

Criterios de uso

[71] C. Pahl-Wostl	Gobernanza adaptativa	Conveniente aplicar modelos de gobernanza adaptativa cuando la rigidez institucional limita la respuesta ante la incertidumbre climática y la gestión integrada de múltiples usos del agua. Favorece esquemas horizontales y participación social para aumentar resiliencia y aprendizaje colectivo.
[94] OECD	Principios de gobernanza	Conveniente fortalecer las capacidades institucionales frente a los retos de urbanización, cambio climático y fragmentación sectorial, mediante principios de transparencia, participación, rendición de cuentas y coherencia multiescalar entre niveles de gobierno.
[95] Marisol et al	Participación comunitaria	Conveniente promover la inclusión activa de comunidades locales para reducir vulnerabilidades sociales y climáticas, integrando saberes tradicionales y fomentando procesos participativos que aumentan la legitimidad social y reducen conflictos socio-hídricos.
[96] Octastefani T, Mitra B, Kusuma A	Reformas institucionales	Conveniente consolidar la eficiencia hídrica en contextos de urbanización acelerada y escasez de recursos naturales, mediante marcos regulatorios sólidos, financiamiento estable y una agencia única que gestiona el ciclo completo del agua, asegurando la autosuficiencia hídrica y la sostenibilidad institucional.

Tabla 11. Criterios de uso - Estrategias socio-institucionales. Fuente: Elaboración propia

5.3 Diagrama del modelo conceptual

El análisis de indicadores y umbrales desarrollado en los capítulos anteriores permite entender de forma aislada cada una de las dimensiones del sistema, sin embargo, para comprender cómo estas dimensiones y cada una de sus variables interactúan entre sí y generan patrones persistentes de vulnerabilidad o resiliencia, es necesario adoptar el enfoque sistémico, base de este proyecto. Para ello, se realizó un diagrama causal que sintetiza estas interdependencias y hace explícitas las dinámicas de retroalimentación que estructuran el comportamiento del sistema urbano-territorial frente a las inundaciones. A través de bucles de refuerzo y de balance, el modelo revela cómo procesos hidrológicos, territoriales, de infraestructura, institucionales y sociales no solo coexisten, sino que se influyen mutuamente, generando trayectorias de deterioro o de aprendizaje adaptativo. Este mapa causal constituye el puente conceptual entre la caracterización de cada una de las dimensiones e indicadores y la comprensión del riesgo, además sirve como base para interpretar de manera integrada los resultados de dominancia, puntos de palanca y estrategias de intervención que se presentan a continuación.

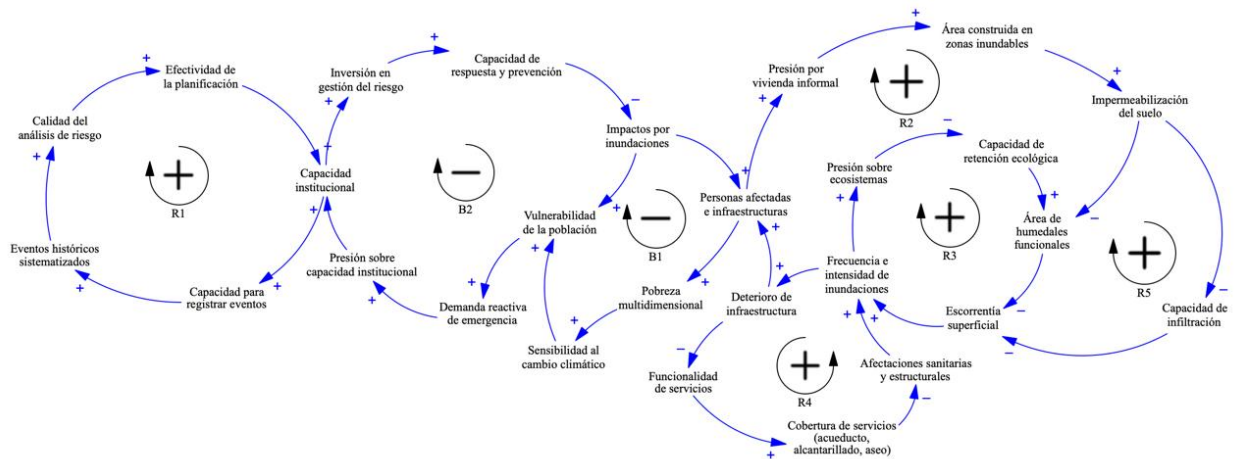


Figura 1. Diagrama causal. Fuente: Elaboración propia

A partir del diagrama presentado en la figura 1, se explicará a continuación cada bucle resultante.

5.3.1 Bucle de Refuerzo 1: Aprendizaje institucional para la inteligencia del riesgo

Tener una mayor calidad en el análisis de riesgo permite mejorar la efectividad de la planificación frente a eventos de inundación. Cuando las decisiones son más informadas, se fortalece la capacidad institucional de los municipios, esta capacidad ampliada permite registrar y sistematizar con mayor rigor los eventos históricos, alimentando de manera progresiva una base de datos más sólida. La acumulación de datos, a su vez, retroalimenta y mejora la calidad del análisis de riesgo, cerrando un ciclo virtuoso de aprendizaje institucional.

Este bucle representa una dinámica clave de fortalecimiento institucional a partir del conocimiento acumulado, integra variables de la dimensión de inteligencia y datos con gobernanza, subrayando que los municipios con capacidad para registrar sus propias crisis también están mejor posicionados para aprender de ellas. Es un mecanismo de refuerzo donde cada ciclo mejora el siguiente, dando lugar a una estructura adaptativa e inteligente.

Este bucle tiende a adquirir dominancia en el mediano y largo plazo, ya que depende de procesos acumulativos de información, fortalecimiento organizacional y sistematización de eventos. Una vez se activa genera efectos sostenidos sobre la calidad del análisis y la gobernanza técnica del riesgo. Para que se active, se requiere de una base mínima de capacidad institucional, voluntad política para invertir en sistemas de información, y una infraestructura de datos interoperable.

También depende de la existencia de eventos pasados sistematizados y del uso activo de esta información en la planificación.

En cuanto a su interacción con otros bucles, el bucle de refuerzo 1 fortalece la efectividad del bucle de balance 1 al mejorar la base analítica sobre la que se toman decisiones.

5.3.2 Bucle de Balance 1: Gobernanza como modulador de la vulnerabilidad estructural

Una mayor inversión en gestión del riesgo permite mejorar la capacidad de respuesta y prevención ante eventos extremos, lo que reduce la magnitud de los impactos generados por las inundaciones. Los impactos generados por las inundaciones a su vez afectan a las personas y a la infraestructura, y con ello se empeora varias dimensiones de la pobreza al mismo tiempo. Una mayor pobreza multidimensional se traduce en mayor sensibilidad al cambio climático y, por tanto, en un aumento de la vulnerabilidad de la población. A su vez, esto aumenta la demanda de respuestas reactivas ante una emergencia, lo que aumenta la presión sobre la capacidad institucional.

Este bucle representa un ciclo que intenta equilibrar el sistema, mostrando cómo la gestión del riesgo puede frenar la vulnerabilidad. Este bucle intenta explicar que si no se invierte lo suficiente, las inundaciones profundizan la pobreza multidimensional, lo que a su vez incrementa la vulnerabilidad y la presión sobre las instituciones.

Por otro lado, este bucle puede adquirir dominancia en el mediano plazo, especialmente cuando las inversiones en gestión del riesgo son sostenidas y están bien focalizadas. Su efecto es amortiguador, puesto a que tiende a reducir la intensidad de los impactos acumulativos. Para que se active se requiere de una capacidad institucional suficiente para ejecutar inversiones de manera eficaz, así como coordinación intersectorial y continuidad en las estrategias de reducción del riesgo. Aquí es clave el financiamiento de forma regular y no solamente después de un evento de desastre.

En cuanto a su interacción con otros bucles, el bucle de balance 1 modera el efecto de bucles como el refuerzo 2 y refuerzo 5, al reducir la exposición y la presión social sobre zonas de riesgo. Por otro lado, se potencia si se opera conjuntamente con el bucle de refuerzo 1.

5.3.3 Bucle de Refuerzo 2: Exclusión territorial y exposición creciente al riesgo

La presión por vivienda informal en contextos sin planeación territorial lleva a la ocupación de zonas inundables. Esto aumenta la impermeabilización del suelo y reduce la funcionalidad de los humedales, lo cual incrementa la escorrentía superficial. Con una mayor escorrentía, se intensifican la frecuencia y la severidad de las inundaciones, que deterioran la infraestructura existente y afectan directamente a la población más vulnerable. Estas afectaciones generan una presión adicional por soluciones de vivienda inmediatas, que frecuentemente se materializan en la ocupación informal de nuevas áreas de riesgo, cerrando un ciclo de exclusión y exposición.

Este bucle describe una dinámica típica en ciudades intermedias y grandes donde la informalidad urbana se desarrolla en condiciones de marginalidad institucional. La interacción entre presión social, degradación ambiental e infraestructura frágil define una espiral creciente de exposición al riesgo, que solo puede romperse con una intervención decidida desde el ordenamiento territorial y la política de vivienda.

Tiende a ser dominante en el corto y mediano plazo, especialmente en municipios con urbanización informal activa, crecimiento demográfico alto y baja capacidad regulatoria. Se puede activar gracias a la alta demanda habitacional, informalidad estructural, ausencia de planificación urbana y gobernanza débil.

En cuanto a su interacciones con otros bucles, este bucle se refuerza con el bucle de refuerzo 5, ya que ambos giran en torno a dinámicas territoriales excluyentes. Por otro lado, aumenta la presión sobre los ecosistemas, debilitando el bucle de balance 2.

5.3.4 Bucle de Refuerzo 3: Degradación ecológica e intensificación del riesgo hidrológico

Cuando los ecosistemas mantienen una alta capacidad de retención ecológica, pueden regular mejor los flujos hídricos. Esta capacidad se traduce en una mayor conservación de los humedales funcionales, lo que reduce la escorrentía superficial y, en consecuencia, la frecuencia y severidad de las inundaciones. Sin embargo, cuando las inundaciones ocurren con más intensidad, ejercen presión sobre los ecosistemas y aceleran su deterioro. Esa presión reduce progresivamente su capacidad de retención ecológica, lo cual aumenta el riesgo y refuerza la degradación.

Este bucle representa una espiral descendente ecológica que combina degradación ambiental con incremento de amenazas físicas. Es una dinámica de refuerzo negativa que convierte a los ecosistemas en víctimas colaterales de procesos urbanos y climáticos, reduciendo su función reguladora.

Este bucle se manifiesta a largo plazo, dado que el deterioro ecológico es progresivo pero acumulativo. Sin embargo, una vez que la capacidad de retención ecológica cae por debajo de cierto umbral, los efectos se intensifican rápidamente. La activación de este bucle se da cuando hay pérdida sostenida de humedales, deforestación, expansión urbana y eventos extremos frecuentes.

En cuanto a su interacción con otros bucles, este se acopla negativamente con el refuerzo 2 y refuerzo 5, intensificando la escorrentía y reduciendo la capacidad de contención ecológica.

5.3.5 Bucle de Balance 2: Capacidad institucional como amortiguador del colapso

Una mayor inversión en gestión del riesgo permite construir capacidades de respuesta y prevención. Esto reduce el impacto directo de las inundaciones y, por tanto, disminuye la vulnerabilidad de la población. Un aumento en la vulnerabilidad ocasiona que la demanda reactiva se aumente y por tanto se eleve la presión sobre las instituciones locales. Una mayor presión sobre la capacidad institucional aumenta la necesidad de una mayor capacidad institucional, lo que obliga a ampliar la inversión en gestión del riesgo.

Este bucle, a diferencia del bucle de balance 1, enfatiza la función de la capacidad institucional como pilar central, reduciendo la complejidad social del sistema para enfocarse en la lógica de resiliencia operativa. Refuerza la idea de que sin instituciones fuertes no hay gestión anticipatoria viable.

Este es un bucle de reacción rápida, por lo que puede activarse en el corto plazo si existe capacidad institucional mínima. Este se activa bajo la presencia de personal técnico, financiamiento flexible y protocolos claros de respuesta. También requiere legitimidad institucional para actuar preventivamente.

En cuanto a su interacción con otros bucles, este puede contener los efectos iniciales de bucles como el refuerzo 4 o refuerzo 5, pero su acción es limitada si no se combina con inversiones estructurales de mediano plazo.

