



Prevención, protección y mitigación contra fenómenos naturales y el incremento del desarrollo humano sobre las cuencas

Jaime Enrique Rincón Ascanio

Universidad de Pamplona
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química
Pamplona, Norte de Santander, Colombia
2025



Prevención, protección y mitigación contra fenómenos naturales y el incremento del desarrollo humano sobre las cuencas

Jaime Enrique Rincón Ascanio

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil

Tutor:

Ing. Oscar Johany Hernández Parada

Universidad de Pamplona

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Ambiental, Civil y Química

Pamplona, Norte de Santander, Colombia

2025

Introducción

La gestión de cuencas hidrográficas frente a fenómenos naturales constituye uno de los desafíos más complejos de la ingeniería civil contemporánea, especialmente en contextos tropicales como Colombia, donde la convergencia de múltiples factores naturales y antrópicos genera escenarios de riesgo de creciente complejidad. Este desafío adquiere especial relevancia en un país caracterizado por una alta variabilidad climática producto de fenómenos como El Niño y La Niña, topografía montañosa que concentra más del 70% de la población en las tres cordilleras andinas, y dinámicas de desarrollo humano aceleradas que transforman constantemente el territorio.

Colombia se encuentra ubicada en una posición geográfica estratégica que la expone a múltiples amenazas naturales: su ubicación en el cinturón de fuego del Pacífico la hace vulnerable a actividad sísmica; su posición ecuatorial y la influencia de dos océanos generan variabilidad climática extrema; y su topografía montañosa con pendientes pronunciadas facilita la ocurrencia de movimientos en masa. A estas condiciones naturales se suma una historia de ocupación territorial que, especialmente desde mediados del siglo XX, ha expandido las ciudades hacia zonas de ladera y planicies de inundación, ha transformado extensas áreas de bosque en usos agropecuarios y urbanos, y ha construido infraestructura sin la adecuada consideración de los procesos naturales que caracterizan a las cuencas hidrográficas.

El problema central de esta investigación radica en la necesidad urgente de comprender sistemáticamente cómo las intervenciones humanas en las cuencas hidrográficas incrementan el riesgo de desastres, y qué estrategias técnicas, de gestión y de gobernanza han demostrado ser efectivas para la prevención, protección y mitigación en contextos tanto nacionales como internacionales. Esta comprensión se vuelve fundamental para orientar la toma de decisiones en

ingeniería civil, planificación territorial y políticas públicas de gestión del riesgo, especialmente cuando se considera que, según datos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL] (2019), los costos de los desastres en Colombia superan el 0,8% del PIB anual, evidenciando la urgencia de fortalecer estrategias preventivas.

La magnitud del problema se evidencia en múltiples dimensiones. Desde el punto de vista hidrológico, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2022) documenta que la urbanización no planificada ha reducido hasta en un 40% la capacidad natural de almacenamiento temporal de los ríos, mientras que la pérdida de cobertura vegetal ha incrementado la erosión y la sedimentación en un 25%. Geomorfológicamente, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC] (2019) ha identificado miles de zonas susceptibles a movimientos en masa, siendo las cordilleras andinas las más críticas. Socialmente, la expansión urbana informal hacia zonas de alta amenaza refleja la interacción compleja entre déficit de vivienda, pobreza y exposición al riesgo.

La investigación se desarrolla desde un enfoque técnico propio de la ingeniería civil, pero reconociendo explícitamente la naturaleza multidisciplinaria del problema, integrando conocimientos de hidrología, geotecnia, planificación territorial, ecología y ciencias sociales. Este enfoque multidisciplinario es esencial porque la gestión de riesgo en cuencas no puede abordarse únicamente desde la perspectiva de la ingeniería estructural o hidráulica, sino que requiere comprender los procesos sociales que generan vulnerabilidad, los procesos ecológicos que proporcionan servicios de regulación, y los procesos institucionales que determinan la efectividad de las intervenciones.

El estudio se basa en la revisión documental sistemática de fuentes técnicas, normativas y científicas, así como en el análisis comparativo de casos de estudio nacionales e internacionales

que permiten identificar patrones, lecciones aprendidas y mejores prácticas. Esta metodología de análisis comparativo es particularmente valiosa porque permite extraer conocimientos de experiencias validadas en contextos diversos, identificando qué aspectos son transferibles y qué factores contextuales son determinantes para el éxito o fracaso de las estrategias implementadas.

La relevancia de esta investigación trasciende el ámbito académico y tiene implicaciones directas para la práctica profesional de la ingeniería civil en Colombia. Los ingenieros civiles enfrentan constantemente el desafío de diseñar infraestructura que debe funcionar de manera segura y eficiente en entornos caracterizados por alta variabilidad climática, procesos geomorfológicos activos, y presiones crecientes de desarrollo urbano y rural. Sin un marco conceptual sólido y evidencia comparada sobre qué estrategias funcionan y en qué condiciones, las decisiones de diseño pueden basarse en criterios incompletos o experiencias limitadas.

Esta monografía contribuye a la literatura técnica colombiana al sistematizar, desde una perspectiva comparativa y crítica, las experiencias de gestión de riesgo en cuencas, proporcionando lineamientos técnicos aplicables que integran la infraestructura hidráulica con la gestión ambiental y la gobernanza territorial. El aporte específico consiste en la construcción de una matriz de análisis comparativo de casos que permite identificar variables técnicas críticas, lecciones aprendidas y brechas en la implementación de estrategias de mitigación, información que puede ser utilizada directamente en el diseño y evaluación de proyectos de ingeniería civil en cuencas.

Además, la investigación aporta al campo de la gestión del riesgo de desastres en Colombia al proporcionar una visión integrada que articula conocimiento técnico con análisis institucional y social, reconociendo que la efectividad de las medidas de ingeniería depende no solo de su calidad técnica, sino también de su integración con políticas públicas, participación

comunitaria y sostenibilidad financiera a largo plazo. Este enfoque es consistente con los principios del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, que enfatiza la necesidad de enfoques integrales y multiamenaza.

Objetivo General

Analizar la interacción entre fenómenos naturales, desarrollo humano y vulnerabilidad en cuencas hidrográficas, mediante un estudio descriptivo, documental y comparativo de casos nacionales e internacionales, con el fin de identificar estrategias efectivas de prevención, protección y mitigación y formular lineamientos técnicos aplicables a la gestión de riesgo en cuencas colombianas.

Objetivos Específicos

1. Identificar y caracterizar los principales fenómenos naturales (inundaciones, deslizamientos, sequías, sismos, eventos compuestos) que afectan las cuencas hidrográficas y su interacción con el desarrollo humano.
2. Analizar los impactos del desarrollo humano (urbanización, deforestación, minería, agricultura intensiva, infraestructura) sobre los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos de las cuencas.
3. Revisar y comparar críticamente las estrategias de prevención, protección y mitigación implementadas en casos nacionales (La Mojana, Canal del Dique, Hidroituango, Río Magdalena) e internacionales (Misisipi, Yangtsé, Hoover, Majes-Siguas II), identificando medidas estructurales y no estructurales.

4. Construir una matriz de análisis comparativo que sistematice variables técnicas, efectos positivos y negativos, y lecciones aprendidas de los casos estudiados.

5. Formular lineamientos técnicos, de gestión y de gobernanza para la prevención y mitigación de riesgos en cuencas hidrográficas colombianas, basados en los hallazgos del análisis comparativo.

Resumen

La prevención y mitigación de riesgos asociados a fenómenos naturales en cuencas hidrográficas requiere comprender sistemáticamente cómo el desarrollo humano incrementa la exposición y vulnerabilidad, así como identificar estrategias efectivas validadas en experiencias comparadas. Esta monografía realiza un estudio descriptivo, documental y comparativo que analiza la interacción entre fenómenos naturales (inundaciones, deslizamientos, sequías, sismos) y el desarrollo humano en cuencas, mediante la revisión sistemática de fuentes técnicas y normativas, y la construcción de una matriz de análisis comparativo de casos nacionales e internacionales.

La metodología se fundamenta en la revisión documental sistemática de fuentes institucionales (IDEAM, IGAC, UNGRD), normativas (Ley 1523 de 2012, Marco de Sendai) y técnicas (ICOLD, ISO 31000), complementada con el análisis comparado de casos: internacionales (cuenca del Misisipi, Yangtsé, presa Hoover, proyecto Majes-Siguas II) y nacionales (La Mojana, Canal del Dique, Hidroituango, Río Magdalena). La construcción de matrices de análisis permitió sistematizar variables técnicas (tipo de amenaza, obras implementadas, medidas no estructurales) y comparar resultados, efectos y lecciones aprendidas.

Los resultados principales evidencian que: (1) el desarrollo humano desordenado altera los balances hidrológicos, aumenta la exposición y vulnerabilidad, y deteriora la estabilidad geomorfológica; (2) las estrategias más efectivas combinan obras hidráulicas (presas, diques, drenajes, monitoreo geotécnico) con medidas no estructurales (ordenamiento territorial, restauración ecosistémica, sistemas de alerta temprana, fortalecimiento comunitario); (3) la gobernanza articulada, el monitoreo continuo y la integración entre infraestructura y naturaleza

son factores críticos de éxito; (4) existen brechas en la implementación de los marcos normativos colombianos y en el mantenimiento preventivo de infraestructuras.

El aporte específico de esta monografía consiste en la sistematización comparativa de casos nacionales e internacionales mediante matrices de análisis que permiten identificar patrones técnicos, lecciones aprendidas y variables críticas para la gestión de riesgo en cuencas, proporcionando lineamientos aplicables directamente al diseño y evaluación de proyectos de ingeniería civil en Colombia.

La prevención y mitigación efectivas requieren enfoques integrados que combinen ingeniería hidráulica, gestión ambiental y gobernanza territorial, sustentados en monitoreo permanente, mantenimiento preventivo y participación social. La aplicación sistemática de estos lineamientos puede contribuir a reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de las cuencas hidrográficas colombianas.

Palabras clave: Gestión de riesgo de desastres, cuencas hidrográficas, prevención, mitigación, desarrollo humano, análisis comparativo, ingeniería civil.

Abstract

The prevention and mitigation of risks associated with natural phenomena in river basins requires systematically understanding how human development increases exposure and vulnerability, as well as identifying effective strategies validated in comparative experiences. This monograph conducts a descriptive, documentary, and comparative study that analyzes the interaction between natural phenomena (floods, landslides, droughts, earthquakes) and human development in basins, through systematic review of technical and regulatory sources, and the construction of a comparative analysis matrix of national and international cases.

The methodology is based on systematic documentary review of institutional sources (IDEAM, IGAC, UNGRD), regulatory frameworks (Law 1523 of 2012, Sendai Framework), and technical standards (ICOLD, ISO 31000), complemented with comparative analysis of cases: international (Mississippi River basin, Yangtze, Hoover Dam, Majes-Siguas II project) and national (La Mojana, Canal del Dique, Hidroituango, Magdalena River). The construction of analysis matrices allowed systematizing technical variables (type of hazard, implemented works, non-structural measures) and comparing results, effects, and lessons learned.

The main results show that: (1) disorderly human development alters hydrological balances, increases exposure and vulnerability, and deteriorates geomorphological stability; (2) the most effective strategies combine hydraulic works (dams, dikes, drainage systems, geotechnical monitoring) with non-structural measures (territorial planning, ecosystem restoration, early warning systems, community strengthening); (3) articulated governance, continuous monitoring, and integration between infrastructure and nature are critical success factors; (4) there are gaps in the implementation of Colombian regulatory frameworks and in preventive maintenance of infrastructure.

The specific contribution of this monograph consists of the comparative systematization of national and international cases through analysis matrices that allow identifying technical patterns, lessons learned, and critical variables for risk management in basins, providing guidelines directly applicable to the design and evaluation of civil engineering projects in Colombia.

Effective prevention and mitigation require integrated approaches that combine hydraulic engineering, environmental management, and territorial governance, supported by permanent monitoring, preventive maintenance, and social participation. The systematic application of these guidelines can contribute to reducing vulnerability and increasing the resilience of Colombian river basins.

Keywords: Disaster risk management, river basins, prevention, mitigation, human development, comparative analysis, civil engineering.