5.3.6 Bucle de Refuerzo 4: Fragilidad de los servicios urbanos ante el colapso físico

La cobertura de servicios básicos como acueducto, alcantarillado y aseo es esencial para mantener condiciones sanitarias y estructurales aceptables. Sin embargo, las afectaciones causadas por inundaciones reducen esa cobertura y funcionalidad. A medida que estos servicios colapsan, las condiciones sanitarias empeoran y se incrementan los efectos negativos de futuras inundaciones. Estas, a su vez, deterioran aún más la infraestructura urbana, reduciendo progresivamente la capacidad de mantener operativos los servicios esenciales.

Este bucle refleja una dinámica de colapso progresivo en infraestructura urbana, donde los servicios públicos, al ser afectados por el riesgo, pierden capacidad de mitigarlo. Suele adquirir dominancia tras eventos repetidos, en el mediano plazo, cuando la infraestructura urbana se encuentra en estado crítico. Este es por tanto, altamente sensible a la frecuencia de las crisis.

Se puede activar cuando la infraestructura es obsoleta, el mantenimiento deficiente y hay una exposición continua a eventos extremos.

Este interactúa con otros bucles al conectarse con el refuerzo 3 al compartir consecuencias sobre la capacidad operativa del territorio.

5.3.7 Bucle de Refuerzo 5: Urbanización desordenada y amplificación de amenazas

La presión por vivienda informal incrementa la ocupación de zonas inundables, lo que intensifica la impermeabilización del suelo y reduce la capacidad de infiltración. Como resultado, aumenta la escorrentía superficial y con ella, la frecuencia e intensidad de las inundaciones. Estas generan un deterioro continuo de la infraestructura urbana y afectan a la población más vulnerable, que, sin opciones habitacionales seguras, continúa ocupando nuevas zonas de riesgo.

Este bucle representa una retroalimentación que ocurre en mayor medida en contextos de urbanización desordenada. A través de la conexión entre factores sociales, territoriales e

hidrológicos, se muestra cómo la falta de planificación y la exclusión social actúan como motores de multiplicación de amenazas.

Este bucle tiene un comportamiento similar al refuerzo 2, con dominancia en el corto y mediano plazo, en contextos de expansión urbana no regulada. El aumento de superficie impermeable tiene efectos casi inmediatos sobre la escorrentía. Se activa cuando hay una falta de planificación urbana, inexistencia de controles de construcción y presión demográfica. Es un bucle común en áreas periurbanas o de reciente expansión.

Este interactúa con otros bucles al reforzar los bucles refuerzo 2 y refuerzo 3, con los que comparte lógica territorial y consecuencias ambientales.

Lo anterior se puede observar sintetizado en la siguiente tabla:

Nombre del Bucle	Tipo	Dominancia esperada	Condición de activación	Impacto en el sistema
Aprendizaje institucional para la inteligencia del riesgo	Refuerzo	Mediano - Largo plazo	Capacidad institucional, cultura de datos	Mejora la planificación, refuerza gobernanza basada en evidencia
Gobernanza como modulador de la vulnerabilidad estructural	Balance	Mediano plazo	Inversión sostenida, enfoque integral	Reduce vulnerabilidad estructural, estabiliza el sistema social-institucional
Exclusión territorial y exposición creciente al riesgo	Refuerzo	Corto - Mediano plazo	Déficit de vivienda, informalidad, gobernanza débil	Escala la exposición al riesgo y perpetúa la marginalidad urbana
Degradación ecológica e intensificación del riesgo hidrológico	Refuerzo	Largo plazo	Deterioro ambiental sostenido, eventos extremos	Disminuye la capacidad de regulación ecológica, amplifica riesgos físicos
Capacidad institucional como amortiguador del colapso	Balance	Corto plazo	Recursos técnicos, legitimidad institucional	Evita el colapso operativo ante eventos extremos
Fragilidad de los servicios urbanos ante el colapso físico	Refuerzo	Mediano plazo	Infraestructura obsoleta, mantenimiento precario	Aumenta la disfuncionalidad urbana, dificulta recuperación

Urbanización desordenada y amplificación de amenazas	Refuerzo	Corto - Mediano plazo	Expansión urbana no regulada, presión social	Aumenta escorrentía e impacto de eventos, reduce resiliencia del paisaje urbano
------------------------------------------------------	----------	-----------------------	----------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------

Tabla 12. Comportamientos bucles. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, gracias al análisis causal y de dominancia de los bucles, se pudieron identificar puntos estratégicos de “palanca” del sistema. A continuación se presentan los resultados en la siguiente tabla:

Punto de palanca	Tipo	Bucles asociados	Impacto esperado
Capacidad institucional para el aprendizaje adaptativo	Estructural-institucional	Refuerzo 1, Balance 1, Balance 2	Planificación efectiva, retroalimentación positiva
Control del crecimiento urbano informal	Territorial-normativo	Refuerzo 2, Refuerzo 5	Reducción de exposición y presión sobre ecosistemas
Protección de humedales funcionales	Ecológico-territorial	Refuerzo 2, Refuerzo 3	Disminución de escorrentía, aumento de capacidad ecológica
Resiliencia de infraestructura urbana	Técnico-operacional	Refuerzo 4	Sostenibilidad de servicios, prevención del colapso
Redistribución del gasto en gestión del riesgo	Financiero-político	Balance 1, Balance 2	Cambio de trayectoria desde lo reactivo hacia lo preventivo

Tabla 13. Puntos de palanca. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se organizó la siguiente matriz de intervenciones sistémicas cruzando los puntos de palanca con estrategias concretas, orientadas a transformar el comportamiento del sistema. Cada una de las celdas sugiere ciertas acciones clave.

Punto de palanca/ Estrategias	Acciones institucionales	Intervenciones territoriales	Intervenciones ecológicas	Tecnología y datos	Reformas normativas y de política pública
Capacidad institucional	Formación en modelación y análisis de riesgo	Fortalecimiento de oficinas de gestión del riesgo	Capacitación para restauración comunitaria	Plataformas integradas de monitoreo y decisión	Marco normativo para gestión anticipativa

Crecimiento urbano informal	Planes de vivienda digna y subsidiada	Monitoreo satelital y control del uso del suelo	Protección de zonas de amortiguamiento natural	Mapas de riesgo interoperables en tiempo real	Actualización de POT con enfoque en riesgo
Protección de humedales	Co-gestión con comunidades locales	Declaración de áreas protegidas funcionales	Restauración ecológica planificada	Sistemas de seguimiento hidrológico y ecológico	Incentivos fiscales para conservación
Infraestructura urbana resiliente	Protocolos de mantenimiento o preventivo	Infraestructura verde integrada a servicios públicos	Soluciones híbridas	Sensores de nivel y calidad de servicios esenciales	Revisión normativa de estándares de urbanismo resiliente
Redistribución del gasto	Auditoría del gasto post-desastre	Priorización de inversión en zonas críticas	Financiamiento de infraestructura verde	Evaluación de impacto del gasto público	Reglamentación del enfoque preventivo en política fiscal

Tabla 14. Intervenciones sistémicas. Fuente: Elaboración propia

De este análisis se puede concluir que la articulación entre bucles de realimentación, puntos de palanca y estrategias de intervención permite reconfigurar el sistema más allá de una respuesta técnica o sectorial. Esta matriz hace explícita la necesidad de alinear hidrología dinámica, gobernanza, arquitectura territorial, capacidad sociocomunitaria, infraestructura y datos como ejes convergentes de una transformación sistémica. Solo así será posible pasar de una lógica de contención reactiva a una planificación orientada a la resiliencia estructural y social, adaptada al contexto local de cada territorio.

5.4 Caso de estudio

El caso de estudio analiza, para todos los municipios de Colombia, los indicadores definidos en la metodología dentro de las seis dimensiones: hidrología dinámica, arquitectura territorial, infraestructura híbrida, gobernanza, capacidad socio comunitaria e inteligencia y datos. Se eligió la escala municipal porque allí se toman las decisiones cotidianas sobre uso del suelo, servicios públicos, gestión del riesgo y participación comunitaria, además que permite capturar la heterogeneidad del territorio sin generalizarla en promedios departamentales.

Con este análisis se busca que los responsables locales puedan estimar de manera aproximada cómo se encuentra su territorio, identificar brechas de información, priorizar qué indicadores faltan por

calcular y en qué aspectos deben concentrar esfuerzos. La lectura comparativa entre municipios, basada en métricas normalizadas a [0–1] ofrece un punto de partida común y replicable para orientar decisiones.

Esta investigación no pretende producir diagnósticos exhaustivos para cada municipio, pues está fuera de su alcance, sino habilitar un primer paso operativo para abordar las inundaciones de manera sistémica. Con apoyo del Capítulo 1 (definiciones, métricas, umbrales y fuentes de datos) y del Capítulo 2 (criterios y rutas de intervención gris, verde, híbrida y socio-institucional), los actores tomadores de decisión pueden conectar el problema de fondo con las condiciones físicas, de infraestructura y de capacidades institucionales y sociales de su territorio. El análisis revela patrones, sugiere dónde conviene profundizar estudios locales y orienta la priorización de inversiones y acciones de reducción del riesgo. Por tanto, el enfoque del caso de estudio ofrece una base operativa, comparable y actualizable que facilita pasar de la constatación del problema a una agenda de trabajo concreta para disminuir pérdidas humanas y materiales y fortalecer la resiliencia municipal.

5.4.1 Análisis de datos

El análisis de datos se realizó teniendo en cuenta las gráficas obtenidas a partir de los datos obtenidos para cada indicador, estos fueron expuestos en un tablero de control en power bi, en el cual se puede acceder haciendo uso del siguiente link: que se puede observar con mayor detalle en el siguiente link:
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMTUwZjljMzQtZmNjMi00ODAzLThkMDMtMTNkY2ZjMjQ0OTNkIiwidCI6ImFINTI1NzU3LTg5YmEtNGQzMC1hMmY3LTQ5Nzk2ZWY4YzYwNCIsImMiOiR9>. Todas las gráficas que se presenten en esta sección fueron tomadas de allí, donde se pueden revisar con mayor profundidad siguiendo el enlace. Con base en los datos obtenidos, y teniendo en cuenta el factor importante de que todos los indicadores están normalizados en [0–1] siendo el mejor desempeño sistémico, se obtuvo que el municipio con mejor desempeño sistémico corresponde a Sabaneta, Antioquia con un valor de 0,78, mientras que el menor se observa en Miriti-Paraná, Amazonas con un valor aproximadamente de 0.

Para la dimensión de Hidrología Dinámica se obtuvo que el municipio con mejor desempeño es San Andrés, Santander con un valor de 0,99 y el peor fue Tópaga, Boyacá con un valor de 0,44. Al analizar los resultados, se puede concluir que un valor cercano a 1 en Hidrología Dinámica sintetiza condiciones relativamente favorables frente a la amenaza (menor proporción del territorio bajo amenaza hidrometeorológica, menor frecuencia relativa de eventos de inundación y escenarios TR-50 con velocidades y profundidades menos críticas, junto con valores de precipitación menos desencadenantes de escorrentía superficial concentrada), por el contrario, el valor más bajo refleja una alta exposición del territorio, recurrencia histórica de eventos y parámetros hidráulicos severos típicos de planicies aluviales o cuencas de respuesta rápida.

En la dimensión de Arquitectura territorial se obtuvo que el municipio con mejor desempeño fue La Victoria, Amazonas con un valor aproximadamente de 1,00 y el peor fue Santa Lucía, Atlántico con un valor de 0,35. Esto se puede traducir a que en esta dimensión, el máximo sugiere territorios con mayor función “esponja” (humedales, menor ocupación de planicies inundables y menor áreas urbanas o impermeables), mientras que el mínimo denota una configuración que amplifica picos de caudal por impermeabilización y construcción en zonas potencialmente inundables.

En Infraestructura híbrida, se obtuvo que Santa Lucía, Atlántico presentó el mejor desempeño con un valor de 1,00 y Arjona, Bolívar el peor con un valor de 0,036, esto se traduce a un valor alto que expresa coberturas consolidadas de acueducto, alcantarillado y aseo, sistemas que si son operados de forma adecuada reducen encharcamientos y taponamientos, en tanto que el mínimo valor delata déficits que agravan la inundación pluvial. Adicionalmente, se puede hacer otro análisis para Santa Lucía, Atlántico pues presenta muy buena infraestructura, pero arquitectura territorial débil, lo que advierte que la mejora sistémica exige coherencia entre dimensiones.

En la dimensión de Capacidad sociocomunitaria se obtuvo que San Pedro de Cartago, Nariño tiene el desempeño más alto con un valor de 0,97 y Alto Baudó, Chocó el peor con un desempeño de 0,31. De lo anterior se puede concluir que los puntajes extremos diferencian territorios con mayor capacidad adaptativa, menor sensibilidad y menores tasas de afectación asociadas a mejores condiciones en términos de pobreza, educación y vivienda, comparado con aquellos con vulnerabilidades sociales que amplifican el daño ante amenazas.

En la dimensión de Gobernanza se obtuvo que Bogotá presentó el mejor desempeño con un valor de 0,64 y Barrancominas, Guainía el peor con un valor de 0. En Gobernanza, el máximo refleja inversión total y buen balance entre conocimiento, fortalecimiento y reducción del riesgo, con instrumentos vigentes, en este caso típico de una ciudad principal y capital, mientras que los mínimos pueden significar desempeño muy bajo o ausencia de información.

Finalmente, en la dimensión de Inteligencia y Datos, San Andrés, Santander obtuvo el mejor desempeño con un valor de 0,99 y La Pedrera, Amazonas el peor con un valor de 0, aquí un valor alto combina conectividad y trazabilidad de eventos, y un valor nulo delata ecosistemas de datos incipientes con barreras para alerta, aprendizaje y evaluación.

Estos resultados, sin embargo, deben leerse con cautela por el margen de error e incertidumbre de la base de datos. Primero, los datos presentan vigencias distintas, algunos indicadores presentan datos de los últimos 10 años y otros de un único año, esto introduce un desfase temporal, por tanto, los valores representan una aproximación del estado reciente. Segundo, existen vacíos de información en varios municipios, ocasionando que, en el cálculo del promedio, esos vacíos tiendan a diluir el resultado hacia cero cuando se promedia sobre las seis dimensiones, como ocurre en Miriti-Paraná (único valor distinto de cero en “Inteligencia y Datos” y ausencias en el resto), lo que subestima el desempeño real si el municipio no dispone aún de reportes comparables. Tercero, hay aproximaciones metodológicas (como la aproximación de perímetro urbano o de impermeabilidad cuando no existen capas de perímetros urbanos) que capturan patrones razonables, pero no sustituyen mediciones locales. Cuarto, persisten sesgos de reporte: territorios remotos suelen tener menor conectividad y registros administrativos más escasos. Finalmente, el cambio climático quiebra tendencias históricas: hay lugares con baja pluviosidad histórica que hoy enfrentan episodios intensos (como La Guajira), de modo que si los parámetros de precipitación o los escenarios TR-50 se derivan de periodos previos, la amenaza actual puede estar subestimada.

Por ello, el tablero es un primer corte comparativo y replicable, su fortaleza es señalar patrones y prioridades, pero presenta un límite pues no llega a reemplazar el diagnóstico local con datos actualizados y mediciones con detalles.

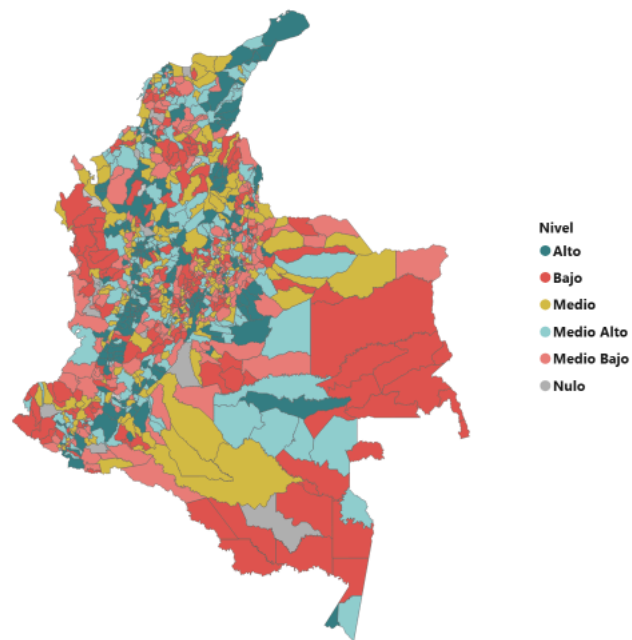


Figura 2. Mapa de nivel de desempeño sistémico por municipios. Fuente: Elaboración propia

La lectura del mapa de desempeño sistémico muestra mayor concentración de resultados bajos/medio-bajos en el Pacífico que presenta un valor de 0,56, en donde el departamento con menor desempeño es el Chocó con un valor de 0,53 y el de mejor desempeño es el Valle del Cauca con un valor de 0,61 y en la región de la Amazonía, que obtuvo un valor promedio de 0,46, en donde los departamentos con menor desempeño fueron Guainía con un valor de 0,28 y Amazonas con un valor de 0,32, mientras que el que obtuvo un mejor desempeño fue Guaviare con un valor de 0,61.

Para la región de Orinoquía se obtuvo un valor 0,55, en donde Vichada fue el departamento con menor desempeño con un valor de 0,51 mientras que Meta fue el mejor con un valor de 0,55. Una posible razón por la que las regiones de Amazonía y la región Pacífica presentaron menor desempeño es porque aquellas zonas son donde confluyen pluviosidades altas o extensas planicies inundables con brechas de infraestructura, gobernanza y conectividad. A su vez, también aparecen muestras de bajo desempeño en el Caribe con un valor de 0,56, especialmente en el interior (Depresión Momposina) coherentes con exposición fluvial. Los niveles altos y medio altos se concentran en corredores urbanos andinos (obteniendo la región Andina un valor de 0,57), especialmente en Quindío con un valor de 0,65, Caldas y Huila con valores de 0,60. Esto puede

deberse a que esa región es donde se presenta mejores coberturas de servicios, capacidades institucionales y ecosistemas de datos que elevan las dimensiones de Infraestructura, Gobernanza e Inteligencia y Datos, compensando parcialmente la amenaza física.

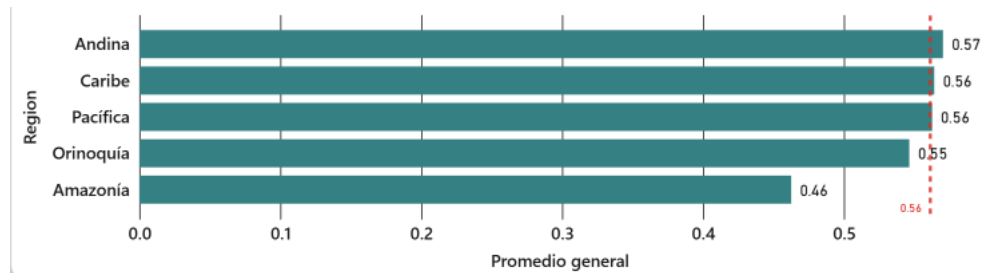


Figura 3. Promedio general por región. Fuente: Elaboración propia

A su vez, se pudo obtener un promedio para todo Colombia con un valor de 0,56 (que se puede observar como la línea punteada de color rojo en la figura 2). Es aquí donde se puede observar cómo se comporta cada región con respecto a ese promedio nacional, lo que concuerda con el análisis realizado en el párrafo anterior en donde la región Andina presenta mejor desempeño y la Amazonía el peor desempeño. Adicionalmente, gracias al análisis se pudo obtener un municipio representativo de cada nivel de desempeño a nivel nacional, así se encontró que Tierralta, Córdoba presenta el desempeño bajo; Caicedo, Antioquia el desempeño medio bajo; Moñitos, Córdoba el desempeño medio; Anapoima, Cundinamarca el desempeño medio alto y Sabaneta, Antioquia el desempeño Alto. Esto se logró al calcular el percentil 20 para el nivel más bajo, 40 para el nivel medio bajo y así sucesivamente hasta llegar al percentil 100 para el nivel alto, esto permitió obtener un valor que luego se utilizó para encontrar que municipio presentaba un valor de desempeño general igual o aproximado al valor obtenido en cada percentil.

Por otro lado, con los datos obtenidos se puede realizar un análisis por dimensión a nivel regional y departamental. A nivel regional se obtuvo lo siguiente:

- Para la dimensión de Arquitectura territorial, el promedio nacional se ubicó en 0,68, el cual sirve como referencia para comparar el desempeño de cada región. La región Amazónica, con un promedio de 0,71, alcanza el mejor desempeño a nivel nacional. Se puede deducir que su estructura territorial mantiene amplias coberturas naturales, baja densidad urbana y limitada ocupación de planicies de inundación, lo que

- favorece la regulación hídrica y la absorción del exceso pluvial. La región Andina, tuvo un promedio de 0,69, lo que puede deberse a que presenta avances importantes en planeación urbana y en la incorporación de criterios de ordenamiento territorial y gestión del riesgo en los instrumentos locales. Sin embargo, dentro de la misma región se presentan municipios con niveles de desempeño que varían significativamente unos de otros, pues mientras algunos municipios metropolitanos pueden presentar buenas prácticas de planificación y espacio público verde como Medellín, otros registran valores bajos que puede deberse a la urbanización en laderas inestables y ocupación de rondas hídricas, lo que reduce la capacidad de drenaje natural y aumenta la exposición a inundaciones pluviales. La región Caribe presenta un valor de 0,65, de este resultado se puede analizar que esta zona presenta una estructura urbana altamente concentrada sobre planicies costeras, que junto con la reducción de coberturas vegetales protectoras contribuyen a una mayor impermeabilización del suelo y en consecuencia, a un incremento de la escorrentía y la frecuencia de inundaciones. En esta región, el desajuste entre la expansión urbana y la capacidad de drenaje, como puede ser el caso de Barranquilla, es uno de los principales factores que explica el puntaje obtenido. Finalmente, para la región de Orinoquía, se obtuvo un valor de 0,62, que presenta el desempeño más bajo del país en esta dimensión. Este valor puede ser resultado de que los municipios presenten débil articulación entre ordenamiento urbano y dinámicas hidrológicas, reflejada en una ocupación dispersa sobre terrenos planos y en la falta de zonificación efectiva en torno a las rondas hídricas. Estos resultados se refuerzan al analizar la distribución porcentual de municipios por nivel de desempeño. Mientras que en las regiones Amazónica y Pacífica predominan municipios en los niveles medio y medio-alto, las regiones Caribe y Orinoquía concentran la mayor proporción en niveles bajo y nulo, lo que evidencia una vulnerabilidad asociada a la ausencia de planificación y a la degradación ecosistémica. Por otro lado, la región Andina presenta la mayor dispersión de municipios por nivel.
- Para la dimensión de Capacidad sociocomunitaria, el desempeño nacional se ubicó en 0,73. La región Andina obtuvo el nivel más elevado con un valor de 0,76, evidenciando mayores niveles de organización social, menor pobreza

multidimensional y mejor capacidad adaptativa ante el cambio climático. La región Orinoquía ocupa el segundo lugar con un promedio de 0,72, lo que sugiere cohesión en la estructura social y menor exposición poblacional favoreciendo la respuesta colectiva, sin embargo, persisten limitaciones en recursos técnicos y educativos. La región pacífica obtuvo un valor de 0,70, lo que sugiere comunidades con fuerte tejido social, pero con vulnerabilidades derivadas de pobreza y déficit habitacional. La región Caribe (con un valor de 0,65) muestra un nivel de desempeño medio-bajo, caracterizado por una fragmentación en las redes comunitarias y una menor participación en procesos institucionales de prevención y gestión del riesgo. Aquí la desigualdad social puede actuar como limitante de formación de capital social y debilitar la confianza en las instituciones. Por último, la región Amazónica presentó en nivel más bajo a nivel nacional con un valor de 0,64 reflejando condiciones socioeconómicas precarias y baja cobertura educativa que limitan la adaptación local. El análisis del porcentaje de municipios por nivel de desempeño refuerza estas tendencias: la región Andina concentra la mayor proporción de municipios con niveles altos y medio altos, evidenciando capacidades comunitarias más consolidadas; la Orinoquía y la Pacífica muestran predominio de niveles medios y medio bajos mientras que las regiones Caribe y Amazónica agrupan la mayor cantidad de municipios en niveles bajos y nulos, reflejando brechas sociales, económicas y territoriales que dificultan la acción colectiva.