Tabla de contenido

Introducción	3
Objetivo General.....	6
Objetivos Específicos	6
Resumen.....	8
Abstract.....	10
Tabla de contenido	12
1 Marco Teórico.....	17
1.1 Conceptos clave de riesgo y vulnerabilidad.....	18
1.1.1 El concepto de riesgo	18
1.1.2 El concepto de amenaza	19
1.1.3 El concepto de exposición.....	20
1.1.4 El concepto de vulnerabilidad.....	21
1.1.5 El concepto de capacidad.....	22
1.1.6 El concepto de resiliencia	23
1.2 Conceptos hidrológicos y geomorfológicos de cuencas	25
1.2.1 Conceptos hidrológicos fundamentales.....	25
1.2.2 Procesos geomorfológicos en cuencas	27
1.3 Modelos y enfoques de gestión del riesgo	28
1.3.1 Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD)	29

1.3.2	Gestión Integrada de Recursos Hídricos (IWRM/GIRH)	30
1.4	Enfoques teóricos sobre desarrollo humano y vulnerabilidad en cuencas	32
1.4.1	Dimensiones de la vulnerabilidad	32
1.4.2	Desarrollo humano y generación de vulnerabilidad.....	34
1.5	Teoría de resiliencia en sistemas socioecológicos	36
2	Marco Normativo	38
2.1	Marco normativo colombiano	39
2.1.1	Decreto 2811 de 1974 – Código Nacional de Recursos Naturales Renovables.....	39
2.1.2	Ley 99 de 1993 – Sistema Nacional Ambiental (SINA).....	41
2.1.3	Ley 1523 de 2012 – Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres	42
2.1.4	Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico	44
2.1.5	NSR-10 – Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente	46
2.1.6	Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA).....	47
2.1.7	Análisis crítico del marco normativo colombiano	50
2.2	Marco programático internacional	53
2.2.1	Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030.....	53
2.2.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	55
2.2.3	Estándares internacionales técnicos	57
2.2.4	Marco Ambiental y Social del Banco Mundial (ESF)	61
2.2.5	Comparación crítica entre marcos.....	64

3	Estado del Arte.....	67
3.1	Investigaciones sobre impactos del desarrollo humano en cuencas.....	67
3.2	Metodologías utilizadas en investigación sobre gestión de riesgo en cuencas	68
3.3	Resultados obtenidos	71
3.4	Estudios sobre casos específicos y sus metodologías	74
3.5	Vacíos y limitaciones identificadas.....	77
4	Metodología.....	84
4.1	Tipo de estudio.....	84
4.2	Enfoque metodológico	86
4.3	Fuentes y técnicas de recolección de información.....	86
4.3.1	Fuentes consultadas.....	86
4.3.2	Técnicas de recolección y análisis	89
4.4	Procedimiento analítico.....	89
4.5	Validación y calidad de la información	94
4.6	Limitaciones metodológicas	95
4.7	Consideraciones éticas	97
5	Conclusiones y Recomendaciones	98
5.1	Conclusiones generales.....	98
5.2	Conclusiones específicas vinculadas a objetivos	100
5.2.1	Respecto al objetivo específico 1: Identificación y caracterización de fenómenos naturales	

5.2.2	Respecto al objetivo específico 2: Impactos del desarrollo humano sobre las cuencas	102
5.2.3	Respecto al objetivo específico 3: Estrategias de prevención, protección y mitigación ...	102
5.2.4	Respecto al objetivo específico 4: Matriz de análisis comparativo	103
5.2.5	Respecto al objetivo específico 5: Lineamientos técnicos, de gestión y de gobernanza...	104
5.3	Recomendaciones	104
5.3.1	Recomendaciones técnicas (diseño y operación de infraestructura).....	104
5.3.2	Recomendaciones de gestión y gobernanza (articulación GRD, POMCA, POT)	105
5.3.3	Recomendaciones de investigación futura	106
6	Conclusiones y Recomendaciones	107
6.1	Conclusiones generales	107
6.2	Conclusiones específicas vinculadas a objetivos	109
6.2.1	Respecto al objetivo específico 1: Identificación y caracterización de fenómenos naturales 109	
6.2.2	Respecto al objetivo específico 2: Impactos del desarrollo humano sobre las cuencas	111
6.2.3	Respecto al objetivo específico 3: Estrategias de prevención, protección y mitigación ...	111
6.2.4	Respecto al objetivo específico 4: Matriz de análisis comparativo	112
6.2.5	Respecto al objetivo específico 5: Lineamientos técnicos, de gestión y de gobernanza...	112
7	Referencias	113
	Anexos	117

1 Marco Teórico

El marco teórico constituye la base conceptual y científica que sustenta el desarrollo de esta monografía. En el contexto de la ingeniería civil y la gestión de cuencas hidrográficas, resulta imprescindible establecer una revisión exhaustiva y profunda de los conceptos, teorías y enfoques que permiten comprender la interacción compleja entre los fenómenos naturales, el desarrollo humano y la vulnerabilidad de los territorios. Este análisis se nutre de la convergencia disciplinar entre la hidrología, la geotecnia, la planificación territorial, la ecología y las ciencias sociales, reconociendo que la problemática abordada es de carácter complejo y multifactorial, y que su comprensión requiere integrar perspectivas que tradicionalmente se han abordado de forma separada.

La construcción de un marco teórico sólido es fundamental por múltiples razones. En primer lugar, proporciona el lenguaje conceptual común que permite comunicar ideas complejas de manera precisa y rigurosa. En segundo lugar, establece las bases para interpretar y analizar fenómenos observados, proporcionando marcos explicativos que van más allá de la mera descripción. En tercer lugar, permite identificar relaciones causales y patrones que pueden no ser evidentes sin una estructura conceptual adecuada. Finalmente, un marco teórico bien fundamentado permite generar conocimientos nuevos a partir de la síntesis y aplicación de teorías existentes a contextos específicos.

Este capítulo se estructura en cinco secciones principales que progresan desde conceptos fundamentales hacia enfoques integradores. La primera sección aborda los conceptos clave de riesgo y vulnerabilidad, estableciendo las bases para comprender cómo se construye el riesgo en cuencas. La segunda sección desarrolla los conceptos hidrológicos y geomorfológicos fundamentales para entender el funcionamiento de las cuencas como sistemas naturales. La

tercera sección presenta los modelos y enfoques de gestión del riesgo, incluyendo la Gestión Integral del Riesgo de Desastres y la Gestión Integrada de Recursos Hídricos. La cuarta sección explora los enfoques teóricos sobre desarrollo humano y vulnerabilidad, reconociendo que el riesgo no es solo un fenómeno físico sino también social. Finalmente, la quinta sección desarrolla la teoría de resiliencia en sistemas socioecológicos, proporcionando un marco conceptual para diseñar sistemas que puedan adaptarse y recuperarse de perturbaciones.

1.1 Conceptos clave de riesgo y vulnerabilidad

El estudio de los fenómenos naturales y su interacción con las sociedades humanas requiere, como punto de partida, la comprensión de los conceptos fundamentales de riesgo, amenaza, exposición y vulnerabilidad. Estos conceptos, aunque aparentemente simples, han evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de visiones deterministas que consideraban los desastres como eventos puramente naturales, hacia perspectivas más complejas que reconocen el carácter socialmente construido del riesgo.

1.1.1 El concepto de riesgo

El riesgo se define conceptualmente como una función de tres variables interdependientes: amenaza (H), exposición (E) y vulnerabilidad/capacidad (V/C), expresada comúnmente como $R = f(H, E, V)$ (UNDRR, 2015; ISO 31000, 2018). Esta relación conceptual evidencia que el impacto de un evento natural no depende únicamente de su magnitud física, sino también de las condiciones sociales, económicas e institucionales de las comunidades y territorios afectados. El riesgo, por tanto, no es un atributo del fenómeno natural en sí mismo,

sino el resultado de la interacción entre procesos naturales y procesos sociales que determinan quién y qué está expuesto, y qué tan vulnerable es esa exposición.

Desde una perspectiva histórica, el concepto de riesgo ha evolucionado desde visiones que lo equiparaban directamente con la amenaza natural, hacia enfoques más sofisticados que reconocen la dimensión social del riesgo. Los enfoques modernos, como los establecidos por el Marco de Sendai y la ISO 31000, reconocen que el riesgo es inherentemente dinámico y contextual, cambiando en función de las decisiones de desarrollo humano, las condiciones institucionales, y los procesos de adaptación y aprendizaje.

En el contexto de cuencas hidrográficas, el riesgo se manifiesta de manera particular debido a la complejidad de los procesos hidrológicos y geomorfológicos, y a la manera en que las intervenciones humanas modifican estos procesos. Un mismo evento de precipitación extrema puede generar riesgos muy diferentes dependiendo de si ocurre en una cuenca con alta cobertura vegetal y sistemas naturales de regulación, o en una cuenca altamente urbanizada con suelos impermeabilizados. Esta variabilidad contextual es fundamental para entender por qué estrategias que funcionan en un contexto pueden no ser efectivas en otro.

1.1.2 El concepto de amenaza

La amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento natural potencialmente dañino en un lugar y periodo determinado (UNDRR, 2015). Esta definición incorpora dos elementos fundamentales: la probabilidad de ocurrencia y la magnitud potencial del evento. En el contexto de cuencas hidrográficas, las amenazas principales incluyen inundaciones (fluviales, pluviales, costeras), deslizamientos y movimientos en masa, sequías, sismos y eventos compuestos donde múltiples amenazas interactúan.

Las amenazas pueden caracterizarse según múltiples atributos: tipo (hidrometeorológica, geológica, climática), origen (natural, antrópica, mixta), velocidad de inicio (súbita, lenta), frecuencia (alta, media, baja), magnitud (baja, media, alta, extrema), y alcance espacial (local, regional, nacional). Esta caracterización multidimensional es esencial para el diseño de estrategias de mitigación apropiadas, ya que diferentes tipos de amenazas requieren diferentes enfoques.

Es importante reconocer que las amenazas naturales, aunque tienen un componente físico inherente, también pueden ser modificadas por la actividad humana. Por ejemplo, la deforestación puede aumentar la frecuencia e intensidad de deslizamientos en laderas que anteriormente eran estables. La construcción de infraestructura puede alterar los patrones de drenaje natural, creando nuevas amenazas de inundación. Esta interacción entre amenazas naturales y actividad humana es particularmente relevante en el contexto de gestión de cuencas.

1.1.3 El concepto de exposición

La exposición se refiere a la presencia de personas, infraestructura, sistemas y otros elementos en zonas peligrosas que pueden ser afectados por una amenaza (UNDRR, 2015). La exposición es un componente esencial del riesgo porque determina qué elementos están potencialmente sujetos a daño. Sin exposición, incluso una amenaza de alta magnitud no genera riesgo.

La exposición puede ser caracterizada según múltiples dimensiones: humana (número de personas expuestas, sus características demográficas), física (infraestructura, vivienda, activos económicos), social (sistemas sociales, instituciones), económica (activos productivos, sistemas

de producción), y ambiental (ecosistemas, servicios ecosistémicos). Cada una de estas dimensiones requiere estrategias diferentes de reducción del riesgo.

En el contexto de cuencas hidrográficas, la exposición ha aumentado significativamente debido a procesos de urbanización, expansión agrícola, y construcción de infraestructura en zonas de alta amenaza. Este aumento de exposición, combinado con cambios en los patrones de amenaza debido al cambio climático y la modificación de cuencas, ha generado escenarios de riesgo creciente que desafían las estrategias tradicionales de gestión.

La reducción de exposición puede lograrse mediante múltiples estrategias: reubicación de asentamientos humanos, zonificación restrictiva que prohíba usos de alto valor en zonas de alta amenaza, diversificación de activos para evitar concentración en zonas de riesgo, y diseño de infraestructura que minimice la exposición de elementos críticos. Sin embargo, estas estrategias enfrentan múltiples barreras sociales, económicas y políticas que limitan su implementación efectiva.

1.1.4 El concepto de vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la propensión o predisposición a ser afectado adversamente, determinada por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad al daño (Cardona, 2003). A diferencia de la exposición, que se refiere a qué está presente en zonas de riesgo, la vulnerabilidad se refiere a qué tan susceptible es ese elemento a sufrir daño cuando se expone a una amenaza.

La vulnerabilidad es un concepto multidimensional que puede analizarse desde múltiples perspectivas. La vulnerabilidad física se refiere a las características físicas de la infraestructura y los asentamientos humanos que determinan su resistencia a eventos extremos. La vulnerabilidad

social se relaciona con las características de las poblaciones (edad, género, nivel educativo, acceso a información) que determinan su capacidad para prepararse, responder y recuperarse. La vulnerabilidad económica se relaciona con los recursos disponibles y la diversificación de medios de vida. La vulnerabilidad ambiental se refiere al estado de degradación de los ecosistemas y su capacidad para proporcionar servicios de regulación.

La vulnerabilidad es particularmente relevante en el contexto de cuencas porque las intervenciones humanas pueden modificar significativamente la vulnerabilidad del sistema. Por ejemplo, la construcción de diques puede reducir la vulnerabilidad de asentamientos humanos a inundaciones, pero también puede aumentar la vulnerabilidad de ecosistemas acuáticos. La deforestación puede aumentar la vulnerabilidad del suelo a erosión, generando vulnerabilidad aguas abajo debido a la sedimentación.

Es importante reconocer que la vulnerabilidad no es estática sino dinámica, cambiando en función de procesos sociales, económicos y ambientales. Las políticas de desarrollo, los cambios en el uso del suelo, los procesos de urbanización, y las intervenciones de infraestructura pueden modificar la vulnerabilidad tanto positiva como negativamente. Esta dinámica requiere enfoques de gestión que sean adaptativos y que reconozcan que la reducción de vulnerabilidad es un proceso continuo, no un estado final a alcanzar.

1.1.5 El concepto de capacidad

El concepto de capacidad, incorporado en la fórmula del riesgo como V/C , reconoce que las comunidades y sistemas tienen no solo vulnerabilidades sino también capacidades para hacer frente a las amenazas. La capacidad se refiere a los recursos, habilidades, conocimientos y

oportunidades que permiten a individuos, comunidades y sistemas anticipar, resistir, responder y recuperarse de eventos adversos (UNDRR, 2015).

Las capacidades pueden ser de diversos tipos: técnicas (conocimientos, habilidades, tecnología), económicas (recursos financieros, activos), sociales (redes, organización comunitaria), institucionales (marcos legales, organizaciones), y físicas (infraestructura, equipamiento). El fortalecimiento de capacidades es una estrategia fundamental para la reducción del riesgo, complementaria a la reducción de vulnerabilidades.

En el contexto de cuencas, el fortalecimiento de capacidades puede incluir: desarrollo de sistemas de monitoreo y alerta temprana, capacitación de comunidades en preparación y respuesta, construcción de infraestructura de protección, desarrollo de marcos normativos e institucionales apropiados, y creación de mecanismos financieros para gestión del riesgo. El éxito de estas estrategias depende de que reconozcan y construyan sobre las capacidades existentes, en lugar de imponer soluciones externas que no se adapten al contexto local.

1.1.6 El concepto de resiliencia

La resiliencia, como concepto complementario al de riesgo, representa la capacidad de los sistemas, comunidades e individuos para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos de una amenaza de manera oportuna y eficiente (UNDRR, 2015; Holling, 1973). La resiliencia va más allá de la mera resistencia a eventos adversos, incorporando la capacidad de adaptación y transformación que permite a los sistemas evolucionar y mejorar su capacidad de respuesta frente a futuros eventos.

En el contexto de la ingeniería civil aplicada a cuencas, la resiliencia de infraestructura se manifiesta mediante múltiples atributos: (1) resistencia, que es la capacidad de absorber

perturbación sin fallar, manteniendo la integridad estructural y funcional; (2) redundancia, que se refiere a la existencia de componentes alternativos o sistemas de respaldo que pueden cumplir la misma función si el sistema principal falla; (3) robustez, que es la capacidad de mantener funcionalidad bajo cargas extremas o condiciones fuera del rango de diseño normal; y (4) recuperación rápida, que se refiere a la capacidad de restaurar la operatividad en el menor tiempo posible después de un evento (ICOLD, 2019; Banco Mundial, 2023).

La resiliencia también tiene dimensiones sociales, económicas e institucionales. La resiliencia social se refiere a la capacidad de las comunidades para organizarse, comunicarse y colaborar durante y después de eventos adversos. La resiliencia económica se relaciona con la diversificación de medios de vida, la existencia de seguros y mecanismos financieros de respaldo, y la capacidad de mantener actividad económica durante y después de eventos. La resiliencia institucional se refiere a la existencia de marcos normativos, organizaciones y procesos que puedan responder efectivamente a eventos adversos.

La aplicación del concepto de resiliencia en gestión de cuencas implica un cambio paradigmático desde enfoques que buscan controlar completamente los procesos naturales hacia enfoques que reconocen la inevitabilidad de ciertos eventos y buscan diseñar sistemas que puedan convivir con ellos y recuperarse rápidamente. Este cambio es particularmente relevante en el contexto del cambio climático, donde la incertidumbre sobre futuros escenarios climáticos hace que la capacidad de adaptación sea más importante que la capacidad de resistencia a condiciones específicas.

1.2 Conceptos hidrológicos y geomorfológicos de cuencas

Las cuencas hidrográficas constituyen unidades naturales de planificación donde convergen procesos físicos, biológicos y sociales de manera compleja e interdependiente. Comprender estos procesos es fundamental para diseñar estrategias efectivas de gestión del riesgo que reconozcan la naturaleza dinámica de los sistemas de cuenca y las múltiples formas en que las intervenciones humanas pueden modificar estos sistemas.

1.2.1 Conceptos hidrológicos fundamentales

Hidrológicamente, una cuenca es el área que drena hacia un punto común, delimitada topográficamente por una divisoria de aguas. Esta definición aparentemente simple encierra una complejidad significativa cuando se considera que el flujo de agua en una cuenca involucra múltiples procesos físicos y químicos que operan a diferentes escalas espaciales y temporales.

El ciclo hidrológico en cuencas incluye múltiples procesos interconectados: precipitación, que puede ocurrir como lluvia o nieve; interceptación por vegetación, que reduce la cantidad de agua que llega al suelo; infiltración, que es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo; escorrentía superficial, que ocurre cuando la intensidad de precipitación excede la capacidad de infiltración; flujo subsuperficial, que incluye flujo en la zona no saturada y en acuíferos; evapotranspiración, que combina evaporación directa y transpiración vegetal; y flujo base, que es el flujo sostenido por aguas subterráneas (Chow et al., 1988).

Cada uno de estos procesos está influenciado por múltiples factores. La precipitación varía espacial y temporalmente debido a factores climáticos, topográficos y de cobertura vegetal. La infiltración depende de las características del suelo (textura, estructura, contenido de materia orgánica, compactación), la pendiente, y la intensidad y duración de la precipitación. La

evapotranspiración está influenciada por factores climáticos (temperatura, humedad, radiación solar, viento), características de la vegetación (tipo, densidad, etapa fenológica), y disponibilidad de agua en el suelo.

La intervención humana modifica radicalmente estos procesos naturales. La urbanización y la impermeabilización del suelo incrementan significativamente la escorrentía superficial, reducen la infiltración, y modifican los tiempos de concentración, aumentando los picos de caudal y la probabilidad de inundaciones urbanas. Estos cambios se cuantifican mediante parámetros como el coeficiente de escorrentía (C), que representa la fracción de precipitación que se convierte en escorrentía superficial, y el tiempo de concentración (T_c), que es el tiempo que tarda el agua en fluir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida.

El coeficiente de escorrentía varía desde valores muy bajos (0.05-0.20) en áreas con alta cobertura vegetal y suelos permeables, hasta valores muy altos (0.70-0.95) en áreas urbanas con alta impermeabilización. El tiempo de concentración es fundamental para determinar los caudales pico en eventos de precipitación, ya que determina qué tan rápido se acumula el agua en el punto de salida de la cuenca.

Los cambios en estos parámetros debido a la actividad humana pueden tener efectos significativos en el régimen hidrológico de una cuenca. Por ejemplo, estudios como los de Martínez (2017) y Ocampo (2018) han documentado que la urbanización puede incrementar los caudales pico en eventos de precipitación entre 2 y 5 veces, dependiendo del grado de impermeabilización y de las características previas de la cuenca. Estos cambios requieren que los sistemas de drenaje urbano y las obras de protección sean diseñados considerando las condiciones futuras de la cuenca, no solo las condiciones históricas.

1.2.2 Procesos geomorfológicos en cuencas

Geomorfológicamente, las cuencas son sistemas dinámicos sujetos a procesos continuos de erosión, transporte y sedimentación. Estos procesos están gobernados por la interacción entre fuerzas gravitacionales, que tienden a mover materiales desde elevaciones altas hacia elevaciones bajas, y las fuerzas de resistencia del terreno, que se oponen a este movimiento.

La erosión puede ocurrir por múltiples mecanismos: erosión pluvial, causada por el impacto de gotas de lluvia que desprenden partículas del suelo; erosión por escorrentía, donde el agua fluyendo sobre la superficie arrastra partículas; erosión de cauces, donde el agua en movimiento erosiona los márgenes y el lecho de los ríos; y movimientos en masa, donde masas de suelo y roca se mueven pendiente abajo por gravedad, a menudo activados por saturación de agua.

El transporte de sedimentos ocurre principalmente a través de los cauces fluviales, donde el agua en movimiento puede transportar partículas en suspensión, en saltación (saltando sobre el lecho), o por rodamiento y arrastre a lo largo del lecho. La capacidad de transporte de sedimentos de un río depende de múltiples factores: velocidad del flujo, pendiente del cauce, tamaño y densidad de las partículas, y características del lecho.

La sedimentación ocurre cuando la capacidad de transporte de sedimentos disminuye, típicamente debido a reducciones en la velocidad del flujo, disminuciones en la pendiente, o cuando el flujo encuentra obstáculos o embalses. La sedimentación puede tener efectos tanto positivos como negativos: positiva cuando deposita materiales fértiles en planicies de inundación, negativa cuando reduce la capacidad de conducción de cauces, disminuye la capacidad de embalses, o afecta ecosistemas acuáticos.

Las actividades humanas modifican significativamente estos procesos geomorfológicos. Las extracciones de materiales de arrastre pueden incrementar la erosión aguas arriba al reducir la protección del lecho, y pueden generar cambios en el perfil longitudinal del cauce. Los cortes de ladera para construcción de carreteras o desarrollo urbano pueden crear superficies inestables que generan deslizamientos. Los rellenos pueden modificar la topografía y alterar los patrones de drenaje natural. La construcción de presas puede interceptar el transporte de sedimentos, generando erosión aguas abajo y sedimentación en el embalse.

Estos cambios tienen efectos en cascada que pueden extenderse a lo largo de toda la cuenca. Por ejemplo, la erosión en la parte alta de una cuenca puede generar sedimentación aguas abajo, reduciendo la capacidad de conducción de cauces y aumentando el riesgo de inundación. La construcción de una presa aguas arriba puede modificar el régimen de sedimentos aguas abajo, afectando la morfología del cauce y los ecosistemas ribereños.

La comprensión de estos procesos y sus interacciones es fundamental para diseñar estrategias de gestión que minimicen los impactos negativos de las intervenciones humanas y aprovechen los procesos naturales para la reducción del riesgo. Por ejemplo, la revegetalización de laderas puede reducir la erosión y proporcionar estabilidad a los suelos, reduciendo el riesgo de deslizamientos. La restauración de humedales puede proporcionar áreas de almacenamiento natural que reduzcan los caudales pico durante eventos de precipitación extrema.

1.3 Modelos y enfoques de gestión del riesgo

La gestión del riesgo de desastres en cuencas requiere marcos conceptuales y metodológicos que integren múltiples dimensiones del problema. Dos enfoques han emergido como particularmente relevantes: la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD) y la

Gestión Integrada de Recursos Hídricos (IWRM/GIRH). Estos enfoques, aunque tienen orígenes y énfasis diferentes, son complementarios y se refuerzan mutuamente cuando se aplican de manera integrada.

1.3.1 Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD)

La Gestión Integral del Riesgo de Desastres constituye un paradigma que integra la prevención, mitigación, preparación, respuesta y recuperación en un ciclo continuo de gestión (UNDRR, 2015). Este enfoque representa una evolución desde visiones reactivas que se enfocaban principalmente en la respuesta a desastres, hacia visiones proactivas que reconocen que la mayoría de los desastres son evitables o pueden ser significativamente reducidos mediante acciones preventivas apropiadas.

El enfoque de GIRD se fundamenta en el reconocimiento de que el riesgo es una construcción social producto de decisiones de desarrollo humano, y que su reducción efectiva requiere la participación coordinada de todos los actores y sectores. Este enfoque reconoce que los desastres no son eventos aislados sino manifestaciones de procesos de desarrollo insostenible, y que la reducción del riesgo debe integrarse en todas las fases del desarrollo, desde la planificación hasta la implementación y evaluación.

La GIRD se estructura alrededor de cuatro prioridades establecidas por el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030: (1) comprender el riesgo de desastres, lo cual requiere conocimiento de las amenazas, exposición, vulnerabilidad y capacidad; (2) fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres, lo cual implica crear marcos institucionales, legales y de políticas que faciliten la gestión efectiva; (3) invertir en reducción del riesgo de desastres para la resiliencia, lo cual requiere asignar recursos financieros, humanos

y técnicos para medidas preventivas y de mitigación; y (4) mejorar la preparación para la respuesta eficaz y para "reconstruir mejor" en la recuperación, rehabilitación y reconstrucción.

Cada una de estas prioridades tiene implicaciones específicas para la gestión de cuencas. Comprender el riesgo requiere sistemas de monitoreo hidrometeorológico y geotécnico, mapas de amenaza y riesgo, y análisis de vulnerabilidad. Fortalecer la gobernanza requiere marcos normativos que integren la gestión del riesgo en la planificación territorial, coordinación interinstitucional, y mecanismos de participación social. Invertir en reducción del riesgo requiere asignación de recursos para obras de protección, restauración ecosistémica, y fortalecimiento de capacidades. Mejorar la preparación requiere sistemas de alerta temprana, planes de contingencia, y mecanismos de respuesta coordinada.

El enfoque de GIRD es particularmente relevante en el contexto de cambio climático, donde la incertidumbre sobre futuros escenarios hace que la capacidad de adaptación y el enfoque en reducción del riesgo sean más importantes que la capacidad de respuesta a eventos específicos. La GIRD proporciona un marco para integrar consideraciones de cambio climático en la planificación y diseño de infraestructura, reconociendo que las condiciones futuras pueden ser significativamente diferentes de las condiciones históricas.

1.3.2 Gestión Integrada de Recursos Hídricos (IWRM/GIRH)

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (IWRM, por sus siglas en inglés, o GIRH) constituye un enfoque promovido globalmente para coordinar el desarrollo, manejo y uso del agua, el suelo y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales (GWP, 2000; UNESCO, 2012). Este enfoque reconoce que el agua es un recurso finito y

vulnerable, cuya gestión debe realizarse de manera integrada entre sectores (agricultura, industria, uso doméstico, energía, ecosistemas) y niveles de gobierno (nacional, regional, local).

La IWRM se fundamenta en tres pilares interrelacionados: (1) eficiencia económica, que busca maximizar los beneficios económicos y sociales derivados del uso del agua; (2) equidad social, que busca distribuir de manera justa los costos y beneficios del uso del agua, asegurando que las necesidades básicas de todas las personas sean satisfechas; y (3) sostenibilidad ambiental, que busca proteger y restaurar los ecosistemas acuáticos y relacionados con el agua, reconociendo que estos ecosistemas proporcionan servicios esenciales que sustentan el bienestar humano.

Estos tres pilares están en constante tensión, y la gestión efectiva requiere encontrar equilibrios apropiados entre ellos según el contexto específico. Por ejemplo, maximizar la eficiencia económica podría requerir asignar agua a usos de mayor valor económico, pero esto podría comprometer la equidad social si priva a comunidades de acceso al agua. Proteger la sostenibilidad ambiental podría requerir mantener caudales ecológicos altos, pero esto podría reducir la disponibilidad de agua para otros usos.

La IWRM se implementa mediante múltiples principios y herramientas. Los principios incluyen: gestión a nivel de cuenca, reconociendo que la cuenca es la unidad natural de gestión; participación de todos los actores relevantes en la toma de decisiones; reconocimiento del valor económico del agua, no como mercancía sino como bien con valor económico que debe ser considerado en la asignación; y gestión adaptativa, reconociendo que la gestión debe adaptarse a condiciones cambiantes y nueva información.