- La dimensión de Gobernanza obtuvo un valor nacional de 0,25, lo que refleja una capacidad institucional y colaborativa limitada en la gestión del riesgo de inundaciones. La región Orinoquía obtuvo el valor más alto de 0,31, lo que puede asociarse a avances en inversión pública y en la formulación de estrategias municipales de respuesta a emergencias. La región Pacífica, Amazónica y Andina obtuvieron un valor de 0,26. En el caso de la región Pacífica puede haber una limitada formalización institucional y falta de cooperación de las comunidades con las instituciones de gestión del riesgo, mientras que en la región Andina se presenta un panorama mixto pues algunos municipios cuentan con una institucionalidad sólida y marcos normativos avanzados, como puede ser el caso de Medellín, mientras que otros municipios presentan fragmentación en la coordinación entre

niveles de gobierno y participación de la comunidad. El resultado de la región Amazónica puede deberse a la falta de estructuras formales. Por otro lado, la región Caribe presentó el valor más bajo de 0,23, reflejando debilidades en la articulación institucional y en la participación o presencia de consejos de gestión del riesgo. En muchos municipios caribeños, los procesos de planeación son fragmentados, con baja participación comunitaria y una gobernanza centrada en la respuesta post-desastre más que en la prevención o planificación anticipada. El análisis del porcentaje de municipios por nivel de desempeño refuerza estas tendencias: las regiones Orinoquía y Pacífica concentran la mayor proporción de municipios en niveles medio y medio-bajo, lo que evidencia cierto grado de institucionalidad funcional, aunque aún con vacíos en participación y seguimiento. La región Andina presenta una distribución amplia entre niveles medio, bajo y nulo, mostrando diferencias marcadas entre territorios con buena capacidad institucional y otros con bajos niveles en gestión y articulación del riesgo. Finalmente, las regiones Caribe y Amazónica agrupan la mayor cantidad de municipios en niveles bajo y nulo, lo que refleja limitaciones estructurales en la gobernanza territorial y en la ejecución de políticas de gestión del riesgo de inundaciones.

- Para la dimensión de Hidrología Dinámica, el desempeño nacional se ubicó en 0,73. La región Amazónica obtuvo el valor más alto con 0,80, lo que indica un comportamiento hidrológico favorable, con baja ocurrencia de eventos extremos y un equilibrio natural entre precipitación, drenaje y retención del agua. Este resultado puede explicarse por la presencia de amplias coberturas vegetales, humedales y cauces fluviales con alta capacidad de regulación, que mitigan la velocidad y profundidad de las inundaciones. La región Caribe alcanzó un promedio de 0,79, situándose en el segundo lugar. A pesar de su histórica exposición a inundaciones, los resultados sugieren una reducción en la frecuencia y severidad de eventos recientes, posiblemente asociada al fortalecimiento de obras de protección en algunos municipios. Sin embargo, la región continúa siendo vulnerable a fenómenos como La Niña, que cada vez presenta mayor impacto y al ascenso del nivel del mar, por lo que el desempeño alto refleja más una condición hidrológica estable que la ausencia total de riesgo. La región Orinoquía registró un valor de 0,74, lo que

evidencia un régimen hidrológico equilibrado y baja densidad de eventos de inundación. Sus extensas planicies permiten la dispersión natural del agua durante las crecientes, reduciendo la presión sobre los sistemas urbanos. No obstante, el cambio en los usos del suelo y la expansión agroindustrial podrían alterar progresivamente estos equilibrios. La región Pacífica, con un promedio de 0,73, mantiene un comportamiento similar al nacional. Este valor puede ser un reflejo de la ubicación de la región al ser una de las zonas más lluviosas del mundo. Por último, la región Andina presentó el valor más bajo con 0,71, reflejando una mayor frecuencia de eventos hidrometeorológicos y una presión significativa sobre el sistema natural de drenaje, debido a la impermeabilización del suelo urbano y la ocupación de zonas de ronda, generando condiciones propicias para la rápida acumulación de caudales y aumentando así la probabilidad de inundaciones pluviales y fluviales. El análisis del porcentaje de municipios por nivel de desempeño confirma estas tendencias: las regiones Amazónica y Caribe concentran la mayor proporción de municipios con niveles altos y medio-altos, las regiones Orinoquía y Pacífica se ubican en niveles medios, mientras que la región Andina presenta la mayor proporción de municipios en niveles medio bajo y bajo, reflejando una mayor recurrencia de inundaciones y la influencia directa de factores topográficos y urbanos en la dinámica hídrica.

- La dimensión de Infraestructura híbrida presentó un valor nacional de 0,49, evidenciando desigualdades regionales con respecto a la cobertura de servicios básicos relacionados con la gestión del agua y el saneamiento. La región Caribe obtuvo el valor más alto de 0,55, explicando una cobertura relativamente buena comparado con las otras regiones, en sus principales centros urbanos. Sin embargo, en muchos municipios costeros se presenta una falta de educación y cultura con respecto a las basuras en las rondas hídricas o en los sistemas de drenaje, ocasionado el taponamiento de estos y potenciando así la ocurrencia de inundaciones. La región Amazónica obtuvo un valor de 0,54, en donde se observa un resultado similar al de la región Caribe. La región pacífica alcanzó un valor de 0,51, indicando cobertura decente de acueducto, pero fallas importantes en la de alcantarillado y aseo. Las lluvias constantes y la alta pluviosidad de la región exigen sistemas de drenaje más

eficientes, pero la falta de mantenimiento y la informalidad en la prestación de servicios limitan su efectividad. En la región Andina se obtuvo un valor de 0,47, evidenciando cobertura desigual a lo largo de sus municipios en cuestión de servicios de agua y saneamiento. Este valor puede ser resultado de la sobrecarga de los sistemas urbanos al concentrar la mayor cantidad de población en las ciudades principales, mientras que en las zonas rurales hay ciertas limitaciones en la recolección de residuos, lo que puede afectar la capacidad de control frente a inundaciones. Finalmente, la región Orinoquía presentó el desempeño más bajo con un valor de 0,46, debido a una cobertura más baja de acueducto, alcantarillado y aseo. El análisis del porcentaje de municipios por nivel de desempeño confirma estas tendencias: las regiones Caribe y Amazónica concentran la mayor proporción de municipios con niveles medio y medio-alto, evidenciando coberturas más consolidadas en servicios esenciales; la región Pacífica mantiene una distribución equilibrada entre niveles medio y bajo, mientras que las regiones Andina y Orinoquía presentan la mayor proporción de municipios en niveles medio bajo y nulo, mostrando limitaciones estructurales en la expansión, mantenimiento y sostenibilidad de la infraestructura de agua, saneamiento y aseo.

- Para la dimensión de Inteligencia y Datos, el desempeño nacional se ubicó en 0,53, reflejando una capacidad media de los territorios para generar y utilizar información relevante en la gestión del riesgo de inundaciones. La región Andina obtuvo el valor más alto con 0,55, lo que evidencia una mejor infraestructura tecnológica y conectividad que facilita el acceso a datos y la operación de sistemas de alerta temprana. La región Pacífica alcanzó un valor de 0,54, mostrando avances en conectividad urbana, pero con brechas marcadas en municipios rurales. La región Caribe con un valor de 0,53, se mantiene en el promedio nacional, con buenas redes de comunicación en zonas urbanas. La región Orinoquía presentó un desempeño medio bajo de 0,51, debido a la escasa cobertura de internet y la limitada integración de sistemas de información locales. Finalmente, la región Amazónica registró el valor más bajo con 0,36, reflejando una amplia brecha digital y dificultades de acceso a información en tiempo real. En general, la región Andina concentra la mayor proporción de municipios con niveles medio y medio-alto, mientras que las

regiones Amazónica y Orinoquía agrupan la mayoría en niveles bajos, evidenciando disparidades significativas en la infraestructura informacional del país.

Finalmente, se realizaron una serie de gráficos de correlación entre las dimensiones que podrían presentar más relación una con otra, con el fin de evaluar su comportamiento por municipio.

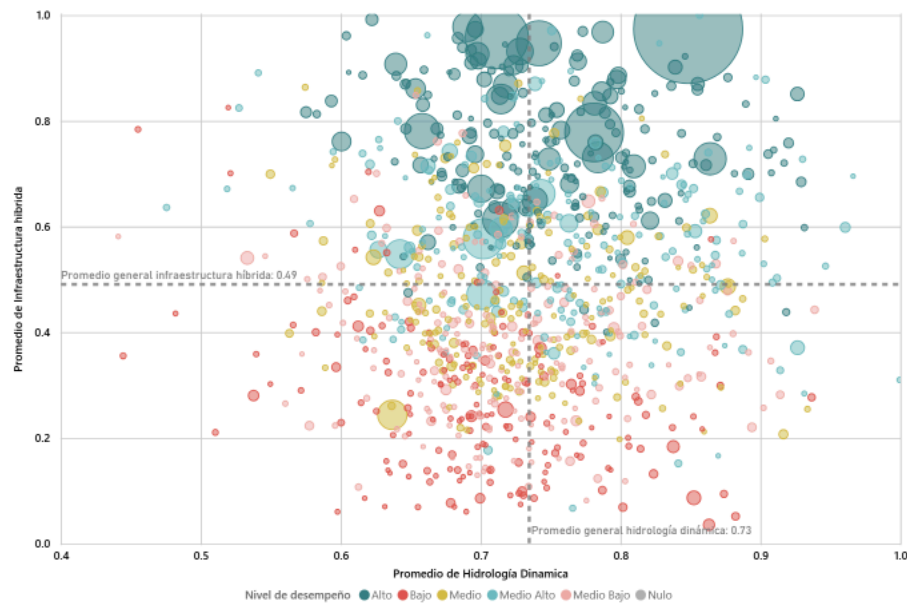


Figura 4. Correlación entre Hidrología Dinámica e Infraestructura híbrida por municipio. Fuente: Elaboración propia

La figura 3 presenta la correlación entre la Hidrología Dinámica y la Infraestructura Híbrida por municipio. En general, se puede observar datos dispersos, pero con cierta tendencia positiva, en donde los territorios con mejores condiciones hidrológicas, es decir que presentaron menor recurrencia de inundaciones y mayor equilibrio en la esorrentía, también presentan mayor cobertura en acueducto, alcantarillado y aseo. Esto evidencia que la consolidación de infraestructura básica contribuye a estabilizar el comportamiento hidrológico urbano y a reducir la exposición frente a eventos de inundación.

El tamaño de los puntos representa la población municipal, por lo que los círculos de mayor tamaño ubicados principalmente en el cuadrante superior derecho corresponden a ciudades capitales como Bogotá, Barranquilla, Medellín y Cali, las cuales combinan altos niveles de cobertura de servicios públicos con una gestión hidrológica más controlada. En contraste, los municipios con menor población y desempeño bajo o medio-bajo se agrupan en los cuadrantes inferiores, reflejando

deficiencias tanto en infraestructura como en capacidad de regulación hídrica. En conjunto, el gráfico confirma que existe una relación directa entre la robustez de la infraestructura urbana y la estabilidad hidrológica, donde los municipios más poblados y mejor equipados tienden a presentar un comportamiento más resiliente frente al riesgo de inundaciones.

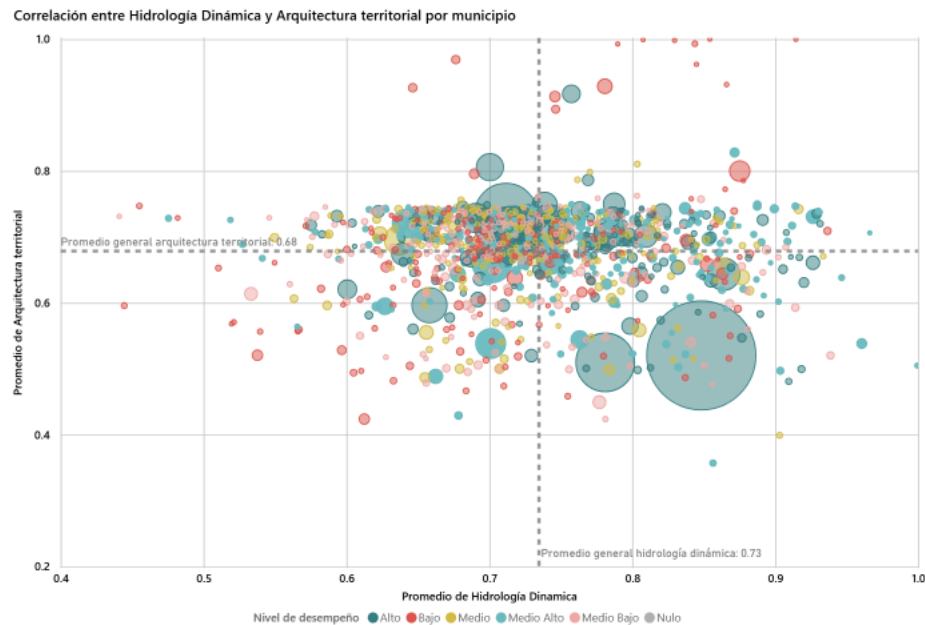


Figura 5. Correlación entre Hidrología Dinámica y Arquitectura territorial por municipio. Fuente: Elaboración propia

La figura 4 muestra la correlación entre la Hidrología Dinámica y la Arquitectura Territorial por municipio. En términos generales, se observa una tendencia estable y constante pero positiva, donde los municipios con mejor desempeño hidrológico, es decir, menor frecuencia de inundaciones y mayor equilibrio en la escorrentía, tienden a presentar también una estructura territorial más ordenada, con menor grado de impermeabilización, usos del suelo más compatibles con las rondas hídricas y mayor presencia de áreas verdes.