Las herramientas de implementación de IWRM incluyen: planes de gestión de cuencas que integren múltiples usos y usuarios; sistemas de asignación de derechos de agua; instrumentos

económicos como tarifas, cobros por uso, y mercados de agua; sistemas de monitoreo y evaluación; marcos legales e institucionales que definan roles y responsabilidades; y mecanismos de participación y resolución de conflictos.

En Colombia, la herramienta operativa principal para la implementación de IWRM es el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), establecido por la Ley 99 de 1993 y desarrollado mediante el Decreto 1640 de 2012. Los POMCA articulan determinantes ambientales, usos del suelo, y gestión del riesgo, proporcionando un marco para la gestión integrada de cuencas. Sin embargo, la implementación efectiva de los POMCA enfrenta múltiples desafíos, incluyendo limitada capacidad institucional, insuficiente financiación, y débil coordinación entre actores y sectores.

1.4 Enfoques teóricos sobre desarrollo humano y vulnerabilidad en cuencas

La vulnerabilidad en cuencas no es un atributo natural sino una construcción social determinada por factores como pobreza, desigualdad, déficit de infraestructura básica, debilidad institucional y desconocimiento del riesgo (Cardona, 2003; UNISDR, 2017). Comprender cómo se construye y reproduce la vulnerabilidad es fundamental para diseñar estrategias efectivas de reducción del riesgo que vayan más allá de intervenciones técnicas aisladas y aborden las causas estructurales que generan vulnerabilidad.

1.4.1 Dimensiones de la vulnerabilidad

Desde una perspectiva teórica, la vulnerabilidad se manifiesta en múltiples dimensiones interrelacionadas. La vulnerabilidad física se refiere a las características físicas de la infraestructura, los asentamientos humanos y los sistemas de producción que determinan su

resistencia a eventos extremos. Esta dimensión incluye aspectos como la localización de asentamientos e infraestructura en zonas de alta amenaza, las características estructurales que determinan la resistencia física, y la calidad de la construcción.

La vulnerabilidad social se relaciona con las características de las poblaciones que determinan su capacidad para prepararse, responder y recuperarse de eventos adversos. Esta dimensión incluye factores como edad (niños y adultos mayores son típicamente más vulnerables), género (las mujeres pueden tener menor acceso a recursos y mayor carga de cuidado), nivel educativo, acceso a información, organización comunitaria, y capital social. Las poblaciones con menor acceso a recursos, menor nivel educativo, y menor organización comunitaria típicamente tienen mayor vulnerabilidad social.

La vulnerabilidad económica se refiere a los recursos disponibles y la diversificación de medios de vida que determinan la capacidad de absorber pérdidas económicas y recuperarse. Esta dimensión incluye factores como nivel de ingresos, diversificación de fuentes de ingresos, acceso a seguros y mecanismos financieros de respaldo, y activos productivos. Las poblaciones con ingresos bajos, medios de vida no diversificados, y limitado acceso a recursos financieros típicamente tienen mayor vulnerabilidad económica.

La vulnerabilidad ambiental se refiere al estado de degradación de los ecosistemas y su capacidad para proporcionar servicios de regulación que reduzcan el impacto de eventos extremos. Esta dimensión incluye factores como pérdida de cobertura vegetal, degradación de suelos, contaminación de aguas, fragmentación de hábitats, y pérdida de biodiversidad. Los ecosistemas degradados proporcionan menos servicios de regulación, aumentando la vulnerabilidad de las poblaciones que dependen de ellos.

La vulnerabilidad institucional se refiere a la existencia y efectividad de marcos legales, organizaciones y procesos que permitan la gestión efectiva del riesgo. Esta dimensión incluye factores como existencia de marcos normativos apropiados, capacidad institucional para implementar políticas, coordinación entre actores, transparencia y rendición de cuentas, y mecanismos de participación social. La débil gobernanza es una fuente importante de vulnerabilidad, ya que limita la capacidad de prevenir, preparar y responder efectivamente a eventos adversos.

Estas dimensiones de vulnerabilidad están interrelacionadas y se refuerzan mutuamente. Por ejemplo, la pobreza (vulnerabilidad económica) puede forzar a las personas a vivir en zonas de alta amenaza (aumentando vulnerabilidad física) en asentamientos informales con construcción precaria (aumentando aún más la vulnerabilidad física), sin acceso a información sobre riesgos (vulnerabilidad social), y sin capacidad para adaptarse o recuperarse (vulnerabilidad económica). Esta interacción crea ciclos de vulnerabilidad que son difíciles de romper sin intervenciones integrales que aborden múltiples dimensiones simultáneamente.

1.4.2 Desarrollo humano y generación de vulnerabilidad

El desarrollo humano, cuando se realiza sin planificación adecuada y sin consideración de los procesos naturales y los riesgos existentes, puede incrementar significativamente la exposición y vulnerabilidad. Los procesos de expansión urbana hacia zonas de alta amenaza, deforestación para agricultura y ganadería, cambios en el uso del suelo que reducen la capacidad de regulación natural, y construcción de infraestructura sin criterios de resiliencia, son todas formas en que el desarrollo humano puede generar vulnerabilidad.

La expansión urbana hacia zonas de alta amenaza es particularmente problemática en contextos donde existe déficit de vivienda y las personas buscan terrenos asequibles, que frecuentemente están en zonas de ladera, planicies de inundación, o áreas propensas a deslizamientos. Esta expansión puede ser formal, mediante desarrollo urbano planificado, o informal, mediante ocupación no planificada. En ambos casos, la exposición aumenta, y frecuentemente la vulnerabilidad también aumenta debido a la construcción precaria, falta de servicios básicos, y falta de consideración de riesgos en el diseño.

La deforestación y cambios en el uso del suelo modifican los procesos hidrológicos y geomorfológicos, aumentando la probabilidad de eventos adversos y reduciendo la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios de regulación. Por ejemplo, la deforestación puede aumentar la erosión, incrementar los caudales pico durante eventos de precipitación, y reducir la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Estos cambios aumentan el riesgo no solo para las áreas directamente deforestadas, sino también para áreas aguas abajo.

La construcción de infraestructura sin criterios de resiliencia puede crear nuevas vulnerabilidades. Por ejemplo, la construcción de diques puede reducir el riesgo de inundación en el corto plazo, pero puede aumentar la vulnerabilidad si no se mantienen adecuadamente, si se diseñan para eventos de menor magnitud que los que pueden ocurrir, o si generan falsa sensación de seguridad que lleva a mayor desarrollo en zonas protegidas. La infraestructura también puede crear vulnerabilidades indirectas, por ejemplo, cuando la construcción de carreteras facilita acceso a áreas previamente inaccesibles, facilitando deforestación y desarrollo no planificado.

Es importante reconocer que el desarrollo humano no necesariamente genera vulnerabilidad. Cuando se realiza de manera planificada, considerando los procesos naturales y los riesgos existentes, e incorporando criterios de resiliencia, el desarrollo puede reducir la

vulnerabilidad. Por ejemplo, la construcción de infraestructura de protección apropiadamente diseñada y mantenida puede reducir significativamente el riesgo. El desarrollo urbano planificado que evita zonas de alta amenaza y proporciona servicios adecuados puede reducir la vulnerabilidad comparado con desarrollo informal en zonas de riesgo. La restauración ecosistémica puede mejorar la capacidad de regulación natural, reduciendo el riesgo.

La diferencia entre desarrollo que reduce vulnerabilidad y desarrollo que genera vulnerabilidad frecuentemente está en la calidad de la planificación, la existencia de marcos normativos e institucionales apropiados, la disponibilidad de recursos financieros y técnicos, y la participación efectiva de las comunidades afectadas. Estos factores determinan si el desarrollo se realiza de manera que reconozca y respete los límites naturales, o si se realiza de manera que ignore o sobrepase estos límites, generando vulnerabilidad.

1.5 Teoría de resiliencia en sistemas socioecológicos

La teoría de resiliencia en sistemas socioecológicos, desarrollada inicialmente por Holling (1973) en el contexto de ecología de ecosistemas y ampliada por numerosos autores como Walker et al. (2004) para incluir dimensiones sociales, conceptualiza los sistemas de cuenca como sistemas complejos adaptativos que pueden existir en múltiples estados estables y que tienen la capacidad de absorber perturbaciones y reorganizarse manteniendo esencialmente la misma función, estructura e identidad.

Esta conceptualización tiene implicaciones fundamentales para la gestión de cuencas. En lugar de ver las cuencas como sistemas estáticos que deben ser controlados, la teoría de resiliencia reconoce que las cuencas son sistemas dinámicos que están en constante cambio, y que la gestión debe enfocarse en mantener la capacidad del sistema para continuar

proporcionando servicios deseados bajo condiciones cambiantes, incluyendo condiciones que pueden no haber sido experimentadas previamente.

La resiliencia se diferencia de otros conceptos relacionados como resistencia y robustez. La resistencia se refiere a la capacidad de resistir cambios, manteniendo el sistema en su estado actual a pesar de perturbaciones. La robustez se refiere a la capacidad de mantener funcionamiento bajo un rango amplio de condiciones. La resiliencia, en contraste, incorpora la capacidad de adaptación y transformación, reconociendo que mantener un estado específico puede no ser deseable o posible bajo condiciones cambiantes, y que la capacidad de evolucionar y adaptarse puede ser más importante que la capacidad de resistir cambios.

En el contexto de la ingeniería civil aplicada a cuencas, la resiliencia de infraestructura se manifiesta mediante múltiples atributos. La resistencia es la capacidad de absorber perturbación sin fallar, manteniendo la integridad estructural y funcional. Esto requiere diseño apropiado, materiales de calidad, y construcción adecuada. La redundancia se refiere a la existencia de componentes alternativos o sistemas de respaldo que pueden cumplir la misma función si el sistema principal falla. Esto incluye no solo redundancia física (múltiples componentes), sino también redundancia funcional (múltiples formas de cumplir una función).

La robustez es la capacidad de mantener funcionalidad bajo cargas extremas o condiciones fuera del rango de diseño normal. Esto requiere diseño conservador, factores de seguridad apropiados, y consideración de eventos extremos. La recuperación rápida se refiere a la capacidad de restaurar la operatividad en el menor tiempo posible después de un evento. Esto requiere planificación de mantenimiento, disponibilidad de recursos y personal, y procedimientos claros de recuperación (ICOLD, 2019; Banco Mundial, 2023).

La aplicación de la teoría de resiliencia en gestión de cuencas implica transitar de modelos de resistencia rígida hacia sistemas adaptativos que puedan convivir con la variabilidad natural, incorporando incertidumbre climática y dinámicas ecosistémicas en el diseño y operación de infraestructura (UNESCO, 2012; UNDRR, 2015). Este cambio paradigmático es particularmente relevante en el contexto del cambio climático, donde la incertidumbre sobre futuros escenarios hace que la capacidad de adaptación sea más valiosa que la capacidad de resistencia a condiciones específicas.

La teoría de resiliencia también proporciona un marco para pensar sobre la gestión de cuencas como un proceso de aprendizaje adaptativo, donde las intervenciones se basan en el mejor conocimiento disponible, pero se reconocen como experimentos que proporcionarán información que puede ser usada para mejorar intervenciones futuras. Este enfoque es particularmente valioso en contextos de alta incertidumbre, donde las intervenciones basadas en conocimiento perfecto no son posibles.

2 Marco Normativo

El marco normativo establece el contexto legal e institucional fundamental que enmarca la gestión de riesgo de desastres y el manejo de cuencas hidrográficas en Colombia, así como los estándares y marcos programáticos internacionales que orientan la prevención, protección y mitigación. Este marco normativo no solo define los marcos regulatorios y las responsabilidades institucionales, sino que también establece los principios y criterios técnicos que deben guiar las decisiones de diseño, planificación e implementación de estrategias de gestión de riesgo en cuencas.

La comprensión del marco normativo es esencial para la práctica de la ingeniería civil en cuencas porque establece tanto las obligaciones legales como los estándares técnicos que deben cumplir los proyectos. Además, el marco normativo refleja la evolución conceptual de la gestión de riesgo de desastres, pasando de enfoques reactivos hacia enfoques proactivos que reconocen el carácter social del riesgo y la necesidad de integrar la gestión del riesgo en la planificación del desarrollo.

Este capítulo se estructura en dos secciones principales: el marco normativo colombiano, que incluye la legislación nacional, políticas públicas e instrumentos de planificación; y el marco programático internacional, que incluye acuerdos multilaterales, estándares técnicos internacionales y marcos de referencia globales. Cada sección analiza no solo el contenido normativo sino también sus implicaciones para la gestión de riesgo en cuencas y los desafíos de implementación.

2.1 Marco normativo colombiano

2.1.1 Decreto 2811 de 1974 – Código Nacional de Recursos Naturales Renovables

El Decreto 2811 de 1974, conocido como el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, constituye un hito histórico en la legislación ambiental colombiana, estableciendo las normas básicas para el uso, manejo y protección de los recursos naturales. A pesar de su antigüedad, este decreto introdujo principios de ordenamiento ambiental que aún constituyen referencia fundamental y base conceptual para la normativa ambiental posterior.

El decreto establece que las cuencas hidrográficas son unidades naturales de planificación y gestión, reconociendo su importancia como sistemas integrados donde convergen procesos

físicos, biológicos y sociales. Esta conceptualización de las cuencas como unidades de gestión fue innovadora para su época y estableció la base para el desarrollo posterior de instrumentos de planificación de cuencas como los POMCA.

En relación con la gestión del recurso hídrico, el Decreto 2811 establece la necesidad de preservar el recurso hídrico tanto en su cantidad como en su calidad, reconociendo el agua como un recurso de dominio público y estableciendo la obligación del Estado de protegerlo. El decreto regula las actividades que puedan afectar la calidad y cantidad del agua, estableciendo la necesidad de obtener permisos y concesiones para el uso del agua y estableciendo prohibiciones y restricciones para actividades que puedan causar contaminación o deterioro.

Los principios consagrados en el decreto incluyen: uso racional de los recursos naturales, reconociendo que son finitos y deben ser utilizados de manera eficiente; conservación, estableciendo la necesidad de preservar los ecosistemas y la biodiversidad; y manejo sostenible, reconociendo la necesidad de balancear el uso de los recursos con su conservación para las generaciones futuras. Estos principios han sido desarrollados y especificados por normativas posteriores, pero su origen conceptual se encuentra en este decreto fundamental.

En el contexto de la gestión de riesgo en cuencas, el Decreto 2811 establece las bases para la protección de áreas de importancia ecológica, la regulación de actividades en zonas de ronda hídrica, y el establecimiento de áreas protegidas que proporcionan servicios ecosistémicos de regulación hídrica. Aunque el decreto no aborda explícitamente la gestión del riesgo de desastres en el sentido moderno, establece principios que son esenciales para la prevención de desastres mediante la protección de ecosistemas que proporcionan servicios de regulación natural.

2.1.2 Ley 99 de 1993 – Sistema Nacional Ambiental (SINA)

La Ley 99 de 1993 representa una transformación fundamental en la institucionalidad ambiental colombiana, creando el Ministerio del Medio Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y organizando el Sistema Nacional Ambiental (SINA), estableciendo el principio de desarrollo sostenible como directriz nacional. Esta ley no solo crea una nueva estructura institucional, sino que redefine los principios fundamentales de la gestión ambiental en Colombia, estableciendo que el desarrollo económico debe realizarse de manera compatible con la conservación del ambiente y la protección de los recursos naturales.

El SINA está constituido por el conjunto de políticas, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permiten la puesta en marcha de los principios y orientaciones generales contenidos en la Ley 99. La estructura del SINA incluye: el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible como máxima autoridad; las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y de Desarrollo Sostenible como autoridades ambientales regionales; los municipios y distritos como autoridades ambientales urbanas; y entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, y Parques Nacionales Naturales de Colombia.

Las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) tienen funciones fundamentales en la gestión de cuencas hidrográficas, incluyendo: administrar el medio ambiente y los recursos naturales renovables en su jurisdicción; otorgar concesiones, permisos y autorizaciones para el uso del agua; formular y ejecutar los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA); ejercer funciones de control y vigilancia sobre el uso del agua; y ejecutar políticas, planes, programas y proyectos sobre recursos naturales renovables y ambiente. Estas funciones

hacen de las CAR actores centrales en la gestión de riesgo en cuencas, ya que tienen responsabilidades tanto en la planificación como en el control y la gestión directa.

La Ley 99 establece los POMCA como el instrumento central para la ordenación ambiental de las cuencas hidrográficas, integrando la gestión del recurso hídrico, la conservación de ecosistemas y la zonificación de usos del suelo. Los POMCA deben ser formulados por las CAR para las cuencas de su jurisdicción, y una vez aprobados, sus determinantes ambientales son de obligatorio cumplimiento y se incorporan en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de los municipios. Esta relación entre POMCA y POT es fundamental para la gestión de riesgo, ya que permite que la planificación territorial a nivel municipal incorpore las restricciones y orientaciones definidas a nivel de cuenca.

El desarrollo normativo posterior de la Ley 99, especialmente el Decreto 1640 de 2012, especificó el contenido y proceso de formulación de los POMCA. Sin embargo, la implementación efectiva de los POMCA ha enfrentado múltiples desafíos, incluyendo la complejidad técnica de su formulación, la necesidad de información técnica actualizada y detallada, la coordinación entre múltiples actores y jurisdicciones, y la disponibilidad de recursos financieros y técnicos para su formulación e implementación. A pesar de estos desafíos, los POMCA constituyen el instrumento principal para integrar la gestión ambiental y del riesgo a nivel de cuenca en Colombia.

2.1.3 Ley 1523 de 2012 – Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

La Ley 1523 de 2012 adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), representando un avance fundamental en la institucionalización de la gestión del riesgo en Colombia. Esta ley

consolida el marco institucional para la prevención, atención y recuperación de desastres, estableciendo responsabilidades claras para autoridades territoriales y sectoriales, y definiendo principios y estrategias para la reducción del riesgo.

El SNGRD está conformado por el conjunto de políticas, estrategias, instituciones, normas, recursos y procedimientos para la gestión del riesgo, integrando las actividades de todas las entidades públicas, privadas y comunitarias. El sistema se estructura en tres niveles: nacional, liderado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD); departamental y distrital, con comités departamentales y distritales de gestión del riesgo; y municipal, con comités municipales de gestión del riesgo. Esta estructura multinivel busca garantizar la coordinación y articulación de la gestión del riesgo en todos los niveles territoriales.

La ley establece que la gestión del riesgo debe incorporarse en la planificación del desarrollo territorial y sectorial, definiendo instrumentos específicos como los Planes de Gestión del Riesgo de Desastres a nivel nacional, departamental y municipal. Estos planes deben incluir diagnósticos de amenazas, vulnerabilidades y riesgos; estrategias de reducción del riesgo; medidas de preparación y respuesta; y mecanismos de seguimiento y evaluación. La ley enfatiza la importancia de la gestión prospectiva, que busca evitar la generación de nuevo riesgo mediante la planificación adecuada del desarrollo, y la gestión correctiva, que busca reducir el riesgo existente mediante intervenciones de mitigación.

En relación con la planificación territorial, la Ley 1523 establece que los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) deben incorporar determinantes de riesgo, definiendo áreas de alto riesgo no mitigable donde está prohibido el desarrollo urbano, y áreas de riesgo mitigable donde el desarrollo puede realizarse con medidas de mitigación. Esta integración de la gestión

del riesgo en la planificación territorial es fundamental para prevenir la generación de nuevo riesgo mediante el desarrollo urbano y rural no planificado.

La ley también establece que las obras de infraestructura deben diseñarse considerando criterios de resiliencia, reconociendo que la infraestructura no solo debe resistir eventos extremos sino también recuperarse rápidamente después de ellos. Esto requiere que los diseños incorporen consideraciones de cambio climático, eventos extremos, y sistemas de monitoreo y mantenimiento que garanticen la funcionalidad continua de la infraestructura.

Además, la Ley 1523 establece la obligatoriedad de realizar estudios de riesgo para proyectos de desarrollo y obras de infraestructura, y requiere que las licencias y permisos consideren los riesgos identificados. La ley también establece mecanismos para la asignación de recursos para gestión del riesgo, incluyendo el Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, y establece responsabilidades específicas para diferentes sectores y niveles de gobierno.

2.1.4 Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico

La Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (MinAmbiente, 2010) constituye el marco de política pública para la gestión del agua en Colombia, estableciendo lineamientos estratégicos para la ordenación hídrica, determinantes ambientales y caudales ecológicos. Esta política reconoce al agua como un bien de uso público y recurso estratégico para el desarrollo nacional, estableciendo principios fundamentales de gestión integrada, participación social y sustentabilidad que deben orientar todas las decisiones relacionadas con el agua.

La política establece como principios fundamentales: (1) el agua como bien público, que debe ser gestionado de manera que garantice el acceso equitativo y el uso sostenible; (2) la

gestión integrada, que reconoce que el agua debe ser gestionada considerando sus múltiples usos y usuarios, y la interrelación entre los recursos hídricos, el suelo y los ecosistemas; (3) la participación social, que reconoce el derecho de las comunidades a participar en las decisiones sobre el uso y gestión del agua; y (4) la sustentabilidad, que requiere balancear las necesidades actuales con la protección del recurso para las generaciones futuras.

En relación con la ordenación hídrica, la política establece que los POMCA deben establecer zonas de protección y conservación de ecosistemas estratégicos para el ciclo hidrológico, incluyendo páramos, humedales, zonas de recarga de acuíferos, y rondas hídricas. Estas zonas cumplen funciones esenciales de regulación hídrica, control de erosión, y mantenimiento de la calidad del agua, por lo que su protección es fundamental para la gestión del riesgo en cuencas.

La política también establece que los POMCA deben regular los usos del agua, definiendo prioridades de uso, asignando derechos de agua mediante concesiones, y estableciendo restricciones y prohibiciones cuando sea necesario proteger el recurso. Esta regulación de usos es esencial para prevenir la sobreexplotación del agua y asegurar que se mantengan caudales suficientes tanto para usos humanos como para el mantenimiento de los ecosistemas.

En relación con los caudales ecológicos, la política establece que los POMCA deben definir los caudales mínimos que deben mantenerse en los cauces para garantizar la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y ribereños. Estos caudales ecológicos no solo protegen la biodiversidad, sino que también contribuyen a la regulación natural de eventos extremos, ya que los ecosistemas acuáticos saludables pueden proporcionar servicios de amortiguación durante crecidas.

La política también establece la necesidad de articular la gestión del recurso hídrico con la gestión del riesgo de desastres, reconociendo que las decisiones sobre el uso del agua y la gestión de cuencas tienen implicaciones directas para el riesgo. Por ejemplo, la sobreexplotación de aguas subterráneas puede aumentar la vulnerabilidad a sequías, y la reducción de caudales ecológicos puede aumentar la vulnerabilidad a inundaciones al reducir la capacidad de regulación natural de los ecosistemas.

2.1.5 NSR-10 – Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10, 2010) establece los requisitos técnicos obligatorios para el diseño y construcción de estructuras sismo resistentes en Colombia, siendo aplicable a todas las obras de infraestructura, incluyendo aquellas relacionadas con la gestión del riesgo en cuencas. Este reglamento es de carácter técnico y jurídico, siendo obligatorio su cumplimiento para todas las construcciones en el territorio nacional.

El NSR-10 está fundamentado en el reconocimiento de que Colombia se encuentra en una zona de alta amenaza sísmica debido a la interacción de las placas tectónicas Nazca, Caribe y Suramericana, y establece criterios de diseño que buscan garantizar que las estructuras puedan resistir eventos sísmicos sin colapsar, aunque puedan sufrir daños reparables. Para obras asociadas a la gestión del riesgo, como presas, diques, estructuras de contención, y obras de protección contra inundaciones, el NSR-10 establece requisitos técnicos específicos que son fundamentales para garantizar su estabilidad y funcionalidad durante y después de eventos sísmicos.

Para obras de infraestructura crítica relacionadas con gestión de riesgo, el NSR-10 establece factores de seguridad más estrictos y criterios de desempeño que buscan garantizar que estas estructuras mantengan su funcionalidad incluso después de eventos sísmicos severos. Por ejemplo, las presas y diques deben diseñarse considerando no solo las cargas sísmicas normales, sino también escenarios de eventos extremos, y deben incluir sistemas de monitoreo y auscultación que permitan detectar cualquier comportamiento anómalo.

La aplicación del NSR-10 es esencial para reducir la vulnerabilidad de infraestructura crítica frente a amenazas sísmicas que pueden afectar cuencas hidrográficas. Un colapso de una presa o dique durante un evento sísmico puede generar catástrofes secundarias, incluyendo inundaciones masivas aguas abajo, pérdida de capacidad de regulación de caudales, y afectación de sistemas de abastecimiento de agua. Por tanto, el cumplimiento del NSR-10 no solo protege la infraestructura misma, sino que también protege a las comunidades que dependen de ella.

El NSR-10 también establece requisitos específicos para el diseño de estructuras en zonas de alta amenaza sísmica y con suelos que pueden experimentar fenómenos como licuefacción o amplificación sísmica. Estos requisitos son particularmente relevantes para obras en cuencas, donde los suelos pueden ser depositacionales y susceptibles a estos fenómenos. El reglamento también establece requisitos para el análisis dinámico de estructuras, reconocimiento de suelos, y diseño de fundaciones que son esenciales para obras de infraestructura en cuencas.

2.1.6 Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA)

Los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) constituyen el instrumento central de planificación y gestión de cuencas en Colombia, establecidos por la Ley 99 de 1993 y desarrollados mediante el Decreto 1640 de 2012. Los POMCA son instrumentos de

planificación de mediano y largo plazo que buscan garantizar el uso adecuado, la conservación y la recuperación de las cuencas hidrográficas, integrando la gestión ambiental, la gestión del recurso hídrico, y la gestión del riesgo de desastres.

El proceso de formulación de un POMCA es complejo y requiere información técnica detallada sobre múltiples aspectos de la cuenca. Según el Decreto 1640 de 2012 y la normativa desarrollada por el MinAmbiente, los POMCA deben incluir un diagnóstico integral que comprenda: (1) diagnóstico hidrológico, que incluye análisis de precipitación, escorrentía, caudales, balances hídricos, y variabilidad temporal y espacial de los recursos hídricos; (2) diagnóstico geológico y geomorfológico, que incluye caracterización de suelos, procesos erosivos, movimientos en masa, y estabilidad de laderas; (3) diagnóstico ecológico, que incluye caracterización de ecosistemas, biodiversidad, servicios ecosistémicos, y áreas de importancia ecológica; y (4) diagnóstico socioeconómico, que incluye caracterización de población, actividades económicas, uso del suelo, y usos del agua.

Basado en este diagnóstico integral, los POMCA deben incluir una zonificación ambiental y de usos que defina áreas para conservación, restauración, uso sostenible, y áreas de riesgo donde se deben restringir o prohibir ciertos usos. Esta zonificación es fundamental para la gestión del riesgo, ya que permite identificar áreas donde el desarrollo puede realizarse de manera segura y áreas donde el desarrollo debe ser restringido debido a amenazas naturales.