Los dos puntos con mayor tamaño en el cuadrante inferior derecho, corresponden a Bogotá y Cali, mientras que el punto grande en la parte superior izquierda representa a Medellín. Estas ciudades muestran comportamientos diferenciados: Bogotá y Cali mantienen un desempeño hidrológico favorable, pero enfrentan retos en la planificación del suelo urbano, mientras que Medellín presenta una estructura territorial más controlada, aunque con mayores limitaciones hidrológicas por su relieve. Asimismo, se destacan algunos municipios de la Amazonía, como Cacahual, La Guadalupe, San Felipe, Santa Cruz y Yavarate, que, a pesar de registrar desempeños bajos en otras

dimensiones, presentan valores altos en hidrología dinámica y arquitectura territorial. Este comportamiento refleja territorios con baja presión urbana, alta cobertura natural y ordenamiento del suelo en equilibrio con la dinámica ambiental, factores que contribuyen a reducir el riesgo de inundación de manera natural. En conjunto, el gráfico permite entender que la planificación territorial coherente con la estructura ecológica y la conservación de coberturas naturales es determinante para mantener la estabilidad hidrológica incluso en municipios con menor desarrollo institucional o económico.

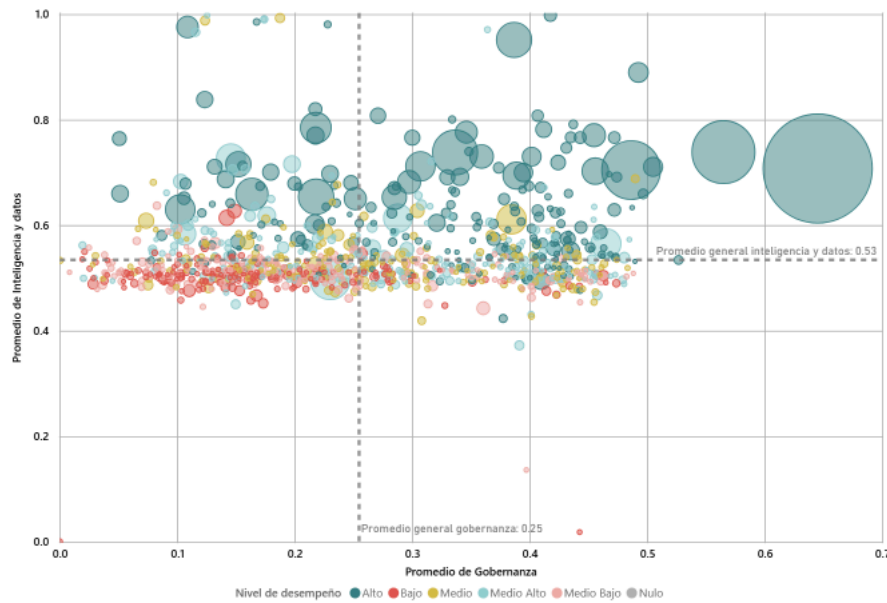


Figura 6. Correlación entre Gobernanza e Inteligencia y datos por municipio. Fuente: Elaboración propia

La figura 5 muestra la correlación entre la Gobernanza y la Inteligencia y Datos por municipio. Se observa una relación positiva, donde los municipios con mayores niveles de gobernanza, medidos por su inversión, fortalecimiento institucional y planificación del riesgo, presentan también una mejor capacidad de información y tecnológica, expresada en mayor conectividad y manejo de datos.

Los círculos de mayor tamaño ubicados en los cuadrantes superiores corresponden a ciudades capitales como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cúcuta, Popayán, entre otras, que combinan estructuras institucionales más sólidas con infraestructura digital más desarrollada. En contraste, los municipios con menor población y menor desempeño en ambas dimensiones se concentran en los cuadrantes inferiores, reflejando limitaciones tanto en la gestión institucional como en la

infraestructura de información y comunicación. Esto evidencia que la fortaleza institucional y la capacidad tecnológica avanzan de manera conjunta, y que las ciudades con mayor desarrollo administrativo y conectividad presentan mejores condiciones para la gestión inteligente del riesgo de inundaciones.

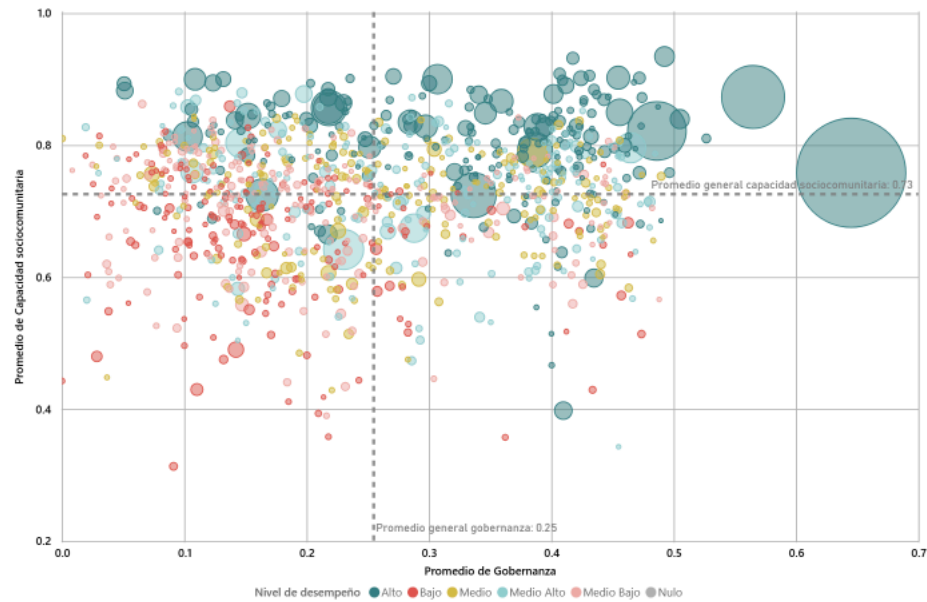


Figura 7. Correlación entre Gobernanza y Capacidad Sociocomunitaria por municipio. Fuente: Elaboración propia

La figura 6 muestra la correlación entre la Gobernanza y la Capacidad Sociocomunitaria por municipio. Se logra observar una tendencia un poco dispersa, en la que los territorios con mejores niveles de gobernanza, con mayor planificación, inversión y articulación institucional, también presentan comunidades más cohesionadas y resilientes frente a los eventos de inundación. Esto evidencia que la capacidad institucional y la fortaleza social avanzan de forma complementaria, pues donde existen estructuras de gobierno más estables, la población tiende a participar más activamente en procesos de gestión del riesgo.

Aquí se presenta resultado similares a los anteriores en donde se destacan en los cuadrantes superiores las ciudades capitales como Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla, que combinan una gobernanza consolidada con altos niveles de capital social y capacidad adaptativa. En contraste, los municipios con menor desempeño en ambas dimensiones se agrupan en los cuadrantes inferiores, reflejando limitaciones tanto en la gestión institucional como en la organización social, especialmente en territorios con mayores índices de pobreza y menor presencia del Estado. En

conjunto, el gráfico confirma que una gobernanza participativa y coordinada fortalece la capacidad sociocomunitaria, y que los territorios donde se integran instituciones y comunidades en torno a la gestión del riesgo presentan mejores condiciones de resiliencia colectiva.

En conclusión, los extremos por dimensión identifican palancas de acción: en donde la amenaza es relativamente contenida, pero fallan gobernanza y datos, la prioridad es institucional; donde la arquitectura territorial expone la zona y la infraestructura es débil, conviene combinar estrategias verdes, grises e híbridas; y donde las brechas son sociales, las medidas deben acoplarse con fortalecimiento comunitario, tal como proponen los Capítulos 1 y 2 de resultados.

5.4.2 Recomendaciones de política pública

Con base en el análisis realizado sobre la gestión sistémica de inundaciones en Colombia, se presentan a continuación una serie de recomendaciones de política pública dirigidas tanto al nivel nacional como al nivel municipal. Estas recomendaciones buscan fortalecer la resiliencia frente a inundaciones abarcando todas las dimensiones identificadas.

Dimensión	Nivel	Actor	Acción sugerida
Hidrología Dinámica	Nacional	<ul style="list-style-type: none"> • IDEAM • UNGRD • CAR • Alcaldías y gobernaciones • Empresas de servicios públicos 	Colombia ya cuenta con boletines hidrometeorológicos, así como con mapas de amenaza emitidos por entidades como el IDEAM y la UNGRD, por tanto, la prioridad está en mejorar su resolución y representatividad. Se recomienda ampliar y densificar la red de estaciones pluviométricas e hidrométricas en zonas con vacíos de datos, de modo que la malla cumpla densidades acordes con la complejidad territorial y los regímenes de lluvia. Esta expansión debe ir acompañada

			de calibración y mantenimiento de las estaciones, telemetría en tiempo real y controles de calidad para asegurar series continuas y trazables. Al obtener una red más robusta, se podrán actualizar umbrales de alerta, curvas IDF a partir de datos recientes, mejorar los modelos de pronóstico y publicar datos abiertos con metadatos completos, fortaleciendo la toma de decisiones en todo el país.
	Municipal	<ul style="list-style-type: none"> • Alcaldía municipal • CMGRD • UNGRD • Organismos de socorro • Operadores de telefonía • JAC • Instituciones educativas • Comunidad local • Secretaría de obras 	Los municipios deben implementar y complementar los sistemas de alerta temprana en el ámbito local, traduciendo las alertas nacionales en acciones concretas sobre el terreno. Esto implica establecer protocolos claros de comunicación a la población por medio de mensajes SMS o radio cuando se emitan alertas y realizar simulacros periódicos de inundación para preparar a la comunidad. La producción de información con la comunidad (mapeo participativo de puntos críticos de inundación, reportes ciudadanos de lluvia) va a mejorar la eficacia de las alertas al lograr que los mensajes sean comprendidos y atendidos más rápidamente. Asimismo, cada municipio debe contar con un plan de

			<p>emergencia actualizado frente a crecientes, donde se asignen responsabilidades locales y se definan rutas de evacuación y puntos seguros temporales. Es fundamental mantener operativas las infraestructuras de drenaje existentes como las alcantarillas con la debida limpieza y el mantenimiento rutinario, así como instalar sistemas sencillos de alerta in situ (reglas de nivel en ríos, alarmas) en zonas rurales o barrios cerca de ríos, de forma que la población reciba avisos inmediatos ante umbrales de peligro locales.</p>
Arquitectura territorial	Nacional	<ul style="list-style-type: none"> • Ministerio de Vivienda • Ministerio de Ambiente • Gobierno nacional • IGAC • DNP • CAR • Alcaldías y gobernaciones • IDEAM • UNGRD 	<p>Se deben fortalecer los instrumentos normativos de ordenamiento territorial para que incorporen explícitamente la gestión del riesgo de inundaciones. La Ley 1523 de 2012 establece que todos los niveles de gobierno integren la gestión del riesgo en la planificación del desarrollo y el ordenamiento del territorio [59], sin embargo, es necesario emitir lineamientos técnicos más detallados y ofrecer asistencia a los entes locales para su cumplimiento efectivo. El Gobierno nacional (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y Ministerio de Ambiente) puede</p>

			<p>proveer guías metodológicas unificadas para que los Planes de Ordenamiento Territorial municipales delimiten adecuadamente las zonas inundables y establezcan usos del suelo compatibles con la mitigación del riesgo. Debe exigirse la aplicación rigurosa del Decreto 2245 de 2017 sobre acotamiento de rondas hídricas, de forma que se conserve un espacio libre de urbanización junto a los cauces para mitigar desbordamientos. Igualmente, la autoridad nacional debe asegurar la disponibilidad de cartografía de amenaza actualizada como insumo obligatorio en la planificación. Esto permitirá que las decisiones de uso del suelo se basen en el conocimiento de las áreas de riesgo y eviten urbanizar en zonas de inundación recurrente.</p>
	Municipal	<ul style="list-style-type: none"> • Alcaldía municipal • CMGRD • CAR • Secretaría de planeación • DNP • Ministerio de Vivienda 	<p>Los municipios, a través de sus POT y planes sectoriales, deben orientar el uso del suelo para reducir el riesgo. Esto implica designar las zonas de alto riesgo de inundación como áreas no edificables o de uso restringido, y promover la reubicación gradual de asentamientos existentes en dichas zonas hacia sectores seguros. En el suelo urbano ya consolidado, las</p>

		<ul style="list-style-type: none"> • Secretaría de obras públicas • JAC • Empresas de servicios públicos • Curadurías urbanas 	<p>administraciones municipales han de impulsar un diseño urbano sensible al agua, que busque preservar y ampliar las áreas verdes y de infiltración (parques, rondas de ríos, humedales urbanos), controlar la expansión de superficies impermeables, e integrar sistemas de drenaje sostenible en los nuevos desarrollos, incluyéndolos en los códigos de urbanismo locales, evitando también que las nuevas obras agraven la exposición a inundaciones de una zona. Adicionalmente, cada municipio debe actualizar e implementar su Plan Municipal de Gestión del Riesgo, asegurando la incorporación de estudios detallados de amenaza por inundación y modelos hidrológicos locales que identifiquen los puntos críticos de escorrentía. De esta forma, las intervenciones de mitigación podrán priorizarse con criterio técnico, y las normas urbanísticas locales (usos de suelo, requisitos de urbanización) podrán condicionarse para evitar crear nueva vulnerabilidad en las áreas expuestas.</p>
Infraestructura híbrida	Nacional	<ul style="list-style-type: none"> • Gobierno nacional • Ministerio de hacienda 	<p>Es indispensable promover un enfoque de infraestructura híbrida en la gestión del agua para el control de inundaciones. El gobierno central debe</p>

		<ul style="list-style-type: none"> • DNP • Ministerio de vivienda • Ministerio de ambiente • UNGRD • IGAC • Universidades 	<p>desarrollar políticas que financien e incentiven a los entes territoriales en la implementación de este tipo de soluciones. A su vez, se deben actualizar las normas de diseño hidráulico nacionales para incluir opciones basadas en la naturaleza. Asimismo, se deben difundir guías técnicas y capacitar a ingenieros y urbanistas en el diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras híbridas, de manera que las entidades territoriales cuenten con conocimiento para implementarlas correctamente.</p>
	Municipal	<ul style="list-style-type: none"> • Secretaría de planeación • Secretaría de obras públicas • Empresas de servicios públicos • CMGRD • Alcaldía municipal • JAC 	<p>Las autoridades locales tienen la oportunidad de implementar directamente soluciones híbridas adaptadas a su contexto. En la planificación municipal de obras de drenaje y protección contra inundaciones, se recomienda que siempre se evalúen alternativas basadas en la naturaleza antes de optar exclusivamente por ampliaciones grises. Cada municipio debe incorporar en su Plan de Gestión del Riesgo local un portafolio de soluciones híbridas priorizadas, identificando dónde la infraestructura verde puede reducir la escorrentía y mejorar la infiltración, asimismo, debe</p>

			<p>prever el mantenimiento de estas obras para garantizar su funcionalidad a largo plazo. Cabe destacar la importancia de trabajar de la mano con las autoridades ambientales regionales en proyectos de restauración de ecosistemas aguas arriba (reforestación de cuencas, recuperación de humedales), de modo que se complemente la infraestructura gris de protección con la resiliencia natural del territorio.</p>
Gobernanza	Nacional	<ul style="list-style-type: none"> • UNGRD • DNP • Ministerio del interior • Ministerio de hacienda • CONPES • Gobierno nacional 	<p>La mejora de la gobernanza del riesgo de inundación requiere acciones decididas para coordinar actores y asegurar la ejecución de las políticas en todos los niveles. Se debe fortalecer el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) asegurando financiamiento suficiente y sostenido para las actividades de reducción del riesgo y no solo para la atención de emergencias. En particular, deben garantizarse aportes constantes al Fondo Nacional de Gestión del Riesgo y mecanismos de cofinanciación que apoyen a departamentos y municipios en obras prioritarias de mitigación. La experiencia internacional mencionada en capítulos anteriores demuestra que</p>

			<p>con marcos institucionales sólidos y coordinados los resultados en gestión hídrica son sostenibles, mientras que la fragmentación y la desarticulación conducen a políticas poco eficaces. En consecuencia, los actores deben trabajar de manera integrada, estableciendo objetivos comunes y alineando programas e inversiones bajo una visión de resiliencia. Finalmente, se deben establecer indicadores de desempeño y mecanismos de rendición de cuentas que permitan monitorear los avances en la reducción del riesgo y así evaluar y ajustar las estrategias de manera transparente.</p>
	Municipal	<ul style="list-style-type: none"> • Alcaldía municipal • CMGRD • Secretaría de planeación • UNGRD • Empresas de servicios públicos • JAC 	<p>En el ámbito local, es fundamental fortalecer la institucionalidad y la participación para la gestión del riesgo de inundaciones. Cada municipio, conforme a la Ley 1523, debe tener activo su Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD) y contar con un plan municipal de gestión del riesgo, dichos mecanismos deben de articular a todas las dependencias locales y actores del territorio en las decisiones sobre reducción del riesgo. Es</p>

			<p>clave capacitar a los funcionarios locales en temas de cambio climático, ordenamiento resiliente y atención de emergencias para que incorporen el enfoque de riesgo en sus funciones cotidianas. Asimismo, se debe fortalecer la articulación con el nivel departamental y nacional, de modo que las políticas y apoyos de la Nación se traduzcan en acciones locales efectivas. Por último, se debe promover la participación ciudadana en la toma de decisiones locales sobre obras y planes de prevención. Una gestión inclusiva que integre a la comunidad tiende a lograr mayor legitimidad social y sostenibilidad en el tiempo, asegurando que incluso las intervenciones físicas más avanzadas cuenten con apoyo público y se mantengan en el largo plazo.</p>
Capacidad sociocomunitaria	Nacional	<ul style="list-style-type: none"> • UNGRD • Ministerio de educación • Ministerio de ambiente • MinTic • Ministerio del interior • Instituciones educativas 	<p>Las políticas de reducción del riesgo de inundación deben acompañarse de estrategias para fortalecer la capacidad social y comunitaria frente a desastres. El Gobierno central, a través de la UNGRD, el Ministerio de Educación y otros entes, debería implementar programas permanentes de educación y sensibilización pública sobre el riesgo de inundaciones. Esto incluye</p>

		<ul style="list-style-type: none"> • Alcaldías y gobernaciones 	<p>incorporar contenidos de gestión del riesgo en la agenda escolar, campañas en medios de comunicación sobre qué hacer antes, durante y después de una inundación, y otras iniciativas de concientización comunitaria. Se deben destinar fondos para apoyar proyectos comunitarios de gestión del riesgo liderados por la ciudadanía, aprovechando el potencial de las juntas de acción comunal y organizaciones locales. Asimismo, se deben adoptar enfoques diferenciales para poblaciones vulnerables (niños, tercera edad, personas con discapacidad) y asegurar que las medidas de reducción del riesgo apliquen para toda la población y sean inclusivas y equitativas.</p>
	Municipal	<ul style="list-style-type: none"> • Alcaldía municipal • CMGRD • JAC • Comunidad local • Organismos de socorro • Secretaría de planeación • Secretaría de gobierno 	<p>Los municipios deben empoderar a la comunidad como actor activo en la prevención y respuesta a inundaciones. Se recomienda conformar Comités Comunitarios de Emergencia en los barrios más expuestos, integrados al CMGRD local y entrenados para actuar coordinadamente en caso de evento. Es esencial socializar la información de riesgo con la ciudadanía en lenguaje claro, por medio de talleres,</p>

		<ul style="list-style-type: none">• Centros educativos• Empresas de servicios públicos	<p>material gráfico y señalización visible en las zonas peligrosas. También se debe inculcar la autoprotección ciudadana con medidas básicas: mantener limpias las alcantarillas, no arrojar basura ni escombros a los cauces ni drenajes y estar atentos a las alertas para evacuar cuando sea necesario. Las alcaldías, por su parte, deben vigilar y evitar la ocupación de nuevas viviendas en zonas inundables, ya que los asentamientos en áreas de alto riesgo aumentan dramáticamente la vulnerabilidad de esas familias. En paralelo, es conveniente realizar simulacros comunitarios periódicos de evacuación por inundación, de modo que los vecinos sepan cómo actuar y a dónde dirigirse en una emergencia real. Finalmente, aprovechar el conocimiento local y la retroalimentación de la comunidad ayudará a mejorar las estrategias: encuestas y reuniones posteriores a eventos de inundación permiten aprender de la experiencia vivida y ajustar los planes de respuesta según las lecciones aprendidas en el territorio.</p>
--	--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Inteligencia y datos	Nacional	<ul style="list-style-type: none"> • MinTic • UNGRD • DNP • IDEAM • IGAC • DANE 	<p>En la era digital, la gestión del riesgo de inundaciones debe apoyarse en un sólido sistema de inteligencia de datos. Es imperativo consolidar un sistema donde integre en una plataforma única los datos de amenazas, vulnerabilidad, exposición y eventos históricos aportados por todas las entidades. Este sistema debe ser interoperable y de acceso abierto, garantizando la transparencia y el intercambio ágil de información. También se debe invertir en tecnologías de información geográfica (SIG) y modelación: por ejemplo, desarrollar modelos nacionales de predicción de inundaciones y tableros en tiempo real que integren alertas meteorológicas, niveles de ríos y reportes de campo. Estas herramientas tecnológicas, junto con un mantenimiento continuo de bases de datos actualizadas, permitirán entender mejor la evolución del riesgo y orientar la toma de decisiones basada en evidencia.</p>
	Municipal	<ul style="list-style-type: none"> • CMGRD • Secretaría de planeación • Secretaría de obras públicas 	<p>Los municipios deben aprovechar la información disponible y contribuir a la inteligencia colectiva de riesgo. Se recomienda fortalecer las unidades locales de gestión del riesgo,</p>

		<ul style="list-style-type: none"> • Empresas de servicios públicos • Alcaldía municipal • Medios locales de comunicación 	<p>dotándolas de personal capacitado en SIG y análisis de datos, de modo que dichos equipos alimenten la plataforma nacional con datos de detalle y aprovechen la información disponible en su planificación. La información de riesgo solo cumple su propósito si es entendida y utilizada por la comunidad, por tanto, los gobiernos municipales deben divulgar los datos de riesgo en formatos comprensibles (mapas simplificados, infografías, boletines) y recoger la retroalimentación ciudadana sobre su utilidad práctica.</p>
--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tabla 15. Recomendaciones de política pública por dimensión. Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Para concluir, las evidencias reunidas en esta investigación confirman que la gestión de inundaciones en Colombia exige un enfoque sistémico e inteligente que articule, sin fragmentación, la hidrología dinámica, la arquitectura territorial, la infraestructura, la gobernanza, la capacidad sociocomunitaria y la inteligencia de datos. El marco del Capítulo 1 permitió entender cada dimensión con definiciones de sus indicadores, métricas y umbrales comparables, cumpliendo con el objetivo 1 del trabajo. El Capítulo 2 tradujo esa lectura en rutas de intervención grises, verdes, híbridas y socio-institucionales con criterios de selección, cumpliendo con el objetivo 2. Al llevar este análisis a escala municipal en el caso de estudio, se logró cumplir con el tercer objetivo al demostrar que es posible sintetizar el desempeño relativo, proporcionar los resultados en un tablero interactivo de visualización, revelando patrones geográficos de vulnerabilidad y formas de acción concretas sin sustituir los diagnósticos locales. Además, se logró evidenciar el enfoque sistémico de la gestión del riesgo, al presentar un diagrama causal que explique las interacciones y dependencias entre las dimensiones y variables que las componen.

En términos espaciales, el patrón general sugiere desempeños más bajos concentrados en el Pacífico y en grandes áreas de Amazonía-Orinoquía, donde confluyen pluviosidades altas o planicies inundables con brechas de infraestructura, gobernanza y conectividad de datos, también aparecen rezagos en la depresión Momposina y otros tramos de la zona del Magdalena-Cauca. En contraste, corredores urbanos andinos tienden a presentar mejores resultados relativos por la suma de coberturas de servicios, mayores capacidades institucionales y ecosistemas de información más robustos, que compensan parcialmente la amenaza física.

El análisis por dimensión presenta aportes clave. En Hidrología Dinámica, los mejores perfiles combinan menor extensión territorial bajo amenaza hidrometeorológica, menor recurrencia de eventos y escenarios de diseño con velocidades y profundidades menos críticas, además de regímenes de lluvia menos propensos a escorrentías concentradas, por el contrario, los perfiles más débiles reflejan el patrón opuesto. En Arquitectura Territorial, los casos favorables conservan humedales y planicies de inundación disminuyendo así la escorrentía superficial, mientras que los desfavorables revelan ocupación de zonas inundables e impermeabilización que agudiza picos de caudal. En Infraestructura Híbrida, mejores coberturas de acueducto, alcantarillado y aseo, si son

bien operadas y mantenidas, reducen encharcamientos y taponamientos, mientras que los déficits agravan las inundaciones urbanas. En Capacidad Sociocomunitaria, mayor capacidad adaptativa, menor sensibilidad y menores tasas de afectación moderan daños ante amenazas semejantes, en cambio, vulnerabilidades sociales los amplifican. En Gobernanza, la inversión sostenida y el equilibrio entre conocimiento, fortalecimiento y reducción del riesgo se traducen en anticipación y ejecución, por el contrario, la ausencia de estos elementos se asocia a respuestas reactivas. En Inteligencia y Datos, la conectividad y la trazabilidad de eventos habilitan alerta, priorización y aprendizaje, mientras que las brechas de datos dificultan incluso acciones básicas.