Los POMCA también deben establecer determinantes ambientales para el ordenamiento territorial, que son disposiciones de obligatorio cumplimiento que se incorporan en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de los municipios. Estas determinantes incluyen restricciones de uso del suelo, límites a la urbanización, requerimientos para obras de infraestructura, y medidas de protección de ecosistemas estratégicos. La incorporación de estas determinantes en los POT

es fundamental para garantizar que la planificación territorial municipal sea coherente con la gestión a nivel de cuenca.

En relación con la gestión del riesgo, los POMCA deben definir áreas de riesgo no mitigable, donde está prohibido el desarrollo urbano debido a amenazas naturales que no pueden ser mitigadas mediante obras de ingeniería. Estas áreas típicamente incluyen zonas de alta amenaza por movimientos en masa, áreas de inundación recurrente, y zonas de alta susceptibilidad sísmica. La definición de estas áreas es crucial para prevenir la generación de nuevo riesgo mediante desarrollo en zonas peligrosas.

Los POMCA también deben establecer caudales ecológicos, que son los caudales mínimos que deben mantenerse en los cauces para garantizar la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos y ribereños. Estos caudales ecológicos no solo protegen la biodiversidad, sino que también contribuyen a la gestión del riesgo al mantener la capacidad de regulación natural de los ecosistemas. La determinación de caudales ecológicos requiere análisis hidrológicos y ecológicos detallados que consideren las necesidades de los ecosistemas en diferentes épocas del año.

Además, los POMCA deben incluir estrategias de conservación y restauración de ecosistemas estratégicos, incluyendo medidas para proteger zonas de recarga de acuíferos, conservar humedales y ciénagas, restaurar cobertura vegetal en zonas de ladera, y proteger rondas hídricas. Estas estrategias son fundamentales para mantener los servicios ecosistémicos de regulación hídrica que reducen el riesgo de desastres.

Finalmente, los POMCA deben incluir programas de seguimiento y monitoreo que permitan evaluar el estado de la cuenca, la efectividad de las medidas implementadas, y la necesidad de ajustar las estrategias. Estos programas deben incluir monitoreo hidrológico,

monitoreo de calidad del agua, monitoreo de cobertura vegetal, y monitoreo de procesos geomorfológicos.

La articulación de los POMCA con los POT y los Planes de Gestión del Riesgo es fundamental para garantizar coherencia en la planificación territorial. Sin embargo, esta articulación ha enfrentado desafíos debido a diferencias en los períodos de actualización de estos instrumentos, falta de coordinación entre autoridades, y limitada capacidad técnica en entidades locales para incorporar las determinantes ambientales y de riesgo en la planificación territorial.

2.1.7 Análisis crítico del marco normativo colombiano

El marco normativo colombiano para la gestión de riesgo en cuencas presenta importantes avances conceptuales e institucionales que lo sitúan entre los marcos más avanzados de América Latina. La Ley 1523 de 2012 establece un sistema nacional de gestión del riesgo con estructura multinivel, la Ley 99 de 1993 crea un sistema nacional ambiental robusto, y los POMCA proporcionan un instrumento de planificación a nivel de cuenca que integra múltiples dimensiones. Sin embargo, este marco normativo enfrenta desafíos significativos en su implementación práctica que limitan su efectividad.

El primer desafío crítico es la limitada capacidad institucional en entidades locales, especialmente en municipios pequeños y medianos, para formular y ejecutar POMCA y planes de gestión del riesgo. La formulación de un POMCA requiere información técnica detallada, capacidades técnicas especializadas, y recursos financieros significativos. Muchas entidades territoriales no cuentan con el personal técnico capacitado ni con los recursos necesarios para desarrollar estos instrumentos de manera adecuada. Esto resulta en POMCA que pueden ser

formulados pero que carecen de la calidad técnica necesaria para ser efectivos, o que no se implementan debido a falta de recursos para ejecutar las medidas propuestas.

El segundo desafío es la insuficiencia presupuestal para la implementación de medidas preventivas. Aunque la Ley 1523 establece el Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, los recursos disponibles frecuentemente se destinan principalmente a la respuesta y recuperación ante desastres, en lugar de destinarse a medidas preventivas y de mitigación. Esta tendencia a priorizar la respuesta sobre la prevención, aunque comprensible políticamente, limita la capacidad de reducir el riesgo antes de que se materialice en desastres. Los recursos para mantenimiento de infraestructura de protección son particularmente escasos, comprometiendo la efectividad a largo plazo de las obras construidas.

El tercer desafío es la falta de actualización periódica de información técnica y cartográfica. Los POMCA requieren información actualizada sobre hidrología, geología, ecosistemas, y usos del suelo, pero esta información frecuentemente no está disponible o está desactualizada. El IDEAM y el IGAC proporcionan información a nivel nacional, pero la escala y detalle requeridos para POMCA específicos frecuentemente requiere estudios locales adicionales que no se realizan debido a limitaciones de recursos. Además, los cambios rápidos en el uso del suelo y el desarrollo urbano hacen que la información se vuelva obsoleta rápidamente, requiriendo actualizaciones frecuentes que no siempre se realizan.

El cuarto desafío es la débil articulación entre POMCA, POT y planes de gestión del riesgo. Aunque la normativa establece que estos instrumentos deben articularse, en la práctica frecuentemente se desarrollan de manera independiente, con diferentes períodos de actualización, y sin mecanismos efectivos de coordinación. Los POMCA pueden establecer determinantes ambientales que no se incorporan efectivamente en los POT, o los POT pueden aprobarse sin

considerar las determinantes de los POMCA. Esta falta de articulación resulta en planificación territorial incoherente que no refleja adecuadamente las restricciones y oportunidades definidas a nivel de cuenca.

El quinto desafío es la limitación de mecanismos de control y sanción por incumplimiento de determinantes ambientales y de riesgo. Aunque la normativa establece que las determinantes de los POMCA son de obligatorio cumplimiento, los mecanismos para verificar su cumplimiento y sancionar su incumplimiento son limitados. Las autoridades ambientales tienen capacidad limitada para ejercer control efectivo sobre el desarrollo urbano y rural, especialmente cuando este desarrollo se realiza de manera informal o sin los permisos requeridos. Esto resulta en que las determinantes ambientales y de riesgo frecuentemente se violan sin consecuencias, comprometiendo la efectividad de la planificación.

A pesar de estos desafíos, el marco normativo colombiano ha logrado avances importantes. La creación del SNGRD ha mejorado la coordinación interinstitucional, los POMCA se han formulado para muchas cuencas importantes del país, y la incorporación de gestión del riesgo en la planificación territorial ha mejorado. Sin embargo, para que el marco normativo alcance su potencial completo, es necesario fortalecer las capacidades institucionales, aumentar los recursos para prevención, mejorar la disponibilidad de información técnica, fortalecer la articulación entre instrumentos, y desarrollar mecanismos más efectivos de control y sanción (OCDE, 2022; Contraloría General, 2021).

2.2 Marco programático internacional

2.2.1 Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030

El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, adoptado en la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre Reducción del Riesgo de Desastres celebrada en Sendai, Japón, en 2015, constituye el marco global más importante para la reducción del riesgo de desastres. Este marco establece cuatro prioridades de acción y siete metas globales cuantificables para 2030, proporcionando una guía para la acción de todos los países, organizaciones internacionales, y actores relevantes.

Las cuatro prioridades de acción del Marco de Sendai son: (1) comprender el riesgo de desastres, lo cual requiere conocimiento y comprensión de las amenazas, exposición, vulnerabilidad y capacidad, así como los sistemas de gestión del riesgo; (2) fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar el riesgo, lo cual requiere marcos institucionales, legales y de políticas que faciliten la gestión efectiva del riesgo en todos los niveles; (3) invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia, lo cual requiere asignación de recursos financieros, humanos y técnicos para medidas preventivas y de mitigación; y (4) mejorar la preparación para una respuesta eficaz y para "reconstruir mejor" en la recuperación, rehabilitación y reconstrucción, lo cual requiere sistemas de preparación, respuesta y recuperación que permitan responder efectivamente a desastres y reconstruir de manera que se reduzca el riesgo futuro.

Las siete metas globales del Marco de Sendai para 2030 son cuantificables y medibles: (1) reducir sustancialmente la mortalidad mundial por desastres; (2) reducir sustancialmente el número de personas afectadas a nivel mundial; (3) reducir las pérdidas económicas directas en relación con el producto interno bruto mundial; (4) reducir sustancialmente los daños a la

infraestructura crítica y la interrupción de los servicios básicos; (5) aumentar sustancialmente el número de países con estrategias nacionales y locales de reducción del riesgo de desastres; (6) mejorar sustancialmente la cooperación internacional; y (7) aumentar sustancialmente la disponibilidad y el acceso a sistemas de alerta temprana multiamenaza e información y evaluaciones del riesgo de desastres.

El Marco de Sendai enfatiza la importancia de la gestión multiamenaza, reconociendo que los desastres frecuentemente involucran múltiples amenazas que interactúan, y que la gestión debe abordar estas interacciones. El marco también enfatiza la integración del riesgo en la planificación del desarrollo, reconociendo que la reducción del riesgo debe ser parte integral de todas las decisiones de desarrollo, no una consideración separada o posterior. Este enfoque es particularmente relevante para la gestión de cuencas, donde múltiples amenazas (inundaciones, deslizamientos, sequías, sismos) pueden interactuar y donde las decisiones de desarrollo tienen implicaciones directas para el riesgo.

El Marco de Sendai también establece principios fundamentales para la reducción del riesgo, incluyendo: responsabilidad compartida entre todos los niveles de gobierno y sectores; participación de todos los actores relevantes, incluyendo comunidades, sector privado y sociedad civil; enfoque basado en derechos humanos; y consideración de género, edad, discapacidad y perspectivas culturales. Estos principios son fundamentales para la implementación efectiva de la reducción del riesgo y son relevantes para la gestión de cuencas, donde múltiples actores tienen intereses y responsabilidades.

En el contexto de la gestión de cuencas, el Marco de Sendai proporciona orientación importante sobre cómo integrar la reducción del riesgo en la planificación y gestión de cuencas. El marco enfatiza la importancia de comprender el riesgo, lo cual requiere información sobre

amenazas, exposición y vulnerabilidad en cuencas. El marco también enfatiza la importancia de invertir en reducción del riesgo, lo cual incluye inversión en infraestructura de protección, restauración ecosistémica, y fortalecimiento de capacidades. Finalmente, el marco enfatiza la importancia de la gobernanza, lo cual incluye marcos normativos e institucionales que faciliten la gestión efectiva del riesgo en cuencas (UNDRR, 2015).

2.2.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, establecen 17 objetivos globales con 169 metas específicas que buscan abordar los desafíos más críticos del desarrollo sostenible. Varios de estos objetivos están directamente relacionados con la gestión de cuencas y la reducción del riesgo de desastres, proporcionando un marco global para la acción que complementa y refuerza el Marco de Sendai.

El ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) tiene como objetivo garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Entre sus metas específicas relevantes para la gestión de cuencas se incluyen: lograr el acceso universal y equitativo al agua potable; mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación; aumentar sustancialmente el uso eficiente de los recursos hídricos; implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles; y proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua. La gestión de cuencas es fundamental para lograr estas metas, ya que las cuencas son las unidades naturales donde se gestionan los recursos hídricos y donde se pueden proteger y restaurar los ecosistemas relacionados con el agua.

El ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) busca lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Entre sus metas

específicas relevantes para la gestión de riesgo en cuencas se incluyen: reducir significativamente el número de muertes y de personas afectadas por los desastres; reducir las pérdidas económicas directas causadas por los desastres; y apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales mediante el fortalecimiento de la planificación del desarrollo nacional y regional. La gestión de riesgo en cuencas es esencial para lograr estas metas, especialmente considerando que muchas ciudades están ubicadas en cuencas y son vulnerables a eventos extremos relacionados con el agua.

El ODS 13 (Acción por el clima) tiene como objetivo adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Entre sus metas específicas relevantes se incluyen: fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales; incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales; y mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana. El cambio climático está aumentando la frecuencia e intensidad de eventos extremos relacionados con el agua (inundaciones, sequías), haciendo que la gestión de riesgo en cuencas sea aún más crítica.

Además de estos objetivos específicos, otros ODS también tienen relevancia para la gestión de cuencas. El ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres) busca proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, lo cual es relevante para la protección de ecosistemas en cuencas. El ODS 1 (Fin de la pobreza) y el ODS 10 (Reducción de las desigualdades) son relevantes porque las poblaciones pobres y marginadas frecuentemente son las más vulnerables a los desastres relacionados con el agua y tienen menor capacidad para recuperarse.

La integración de los ODS en la gestión de cuencas requiere enfoques que reconozcan las interrelaciones entre los diferentes objetivos y que busquen generar co-beneficios. Por ejemplo, la restauración de ecosistemas en cuencas puede contribuir simultáneamente al ODS 6 (protección de ecosistemas relacionados con el agua), al ODS 13 (adaptación al cambio climático), al ODS 15 (protección de ecosistemas terrestres), y al ODS 11 (reducción de riesgo de desastres). Esta integración requiere marcos de planificación y gestión que reconozcan estas interrelaciones y que busquen maximizar los co-beneficios (ONU, 2015).

2.2.3 Estándares internacionales técnicos

Los estándares técnicos internacionales proporcionan criterios y metodologías que guían el diseño, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura relacionada con la gestión de riesgo en cuencas. Estos estándares son desarrollados por organismos técnicos internacionales reconocidos y constituyen referencias mundiales para la práctica profesional de la ingeniería civil en gestión de cuencas.