De lo anterior se puede llegar a dos conclusiones. Primero, la coherencia interdimensional es crítica pues una infraestructura urbana sólida no compensa por sí sola una arquitectura territorial adversa, y un territorio con baja amenaza puede degradarse si fallan gobernanza y datos, por tanto, la mejora sistémica exige alinear uso del suelo, servicios, capacidades sociales e institucionalidad. Segundo, la inteligencia de datos y la gobernanza actúan como habilitadores del resto, ya que donde hay conectividad, registro y estructuras de decisión activas, la anticipación mejora y la inversión (gris, verde o híbrida) se prioriza con mayor retorno social.

Esta investigación es útil como un primer acercamiento, pero debe leerse con márgenes explícitos de incertidumbre. La base integra series con vigencias de fechas variadas (algunos indicadores con varios años, otros con un único dato reciente), lo que introduce ciertos desfases puesto que hay municipios con información faltante, recurriendo así a aproximaciones cuando no se encontraban datos. Además, el cambio climático está alterando patrones hidrometeorológicos, causando que territorios con baja pluviosidad histórica enfrenten episodios intensos recientes, de modo que la amenaza actual puede estar subestimada si se infiere desde series pasadas. Aun así, estos límites no invalidan los hallazgos, por el contrario, señalan con precisión dónde robustecer datos, actualizar umbrales y afinar mediciones locales.

Finalmente, los resultados respaldan la pertinencia del modelo propuesto: el Capítulo 1 ofrece una guía clara de qué medir, cómo y con qué umbrales, el Capítulo 2 organiza criterios de selección de estrategias según contexto y el caso de estudio, apoyado en indicadores nacionales y métricas geoespaciales, permite priorizar territorios y orientar la combinación de soluciones. La ruta para reducir pérdidas humanas y materiales pasa por densificar y mantener redes de observación en zonas con vacíos, actualizar información y escenarios, consolidar ordenamiento resiliente que no

crea nuevo riesgo, desplegar infraestructura híbrida mantenida en el tiempo y fortalecer la gobernanza y la cultura del dato. Esa alineación, técnica, territorial, social e institucional es la condición para transitar de la reacción a la anticipación y construir resiliencia frente a inundaciones en el país.

REFERENCIAS

- [1] D. Dodman *et al.*, “Cities, Settlements and Key Infrastructure,” in *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, Eds., Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022, ch. 6, pp. 907–1040. doi: 10.1017/9781009325844.008.
- [2] UNGRD, “Valoración de daños y pérdidas: ola invernal en Colombia 2010–2011,” Bogotá, D.C., Colombia, 2012. Accessed: Oct. 29, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/bitstream/handle/20.500.11762/19331/valoraciondedanosyperdidas-olainvernal2010-2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] D. H. Meadows, *Thinking in Systems: A Primer*, 1st edition. White River Junction, Vermont, USA: Chelsea Green Publishing, 2008. Accessed: Sep. 09, 2025. [Online]. Available: <https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/climate-communications/psychology-amp-behavior/Meadows-2008.-Thinking-in-Systems.pdf>
- [4] C. Yang, “Application and Assessment of GIS Technology in Flash Flood Risk Management,” *Sustainability in Environment*, vol. 9, no. 1, p. p26, Jan. 2024, doi: 10.22158/se.v9n1p26.
- [5] K. Ann. Naylor, *Blueprint for acceleration : sustainable development goal 6 synthesis report on water and sanitation, 2023*. New York, United States of America: United Nations, 2023. Accessed: Aug. 31, 2025. [Online]. Available: https://digitallibrary.un.org/record/4030567/files/1391644_EN.pdf

- [6] F. Curci and D. Chiffi, *Fragility and antifragility in cities and regions: Space, uncertainty and inequality*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Ltd., 2024. doi: 10.4337/9781035312559.
- [7] J. Ayala-García and K. Ospino-Ramos, “Desastres naturales en Colombia: un análisis regional,” *Documentos de trabajo sobre economía regional y urbana*, Jul. 2023.
- [8] D. Tinjacá, “Chocó bajo el agua: las lluvias asolan la zona más empobrecida de Colombia,” *France 24*, Nov. 2024. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.france24.com/es/am%C3%A9rica-latina/20241111-el-choc%C3%B3-bajo-el-agua-la-emergencia-que-asola-la-zona-m%C3%A1s-empobrecida-de-colombia>
- [9] S. León, “La segunda temporada de lluvias en Colombia ya deja 167 municipios afectados: Antioquia es el más golpeado con el 26,2 % (127 casos) de 484 incidentes,” *El Tiempo*, Oct. 2025. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/la-segunda-temporada-de-lluvias-en-colombia-ya-deja-167-municipios-afectados-antioquia-es-el-mas-golpeado-con-el-26-2-127-casos-de-484-incidentes-3499769>
- [10] J. Barrios, “Se agudiza la crisis en La Mojana por inundaciones: líderes y autoridades claman ayuda urgente al gobierno nacional,” *El Tiempo*, Aug. 2025. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/se-agudiza-la-crisis-en-la-mojana-por-inundaciones-lideres-y-autoridades-claman-ayuda-urgente-al-gobierno-nacional-3483515>
- [11] M. Bleger, “Inundaciones en Colombia: causas y relación con el cambio climático - Cambio,” *Somos el cambio*. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://cambio.com.co/articulo/inundaciones-en-colombia-causas-y-consecuencias-crisis-climatica/>

- [12] K. Cárdenas, “Vista de ANÁLISIS GENERAL DE LA GESTIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN COLOMBIA,” *Revista científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad CAS*, vol. Vol. 4, N°01, Aug. 2018. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/335841/20791463>
- [13] C. Dieperink *et al.*, “Managing urban flood resilience as a multilevel governance challenge: an analysis of required multilevel coordination mechanisms,” *Ecology and Society*, Published online: Feb 26, 2018 | doi:10.5751/ES-09962-230131, vol. 23, no. 1, Feb. 2018, doi: 10.5751/ES-09962-230131.
- [14] Y. A. Abebe, A. Ghorbani, I. Nikolic, Z. Vojinovic, and A. Sanchez, “A coupled flood-agent-institution modelling (CLAIM) framework for urban flood risk management,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 111, pp. 483–492, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.ENVSOFT.2018.10.015.
- [15] D. Hegger, M. Alexander, T. Raadgever, S. Priest, and S. Bruzzone, “Shaping flood risk governance through science-policy interfaces: Insights from England, France and the Netherlands,” *Environ Sci Policy*, vol. 106, pp. 157–165, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.ENVSCI.2020.02.002.
- [16] Z. Vojinovic *et al.*, “Effectiveness of small- and large-scale Nature-Based Solutions for flood mitigation: The case of Ayutthaya, Thailand,” *Science of The Total Environment*, vol. 789, p. 147725, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.147725.
- [17] World Bank, “Implementing nature-based flood protection: Principles and implementation guidance.” World Bank. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.gfdr.org/en/publication/implementing-nature-based-flood-protection>
- [18] C. S. S. Ferreira, S. Mourato, M. Kasanin-Grubin, A. J. D. Ferreira, G. Destouni, and Z. Kalantari, “Effectiveness of Nature-Based Solutions in Mitigating Flood

Hazard in a Mediterranean Peri-Urban Catchment,” vol. 12, 2020, doi:
10.3390/w12102893.

- [19] S. Wang, J. Wang, K. Xin, H. Yan, S. Li, and T. Tao, “Urban flood modeling with a novel coupling method of surface and sewer hydrodynamic processes,” *Water Science and Technology*, vol. 89, no. 11, pp. 3021–3034, Jun. 2024, doi: 10.2166/WST.2024.172.
- [20] E. OSTROM, *EL GOBIERNO DE LOS BIENES COMUNES: La evolución de las instituciones de acción colectiva*. the Press Syndicate of the University of Cambridge, 1990.
- [21] H. Mees, A. Crabbé, and C. Suykens, “Belgian flood risk governance: explaining the dynamics within a fragmented governance arrangement,” 2017, doi: 10.1111/jfr3.12330.
- [22] F. Klijn, N. Asselman, and D. Wagenaar, “Room for Rivers: Risk Reduction by Enhancing the Flood Conveyance Capacity of The Netherlands’ Large Rivers,” *Geosciences 2018, Vol. 8, Page 224*, vol. 8, no. 6, p. 224, Jun. 2018, doi: 10.3390/GEOSCIENCES8060224.
- [23] The city of Copenhagen, “The City of Copenhagen Cloudburst Management Plan 2012,” The city of Copenhagen. Accessed: Oct. 29, 2025. [Online]. Available: <https://international.kk.dk/sites/default/files/2021-09/Cloudburst%20Management%20plan%202010.pdf>
- [24] Q. Li, F. Wang, Y. Yu, Z. Huang, M. Li, and Y. Guan, “Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China,” *J Environ Manage*, vol. 231, pp. 10–20, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2018.10.024.
- [25] G. Ziervogel, J. Waddell, W. Smit, and A. Taylor, “Flooding in Cape Town’s informal settlements: Barriers to collaborative urban risk governance,” *South*

African Geographical Journal, vol. 98, no. 1, pp. 1–20, Jan. 2016, doi: 10.1080/03736245.2014.924867.

- [26] I. Douglas, K. Alam, M. Maghenda, Y. McDonnell, L. Mclean, and J. Campbell, “Unjust waters: Climate change, flooding and the urban poor in Africa,” *Environ Urban*, vol. 20, no. 1, pp. 187–205, Apr. 2008, doi: 10.1177/0956247808089156.
- [27] Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, and Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, *DECLARACIÓN DE IMPORTANCIA ESTRATÉGICA REGIONAL DEL PROYECTO DE INVERSIÓN ESTUDIOS, DISEÑOS A DETALLE Y CONSTRUCCIÓN DE OBRAS DE PROTECCIÓN Y DINÁMICAS HIDRÁULICAS EN LOS DEPARTAMENTOS DE SUCRE, CÓRDOBA, BOLÍVAR Y ANTIOQUIA Y DEL PROYECTO DE INVERSIÓN NAC....* 2022. Accessed: Oct. 29, 2025. [Online]. Available: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4076.pdf>
- [28] Departamento Nacional de Planeación *et al.*, *LA MOJANA: TERRITORIO RESILIENTE, SOSTENIBLE, PRODUCTIVO Y COMPETITIVO*. 2022. Accessed: Oct. 29, 2025. [Online]. Available: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4084.pdf>
- [29] Congreso de Colombia, *Ley 1523 de 2012*. Colombia: Función Pública, 2012. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- [30] Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, *PLAN NACIONAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES*. Colombia: Portal Gestión del Riesgo, 2024. [Online]. Available: www.gestiondelriesgo.gov.co
- [31] Presidente de la República de Colombia, *Decreto 2157 de 2017*. Colombia: Función Pública, 2017. Accessed: Oct. 28, 2025. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=199583>

- [32] “TerriData :: DNP.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/descargas>
- [33] “Catálogo | Datos Abiertos Colombia.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.datos.gov.co/browse?limitTo=datasets&sortBy=relevance&pageSize=20&category=Ambiente+y+Desarrollo+Sostenible>
- [34] “Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- [35] “DANE - Pobreza multidimensional.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-multidimensional>
- [36] “DANE - Necesidades básicas insatisfechas (NBI).” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>
- [37] “Límites - Colombia en mapas.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?u=0&t=29>
- [38] “Datos Abiertos Cartografía y Geografía | GEOPORTAL.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- [39] I. Maddox, “Three Common Types of Flood Explained,” Intermap. Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.intermap.com/risks-of-hazard-blog/three-common-types-of-flood-explained>
- [40] United Nations, “Aplicación de datos del mes: Inundaciones Fluviales | UN-SPIDER Knowledge Portal.” Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.un-spider.org/es/links-and-resources/data-sources/daotm-river-floods>

- [41] NNSL, “Severe Weather 101: Flood Types,” NOAA National Severe Storms Laboratory. Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/floods/types/>
- [42] IDIGER, “¿Qué son las avenidas torrenciales?” Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.idiger.gov.co/escenarios-de-riesgo/riesgo-avenidas-torrenciales/que-son>
- [43] World Meteorological Organization, “Flash Flood Guidance System with Global Coverage (FFGS).” Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://wmo.int/projects/ffgs>
- [44] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Humedales.” Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos/ecosistemas-estrategicos/humedales>
- [45] C. L. Arnold and & C. J. Gibbons, “Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator,” *Journal of the American Planning Association*, vol. 62, no. 2, pp. 243–258, 1996, doi: 10.1080/01944369608975688.
- [46] C. R. Jacobson, “Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review,” *J Environ Manage*, vol. 92, no. 6, pp. 1438–1448, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2011.01.018.
- [47] C. Liliana Buitrago Aguirre *et al.*, “GUÍA TÉCNICA DE CRITERIOS PARA EL ACOTAMIENTO DE LAS RONDAS HÍDRICAS EN COLOMBIA OFICINA ASESORA JURÍDICA”.
- [48] DANE, “HOJA METODOLÓGICA Indicadores de la ILAC.”
- [49] T. R. Schueler, L. Fraley-McNeal, and K. Cappiella, “Schueler-etal_2009,” *J Hydrol Eng*, Apr. 2009, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2009\)14:4\(309\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:4(309)).