ISO 31000:2018 – Gestión del riesgo. La norma ISO 31000:2018 establece principios, marco de referencia y proceso para la gestión del riesgo, proporcionando una metodología sistemática y estructurada para identificar, analizar, evaluar y tratar riesgos. La norma es aplicable a organizaciones de cualquier tipo y tamaño, y proporciona el marco metodológico fundamental para la evaluación de riesgos en proyectos de infraestructura en cuencas. Los principios establecidos por ISO 31000 incluyen: la gestión del riesgo crea y protege valor; es parte integral de todos los procesos organizacionales; es parte de la toma de decisiones; aborda explícitamente la incertidumbre; es sistemática, estructurada y oportuna; está basada en la mejor información disponible; está adaptada al contexto; tiene en cuenta factores humanos y culturales;

es transparente e inclusiva; es dinámica, iterativa y sensible al cambio; facilita la mejora continua de la organización.

El proceso de gestión del riesgo establecido por ISO 31000 incluye: (1) establecimiento del contexto, que comprende la definición de los parámetros externos e internos que deben considerarse al gestionar el riesgo; (2) evaluación del riesgo, que comprende la identificación, análisis y evaluación de riesgos; (3) tratamiento del riesgo, que comprende la selección e implementación de opciones para modificar el riesgo; (4) seguimiento y revisión, que comprende el monitoreo continuo y la revisión periódica del riesgo y del proceso de gestión del riesgo. Este proceso es aplicable a la gestión de riesgo en cuencas, proporcionando un marco sistemático para identificar amenazas, evaluar vulnerabilidades y exposición, y diseñar estrategias de mitigación.

ICOLD – International Commission on Large Dams. La ICOLD es una organización técnica no gubernamental internacional que proporciona un foro para el intercambio de conocimientos y experiencias en ingeniería de presas. La ICOLD establece directrices técnicas para la seguridad de presas, desde el diseño hasta la operación y mantenimiento, siendo una referencia mundial para la práctica profesional en ingeniería de presas. Los lineamientos de la ICOLD (2019, 2020) incluyen criterios detallados de seguridad estructural e hidráulica, sistemas de monitoreo y auscultación, planes de emergencia, y gestión de sedimentos.

Los lineamientos de la ICOLD establecen requisitos específicos para el diseño de presas que consideran múltiples aspectos: estabilidad estructural bajo cargas estáticas y dinámicas (sísmicas), seguridad hidráulica considerando eventos extremos, sistemas de monitoreo que incluyen instrumentación geotécnica (piezómetros, inclinómetros, extensómetros) e hidrológica (medición de caudales, niveles de embalse), planes de emergencia que incluyen procedimientos

de evacuación y sistemas de comunicación, y gestión de sedimentos que incluye estrategias para minimizar la sedimentación y mantener la capacidad del embalse.

Estos estándares son particularmente relevantes para la gestión de riesgo en cuencas, ya que las presas son obras críticas que pueden tener impactos significativos aguas arriba y aguas abajo, y cuyas fallas pueden generar catástrofes. La aplicación sistemática de los estándares de la ICOLD es esencial para garantizar la seguridad de las presas y reducir el riesgo asociado con estas obras.

FEMA/USACE – Estándares de los Estados Unidos. La Federal Emergency Management Agency (FEMA) y el U.S. Army Corps of Engineers (USACE) establecen estándares técnicos avanzados para la evaluación de riesgos, diseño de obras de protección contra inundaciones, y administración de programas de gestión del riesgo. Los lineamientos del USACE (2017) sobre seguridad de presas establecen requisitos técnicos detallados para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de presas, incluyendo criterios de seguridad, sistemas de monitoreo, y planes de emergencia. Estos lineamientos son particularmente avanzados en aspectos como análisis de riesgo probabilístico, evaluación de desempeño sísmico, y gestión adaptativa de presas.

Los estándares del National Flood Insurance Program (NFIP) de FEMA (2020) establecen criterios para la evaluación de riesgo de inundación, diseño de obras de protección, y administración de programas de seguro de inundación. Estos estándares incluyen metodologías para el mapeo de riesgo de inundación, establecimiento de zonas de riesgo, y diseño de estructuras resistentes a inundaciones. El NFIP también establece requisitos para comunidades que participan en el programa, incluyendo regulaciones de uso del suelo que restringen el desarrollo en zonas de alto riesgo.

Estos estándares constituyen referencias técnicas avanzadas para la gestión de riesgos hídricos, proporcionando metodologías y criterios que han sido probados en contextos de alta complejidad técnica. Sin embargo, su aplicación en contextos diferentes requiere adaptación a las condiciones locales, incluyendo disponibilidad de información, capacidad técnica, y recursos financieros.

OMM – Organización Meteorológica Mundial. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) proporciona lineamientos y estándares para sistemas de alerta temprana, monitoreo hidrometeorológico, y gestión de información climática. Los estándares de la OMM (2021) son esenciales para el diseño de sistemas de alerta temprana y monitoreo hidrológico en cuencas, estableciendo requisitos para la calidad de datos, procedimientos de observación, transmisión de información, y generación de alertas.

Los sistemas de alerta temprana según los estándares de la OMM deben incluir: (1) conocimiento del riesgo, que requiere mapas de amenaza, evaluación de vulnerabilidad, y sistemas de monitoreo; (2) monitoreo y pronóstico, que requiere redes de observación, modelos de pronóstico, y sistemas de información; (3) comunicación de alertas, que requiere sistemas de comunicación confiables y protocolos claros; y (4) capacidad de respuesta, que requiere planes de emergencia, capacidades de respuesta, y sistemas de evacuación.

Los estándares de la OMM también establecen requisitos para la calidad de datos hidrometeorológicos, incluyendo procedimientos de calibración, validación, y control de calidad. Estos estándares son fundamentales para garantizar que la información utilizada en la gestión de riesgo en cuencas sea confiable y de alta calidad.

UNESCO – Gestión de recursos hídricos. La UNESCO, a través de su Programa Hidrológico Internacional (PHI), promueve enfoques de gestión integrada de recursos hídricos y

soluciones basadas en la naturaleza. Los lineamientos de la UNESCO (2012) sobre gestión del agua bajo incertidumbre proporcionan marcos conceptuales y metodológicos para la adaptación al cambio climático en cuencas, reconociendo que la gestión del agua debe adaptarse a condiciones de alta incertidumbre sobre futuros escenarios climáticos.

Los lineamientos de la UNESCO enfatizan la importancia de enfoques adaptativos que reconozcan la incertidumbre inherente en la gestión del agua, especialmente en el contexto del cambio climático. Estos enfoques incluyen: gestión adaptativa que permita ajustar estrategias basándose en nueva información y experiencias; diversificación de estrategias para no depender de una única solución; y fortalecimiento de la capacidad adaptativa de sistemas y comunidades.

Los lineamientos de la UNESCO también promueven soluciones basadas en la naturaleza, reconociendo que los ecosistemas pueden proporcionar servicios de regulación hídrica que complementan o sustituyen infraestructura gris. Estas soluciones incluyen restauración de humedales, conservación de bosques, y manejo de suelos que mejore la infiltración y reduzca la escorrentía. Estas soluciones son particularmente relevantes para la gestión de riesgo en cuencas, ya que pueden reducir tanto la probabilidad como el impacto de eventos extremos.

2.2.4 Marco Ambiental y Social del Banco Mundial (ESF)

El Marco Ambiental y Social (ESF) del Banco Mundial (2018) establece los estándares que deben cumplir todos los proyectos financiados por esta institución, exigiendo evaluaciones exhaustivas de riesgos e impactos ambientales y sociales. El ESF reemplazó las políticas anteriores de salvaguardias ambientales y sociales del Banco Mundial, estableciendo un marco

más integrado y comprehensivo que busca garantizar que los proyectos contribuyan al desarrollo sostenible mientras minimizan impactos negativos y gestionan riesgos de manera adecuada.

El ESF incluye diez estándares ambientales y sociales que deben cumplir los proyectos:

- (1) Evaluación y gestión de riesgos e impactos ambientales y sociales;
- (2) Trabajo y condiciones laborales;
- (3) Eficiencia de los recursos y prevención y control de la contaminación;
- (4) Salud y seguridad de la comunidad;
- (5) Adquisición de tierras, restricciones sobre el uso de la tierra y reasentamiento involuntario;
- (6) Conservación de la biodiversidad y gestión sostenible de los recursos naturales vivos;
- (7) Pueblos indígenas/subsaharianos históricamente desatendidos;
- (8) Patrimonio cultural;
- (9) Instituciones financieras; y
- (10) Participación de los interesados y divulgación de información.

Para proyectos de infraestructura en cuencas, el ESF establece requisitos específicos sobre evaluación ambiental estratégica, que debe considerar no solo los impactos directos del proyecto sino también los impactos acumulativos de múltiples proyectos y las interacciones entre proyectos. Esto es particularmente relevante en cuencas donde múltiples proyectos pueden interactuar de manera compleja, generando impactos acumulativos que pueden no ser evidentes cuando se evalúa cada proyecto individualmente.

El ESF también establece requisitos estrictos sobre participación de comunidades afectadas, exigiendo que las comunidades tengan acceso a información sobre el proyecto, oportunidades para expresar sus preocupaciones, y mecanismos para participar en la toma de decisiones. Esta participación es particularmente importante en proyectos en cuencas, donde las comunidades pueden tener conocimiento local valioso sobre procesos naturales, historial de eventos extremos, y estrategias tradicionales de gestión del riesgo.

En relación con la gestión de recursos hídricos, el ESF establece que los proyectos deben considerar los impactos sobre los recursos hídricos, incluyendo cantidad, calidad, y disponibilidad para otros usos y usuarios. Los proyectos deben evaluar los impactos sobre ecosistemas acuáticos, considerar la disponibilidad de agua para otros usos, y diseñar medidas para minimizar impactos negativos. Para proyectos que afectan significativamente los recursos hídricos, el ESF exige que se desarrollen planes de gestión de recursos hídricos que consideren múltiples usos y usuarios.

El ESF también establece requisitos sobre prevención de riesgos de desastres, exigiendo que los proyectos evalúen los riesgos de desastres naturales y diseñen medidas apropiadas para gestionar estos riesgos. Esto incluye evaluar la exposición a amenazas naturales, la vulnerabilidad de los proyectos y comunidades afectadas, y diseñar medidas para reducir el riesgo. Los proyectos también deben considerar cómo pueden contribuir a aumentar el riesgo para otras áreas o comunidades, y diseñar medidas para evitar o minimizar estos impactos indirectos.

Estos estándares son aplicados en proyectos de gran escala financiados por el Banco Mundial y constituyen referencia para mejores prácticas en gestión ambiental y social de infraestructura. La aplicación de estos estándares en proyectos en cuencas requiere capacidades técnicas significativas y recursos adecuados, pero proporciona marcos sólidos para garantizar que los proyectos contribuyan al desarrollo sostenible mientras gestionan adecuadamente los riesgos ambientales y sociales.

2.2.5 Comparación crítica entre marcos

El análisis comparativo entre el marco normativo colombiano y los estándares y marcos internacionales revela importantes convergencias conceptuales, pero también brechas significativas en la implementación práctica. Esta comparación es fundamental para identificar oportunidades de mejora y fortalecimiento del marco normativo colombiano basándose en experiencias y estándares internacionales probados.

En el nivel programático y político, la Ley 1523 de 2012 comparte principios fundamentales con el Marco de Sendai, incluyendo el enfoque en gestión integral del riesgo, la importancia de la prevención sobre la respuesta, y la integración del riesgo en la planificación del desarrollo. Ambos marcos reconocen que la gestión del riesgo debe ser un proceso continuo que involucre múltiples actores y niveles de gobierno. Sin embargo, mientras el Marco de Sendai enfatiza explícitamente la gestión multiamenaza, en la práctica colombiana aún falta incorporar plenamente este enfoque en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y en la planificación de proyectos de infraestructura. Los POT frecuentemente abordan amenazas individuales sin considerar las interacciones entre múltiples amenazas, lo cual puede resultar en estrategias de mitigación que abordan una amenaza, pero aumentan la vulnerabilidad a otras.

En relación con la financiación de la gestión del riesgo, mientras el Marco de Sendai enfatiza la importancia de invertir en reducción del riesgo, en Colombia aún falta garantizar mecanismos financieros sostenibles para la operación y mantenimiento de infraestructuras de protección. Los recursos disponibles frecuentemente se destinan principalmente a la respuesta y recuperación, en lugar de a medidas preventivas y mantenimiento. El Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres existe, pero sus recursos son limitados y frecuentemente se utilizan reactivamente. Se requieren mecanismos adicionales que garanticen financiación sostenible para

mantenimiento preventivo, actualización de sistemas de monitoreo, y fortalecimiento de capacidades institucionales.

En el nivel de gestión integrada de recursos hídricos, los POMCA se alinean conceptualmente con los principios de la IWRM promovidos por organizaciones internacionales como la UNESCO y el Global Water Partnership. Ambos enfoques reconocen la cuenca como unidad de gestión, enfatizan la necesidad de considerar múltiples usos y usuarios, y buscan balancear objetivos económicos, sociales y ambientales. Sin embargo, la implementación de los POMCA ha sido desigual, con variaciones significativas en la calidad y efectividad entre diferentes cuencas. Además, los POMCA carecen de mecanismos de evaluación ambiental estratégica equivalentes a los exigidos por el Banco Mundial o la Unión Europea, que requerirían evaluar los impactos acumulativos de múltiples proyectos y políticas en una cuenca.