- [50] Presidente de la República de Colombia, *Decreto 2245 de 2017* . Función Pública. Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85056>
- [51] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, “Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone,” *Remote Sens Environ*, vol. 202, pp. 18–27, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.RSE.2017.06.031.
- [52] “Modelos Digitales de Elevación (MDE)-Descripción ¿Qué es un modelo digital de elevación?,” INEGI.
- [53] W. Chen, W. Wang, G. Huang, Z. Wang, C. Lai, and Z. Yang, “The capacity of grey infrastructure in urban flood management: A comprehensive analysis of grey infrastructure and the green-grey approach,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 54, p. 102045, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.IJDRR.2021.102045.
- [54] J. Lamond and G. Everett, “Sustainable Blue-Green Infrastructure: A social practice approach to understanding community preferences and stewardship,” *Landsc Urban Plan*, vol. 191, p. 103639, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.LANDURBPLAN.2019.103639.
- [55] L. E. Abera, C. Q. Surbeck, and S. K. McKay, “Lifecycle cost and benefit analysis for parcel-scale implementation of green stormwater infrastructure,” *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.grets.2024.100139.
- [56] EPA, “Storm Water Management Model (SWMM),” EPA. Accessed: Oct. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- [57] C. Zurbriggen, “Gobernanza: una mirada desde América Latina.”
- [58] J. M. Redondo and M. Becerra Fernández, “CIUDADES Y OTROS TERRITORIOS Inteligentes y Sostenibles Teoría y métodos para la implementación con perspectiva de sistemas complejos.”

- [59] “Ley 1523 de 2012 - Gestor Normativo - Función Pública.” Accessed: Oct. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- [60] J. Richardson, “THE FORMS OF CAPITAL.”
- [61] Y. Chen, H. Liu, S. Lin, Y. Wang, Q. Zhang, and L. Feng, “The Impact of Social Capital on Community Resilience: A Comparative Study of Seven Flood-Prone Communities in Nanjing, China,” *Land* 2024, Vol. 13, Page 1145, vol. 13, no. 8, p. 1145, Jul. 2024, doi: 10.3390/LAND13081145.
- [62] M. Abunyewah *et al.*, “Influence of personal and collective social capital on flood preparedness and community resilience: Evidence from Old Fadama, Ghana,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 94, p. 103790, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.IJDRR.2023.103790.
- [63] P. Hudson, L. Hagedoorn, and P. Bubeck, “Potential Linkages Between Social Capital, Flood Risk Perceptions, and Self-Efficacy,” *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 11, no. 3, pp. 251–262, Jun. 2020, doi: 10.1007/s13753-020-00259-w.
- [64] A. Shrestha, A. McCrone, J. Láng-Ritter, S. Gautam, M. Taka, and O. Varis, “Bridging gaps, saving lives: Integrating communities’ voices and impact mapping into flood early warning systems in rural Nepal,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 118, p. 105238, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.IJDRR.2025.105238.
- [65] Global Data Barometer, “Global Data Barometer,” vol. First edition, 2022, doi: 10.5281/zenodo.6488349.
- [66] D. Notti, D. Giordan, F. Caló, A. Pepe, F. Zucca, and J. P. Galve, “Potential and Limitations of Open Satellite Data for Flood Mapping,” *Remote Sensing* 2018, Vol. 10, Page 1673, vol. 10, no. 11, p. 1673, Oct. 2018, doi: 10.3390/RS10111673.
- [67] S. Angel, J. Parent, D. L. Civco, and A. M. Blei, “Making Room for a Planet of Cities,” Cambridge USA, 2011. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available:

https://www.lincolninst.edu/app/uploads/legacy-files/pubfiles/making-room-for-a-planet-of-cities-full_0.pdf

- [68] D. Butler and J. W. Davies, *URBAN DRAINAGE*, Third Edition. New York, USA: Spon Press, 2011. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315272535>.
- [69] N. Kabisch, H. Korn, J. Stadler, and A. Bonn, *Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions Naturebased Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-56091-5.
- [70] N. Kabisch, H. Korn, J. Stadler, and A. Bonn, “Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions Naturebased Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas,” Cham, Switzerland, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-56091-5.
- [71] C. Pahl-Wostl, “A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes,” *Global Environmental Change*, vol. 19, no. 3, pp. 354–365, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2009.06.001.
- [72] Z. W. Kundzewicz *et al.*, “Flood risk in a range of spatial perspectives - From global to local scales,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 19, no. 7, pp. 1319–1328, Jul. 2019, doi: 10.5194/nhess-19-1319-2019.
- [73] M. VanKoningsveld, J. P. M. Mulder, M. J. F. Stive, L. VanDerValk, and A. W. VanDerWeck, “Living with sea-level rise and climate change: A case study of the Netherlands,” *Journal of Coastal Research*, vol. 24, no. 2, Netherlands, pp. 367–379, Mar. 2008. doi: 10.2112/07A-0010.1.
- [74] C. E. M. Tucci, “Urban Flood Management,” Porto Alegre, Brasil, May 2007. Accessed: Oct. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.floodmanagement.info/floodmanagement/wp-content/uploads/2020/06/Cap-Net-WMO-Urban-Flood-Management.pdf>

- [75] R. W. Kates, C. E. Colten, S. Laska, and S. P. Leatherman, “Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: A research perspective,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 103, no. 40, pp. 14653–14660, Oct. 2006, doi: 10.1073/pnas.0605726103.
- [76] H. Takagi, M. Esteban, T. Mikami, and D. Fujii, “Projection of coastal floods in 2050 Jakarta,” *Urban Clim*, vol. 17, pp. 135–145, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.uclim.2016.05.003.
- [77] H. Nakamura and M. Oosawa, “Effects of the underground discharge channel/reservoir for small urban rivers in the Tokyo area,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Tokyo: IOP Publishing Ltd, Apr. 2021, pp. 135–145. doi: 10.1088/1755-1315/703/1/012029.
- [78] C. M. . Raymond, N. Frantzeskaki, N. Kabisch, P. Berry, M. Breil, and M. Nita, “An impact evaluation framework to support planning and evaluation of nature-based solutions projects : prepared by the EKLIPSE Expert Working Group on nature-based solutions to promote climate resilience in urban areas,” Centre for Ecology & Hydrology, 2017. Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: https://www.iflaeurope.eu/assets/docs/EKLIPSE_Report1-NBS_FINAL_Complete-02022017_LowRes_4Web.pdf
- [79] Z. Szkop, M. Szewczyk, and P. Mikolajczyk, “SCIENCE DIVISION Nature-Based Solutions for Urban Challenges 023.” Accessed: Sep. 01, 2025. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/35864/FB023.pdf>
- [80] A. Raimondi and G. Becciu, “Performance of Green Roofs for Rainwater Control,” *Water Resources Management*, vol. 35, no. 1, pp. 99–111, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11269-020-02712-3.
- [81] M. L. Santos, C. M. Silva, F. Ferreira, and J. S. Matos, “Hydrological Analysis of Green Roofs Performance under a Mediterranean Climate: A Case Study in Lisbon, Portugal,” *Sustainability (Switzerland)* , vol. 15, no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15021064.

- [82] Q. Li, F. Wang, Y. Yu, Z. Huang, M. Li, and Y. Guan, “Comprehensive Performance Evaluation of LID Practices for the Sponge City Construction: A Case Study in Guangxi, China”, Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.scinapse.io/papers/2897993046>
- [83] M. Shafique, R. Kim, and K. Kyung-Ho, “Green roof for stormwater management in a highly urbanized area: The case of Seoul, Korea,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 3, Feb. 2018, doi: 10.3390/su10030584.
- [84] G. Browder, S. Ozment, I. R. Bescos, T. Gartner, and G.-M. Lange, “Creating Next Generation Infrastructure.” Accessed: Sep. 04, 2025. [Online]. Available: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/680391553111128576/pdf/135462%E2%80%91WP%E2%80%91PUBLIC%E2%80%91Disclosed%E2%80%9113%E2%80%91121%E2%80%912019.pdf>
- [85] L. Wang, J. Zhao, Z. Xiong, J. Zhuang, and M. Wang, “Integrating Grey–Green Infrastructure in Urban Stormwater Management: A Multi–Objective Optimization Framework for Enhanced Resilience and Cost Efficiency,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15073852.
- [86] C. Martínez, Z. Vojinovic, and A. Sanchez, “Multi-objective model-based assessment of green-grey infrastructures for urban flood mitigation,” *Hydrology*, vol. 8, no. 3, Sep. 2021, doi: 10.3390/hydrology8030110.
- [87] C. Zevenbergen, J. Rijke, S. Van Herk, and P. J. T. M. Bloemen, “Room for the River: a stepping stone in Adaptive Delta Management,” *International Journal of Water Governance-Issue*, vol. 1, pp. 121–140, 2015, doi: 10.7564/14-IJWG63.
- [88] Á.-F. Morote Seguido, “EL PARQUE INUNDABLE ‘LA MARJAL’ DE ALICANTE (ESPAÑA) COMO PROPUESTA DIDÁCTICA PARA LA INTERPRETACIÓN DE LOS ESPACIOS DE RIESGO DE INUNDACIÓN,” pp. 211–230, 2017.

- [89] C. Jeon and Y. Kang, “Restoring and Re-Restoring the Cheonggyecheon: Nature, Technology, and History in Seoul, South Korea,” OXFORD UNIV PRESS INC.
- [90] N. Niño and M. Guzzetti, “Hybrid Infrastructure for Urban Flood Risk and Climate-Related Hazard Management in Sekondi-Takoradi, Ghana an economic valuation of the use of nature-based infrastructure for flood resilience NBI REPORT,” 2025. Accessed: Sep. 09, 2025. [Online]. Available: <https://nbi.iisd.org/wp-content/uploads/2025/05/hybrid-infrastructure-sekondi-takoradi-ghana.pdf>
- [91] E. Araral and Y. Wang, “Water Governance 2.0: A Review and Second Generation Research Agenda,” *Water Resources Management*, vol. 27, no. 11, pp. 3945–3957, Sep. 2013, doi: 10.1007/s11269-013-0389-x.
- [92] A. K. Biswas and C. Tortajada, “Water quality management: a globally neglected issue,” *Int J Water Resour Dev*, vol. 35, no. 6, pp. 913–916, Nov. 2019, doi: 10.1080/07900627.2019.1670506.
- [93] UN-Water, “Monitoring water and sanitation in the 2030 Agenda for sustainable development,” Geneva, 2020. Accessed: Sep. 14, 2025. [Online]. Available: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2020/02/Monitoring-water-and-sanitation-in-the-2030-Agenda_January-2020.pdf
- [94] OECD, “OECD Principles on Water Governance,” Paris, 2015. Accessed: Sep. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub-issues/water-governance/oecd-principles-on-water-governance-en.pdf>
- [95] L. Marisol, R. Acevedo, and A. C. Arroyo, “EL MANEJO DE CUENCAS EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS LA ACCIÓN COLABORATIVA DE LOS ACTORES SOCIALES,” Licenciatura, PUCP- Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Peru, 2017. Accessed: Sep. 24, 2025. [Online]. Available: <https://tesis.pucp.edu.pe/items/839d712a-e07d-408a-81fc-b1fa4ab41cf8>
- [96] T. Octastefani, B. Mitra, and A. Kusuma, “Water Governance of Singapore in Achieving Sustainable Water Security,” *J-PAL*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, 2016,

Accessed: Sep. 25, 2025. [Online]. Available: <https://digilib.uin-suka.ac.id/id/eprint/29177/1/Theresia%20Octastefani%20dan%20Bayu%20Mitra%20Adhyatma%20Kusuma%20-%20Water%20Governance%20of%20Singapore%20in%20Achieving%20Sustainable%20Water%20Security.pdf>