En el nivel de estándares técnicos, las normas colombianas (NSR-10) y los estándares internacionales (ICOLD, ISO 31000) presentan buenos niveles de alineación en criterios de seguridad estructural. El NSR-10 incorpora principios y criterios consistentes con estándares internacionales, y los lineamientos de la ICOLD sobre seguridad de presas son reconocidos y utilizados en Colombia. Sin embargo, persisten brechas importantes en la aplicación sistemática de estos estándares. No todos los proyectos de infraestructura aplican sistemáticamente estos estándares, especialmente proyectos de menor escala o proyectos del sector privado que pueden no estar sujetos a los mismos requisitos de licenciamiento y supervisión.

Otra brecha importante es la capacitación técnica de profesionales. Aunque los estándares internacionales existen y están disponibles, no todos los profesionales de ingeniería civil en Colombia tienen acceso a capacitación sobre su aplicación específica en gestión de riesgo en cuencas. Esto puede resultar en que los estándares se interpreten de manera inconsistente o no se

apliquen de manera completa. Se requieren programas de capacitación continua que actualicen a los profesionales sobre estándares internacionales y mejores prácticas.

La incorporación de estándares internacionales en procesos de licenciamiento y contratación pública fortalecería significativamente la calidad técnica de las obras de protección en cuencas. Actualmente, los procesos de licenciamiento ambiental y de contratación pública pueden no exigir explícitamente el cumplimiento de estándares internacionales específicos, aunque estos pueden estar referenciados indirectamente. Establecer requisitos explícitos de cumplimiento de estándares internacionales en procesos de licenciamiento y contratación proporcionaría incentivos claros para su aplicación sistemática.

Otra área de oportunidad es la armonización entre estándares nacionales e internacionales. Aunque existe buena alineación conceptual, hay aspectos donde los estándares nacionales podrían fortalecerse incorporando elementos específicos de estándares internacionales. Por ejemplo, los lineamientos nacionales sobre seguridad de presas podrían incorporar más explícitamente los criterios de la ICOLD sobre monitoreo y auscultación. Los procesos de actualización de normas nacionales podrían incluir revisiones sistemáticas de estándares internacionales para identificar oportunidades de fortalecimiento.

Finalmente, es importante reconocer que la aplicación efectiva de estándares internacionales requiere adaptación al contexto colombiano. Los estándares desarrollados en contextos de alta capacidad técnica y recursos financieros significativos pueden requerir adaptación para ser aplicables en contextos con limitaciones de recursos y capacidades. Sin embargo, esta adaptación debe mantener los principios fundamentales de seguridad y calidad, no reducir los estándares a niveles inaceptables. Se requiere equilibrio entre aspiracionalidad y

factibilidad, buscando gradualmente aumentar los estándares mientras se fortalecen las capacidades necesarias para cumplirlos.

3 Estado del Arte

El estado del arte tiene como propósito identificar y analizar críticamente qué se ha investigado sobre la interacción entre fenómenos naturales, desarrollo humano y gestión de riesgo en cuencas hidrográficas, qué metodologías han sido utilizadas, qué resultados se han obtenido, y qué vacíos o limitaciones persisten en la literatura, para clarificar el aporte específico de esta monografía.

3.1 Investigaciones sobre impactos del desarrollo humano en cuencas

La literatura internacional y nacional ha documentado ampliamente que el desarrollo humano modifica significativamente los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos de las cuencas. Investigaciones como las de García y López (2020), Martínez (2017) y Ocampo (2018) han cuantificado el impacto de la urbanización sobre parámetros hidrológicos, demostrando que la impermeabilización del suelo puede incrementar el coeficiente de escorrentía hasta en un 60-80%, reduciendo el tiempo de concentración y aumentando los caudales pico (Martínez, 2017; Smith, 2021). Estos estudios utilizan principalmente modelación hidrológica con herramientas como HEC-HMS, SWAT y modelos de simulación de flujo superficial, complementados con análisis de series históricas de caudales y comparación entre escenarios con y sin intervención antrópica.

Las investigaciones sobre vulnerabilidad física de infraestructura en cuencas han sido lideradas principalmente por organismos técnicos como la ICOLD (2019, 2020) y entidades

académicas. Estos estudios han documentado cómo la invasión de rondas hídricas y la modificación de cauces incrementan la socavación en estructuras de cruce, reduciendo su capacidad portante (ICOLD, 2019; Martínez, 2023; Chow et al., 1988). La metodología predominante incluye análisis de estabilidad geotécnica, modelación de socavación, y evaluación de desempeño estructural bajo cargas hidráulicas extremas.

En el ámbito colombiano, los estudios institucionales del IDEAM (2022) y del IGAC (2019) han cuantificado los impactos a escala nacional, documentando que la urbanización no planificada ha reducido hasta en un 40% la capacidad natural de almacenamiento temporal de los ríos, mientras que la pérdida de cobertura vegetal ha incrementado la erosión en un 25%. Sin embargo, estos estudios son principalmente descriptivos y carecen de análisis comparativos sistemáticos entre diferentes tipos de intervención o entre regiones.

3.2 Metodologías utilizadas en investigación sobre gestión de riesgo en cuencas

La revisión exhaustiva de la literatura revela una diversidad metodológica significativa en los estudios sobre gestión de riesgo en cuencas, reflejando la naturaleza multidisciplinaria del problema y los diferentes objetivos de investigación. Esta diversidad metodológica es valiosa porque permite abordar diferentes aspectos del problema, pero también presenta desafíos para comparar resultados y sintetizar conocimientos.

Los estudios con enfoque en modelación hidrológica representan una categoría importante de investigación, utilizando principalmente modelos matemáticos determinísticos (HEC-HMS, SWAT, MIKE, entre otros) y modelos probabilísticos para estimación de caudales de diseño y análisis de riesgo (Ocampo, 2018; Giraldo, 2019). Estos modelos permiten simular el

comportamiento hidrológico de cuencas bajo diferentes condiciones, incluyendo diferentes escenarios de uso del suelo, eventos de precipitación, y configuraciones de infraestructura.

La metodología típica en estos estudios incluye: (1) recolección y procesamiento de datos hidrometeorológicos históricos, incluyendo precipitación, caudales, y parámetros del suelo; (2) calibración de modelos mediante ajuste de parámetros para reproducir comportamientos históricos observados; (3) validación de modelos mediante comparación con eventos observados no utilizados en la calibración; (4) aplicación de modelos a escenarios futuros o alternativos, incluyendo cambios en uso del suelo, infraestructura, o condiciones climáticas; y (5) análisis de resultados para identificar impactos y evaluar estrategias de mitigación.

Estos estudios requieren datos hidrometeorológicos históricos de calidad, calibración cuidadosa de modelos, y validación rigurosa con eventos observados. Sin embargo, esta limitación se ve significativamente agravada en contextos como Colombia, donde la escasez de series de datos consistentes y la falta de estaciones de monitoreo limitan la capacidad de desarrollar y validar modelos confiables (Giraldo, 2019; Martínez, 2023). Muchas cuencas en Colombia tienen datos limitados o inconsistentes, lo que dificulta la modelación precisa y limita la confiabilidad de los resultados.

Los estudios con enfoque en evaluación de vulnerabilidad utilizan principalmente metodologías de indicadores, índices compuestos y análisis multicriterio (Cardona, 2003; Rodríguez, 2021). Estos estudios identifican variables socioeconómicas, ambientales e infraestructurales que determinan la vulnerabilidad y las integran en modelos de vulnerabilidad que proporcionan índices o clasificaciones de vulnerabilidad.

La metodología típica incluye: (1) identificación de dimensiones de vulnerabilidad (física, social, económica, ambiental, institucional); (2) selección de indicadores que representen

cada dimensión; (3) normalización de indicadores para permitir agregación; (4) ponderación de indicadores, típicamente mediante métodos como análisis de componentes principales, juicio de expertos, o técnicas de optimización; (5) agregación de indicadores en índices de vulnerabilidad; y (6) validación y análisis de sensibilidad de los índices.

Sin embargo, persisten debates significativos en la literatura sobre la ponderación de variables y la validez de índices agregados (Banco Mundial, 2023; CEPAL, 2018). Diferentes métodos de ponderación pueden producir resultados diferentes, y no hay consenso sobre qué método es más apropiado. Además, la agregación de indicadores en índices únicos puede ocultar información importante sobre dimensiones específicas de vulnerabilidad, limitando la utilidad de estos índices para diseñar estrategias de mitigación específicas.

Los estudios con enfoque en evaluación de efectividad de medidas de mitigación utilizan diversas metodologías, incluyendo análisis antes-después de implementación de medidas, estudios de caso comparativos, y análisis de desempeño bajo eventos extremos. Sin embargo, estos estudios son relativamente escasos en la literatura, especialmente estudios que evalúan efectividad a largo plazo y bajo múltiples eventos extremos.

Los estudios comparativos de casos de estudio son particularmente menos frecuentes en la literatura. La mayoría de los trabajos analizan casos individuales en profundidad, proporcionando conocimiento valioso sobre contextos específicos, pero sin establecer marcos comparativos sistemáticos que permitan identificar patrones, variables críticas o lecciones transferibles entre contextos similares. Esta limitación metodológica significa que el conocimiento generado por estudios de casos individuales puede no ser fácilmente transferible a otros contextos, limitando su utilidad para la práctica profesional.

Los estudios que realizan comparaciones frecuentemente comparan solo dos o tres casos, sin utilizar marcos comparativos sistemáticos que permitan identificar qué factores contextuales son determinantes para el éxito o fracaso de diferentes estrategias. Además, estas comparaciones frecuentemente no especifican explícitamente las variables de comparación ni utilizan métodos estructurados de comparación, lo que limita la capacidad de extraer lecciones transferibles.

Esta limitación metodológica constituye una oportunidad significativa para el aporte de esta monografía, que desarrolla un marco comparativo sistemático mediante matrices de análisis que permite comparar múltiples casos sobre variables técnicas específicas, identificando patrones y lecciones transferibles.

3.3 Resultados obtenidos

La revisión sistemática ha permitido identificar resultados consistentes y consensuados sobre varios aspectos fundamentales de la gestión de riesgo en cuencas, así como áreas donde persisten debates o evidencia limitada. La síntesis de estos resultados proporciona una base sólida para el diseño de estrategias de mitigación, aunque también identifica áreas donde se requiere investigación adicional.

Un resultado ampliamente consensuado en la literatura es que las estrategias más efectivas para la reducción del riesgo en cuencas combinan medidas estructurales (presas, diques, sistemas de drenaje, estructuras de contención) con medidas no estructurales (ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana, educación ambiental, restauración ecosistémica) (UNESCO, 2012; Banco Mundial, 2018; UNDRR, 2015). Esta combinación es efectiva porque aborda múltiples dimensiones del riesgo: las medidas estructurales reducen la probabilidad o

magnitud del impacto físico, mientras que las medidas no estructurales reducen la exposición y vulnerabilidad, y fortalecen las capacidades de respuesta y recuperación.

La evidencia de la efectividad de esta combinación proviene de múltiples estudios de casos. Por ejemplo, estudios sobre la cuenca del Misisipi han documentado que la combinación de diques y sistemas de alerta temprana ha reducido significativamente las pérdidas por inundación. Estudios sobre sistemas de gestión de riesgo en países europeos han documentado que la combinación de restauración de llanuras de inundación (medida estructural blanda) con zonificación restrictiva (medida no estructural) es más efectiva que enfoques puramente estructurales. Sin embargo, la literatura también documenta que la combinación efectiva requiere coordinación entre múltiples actores y niveles de gobierno, lo cual puede ser difícil de lograr en contextos con limitada capacidad institucional.

Un segundo resultado consistente es que la aplicación de estándares técnicos internacionales (ICOLD, ISO 31000, NSR-10, entre otros) mejora significativamente la confiabilidad y seguridad de las obras de infraestructura (ICOLD, 2020; FEMA, 2020). Los estudios comparativos han documentado que las obras diseñadas y construidas según estos estándares tienen mejor desempeño durante eventos extremos y menor probabilidad de falla. Sin embargo, la literatura también documenta consistentemente que la aplicación de estándares técnicos es una condición necesaria pero no suficiente: la efectividad de las obras depende críticamente de la continuidad del monitoreo y mantenimiento después de la construcción.

Esta dependencia del mantenimiento es un hallazgo crítico que ha sido documentado en múltiples estudios. Obras bien diseñadas y construidas pueden fallar si no se mantienen adecuadamente, especialmente en contextos donde las condiciones pueden cambiar (por ejemplo, debido a cambio climático, cambios en uso del suelo, o degradación de materiales). Sin embargo,

la literatura también documenta que el mantenimiento es frecuentemente descuidado, especialmente después de la finalización de proyectos, cuando los recursos y atención se desvían hacia nuevos proyectos.

Un tercer resultado consistente es que los sistemas de alerta temprana pueden reducir significativamente las pérdidas humanas cuando se integran efectivamente con redes comunitarias (UNDRR, 2023; OMM, 2021). Los estudios han documentado reducciones de hasta 70% en pérdidas humanas cuando los sistemas de alerta temprana incluyen no solo tecnología de monitoreo y pronóstico, sino también sistemas de comunicación efectivos y redes comunitarias que pueden recibir y responder a las alertas. Sin embargo, la efectividad de los sistemas de alerta temprana depende de múltiples factores, incluyendo la calidad de la información, la velocidad de transmisión, la comprensión de las alertas por parte de las comunidades, y la capacidad de respuesta de las comunidades y autoridades.

La literatura también ha establecido resultados sobre la efectividad relativa de diferentes tipos de medidas estructurales. Por ejemplo, los estudios han documentado que las presas grandes pueden reducir efectivamente los caudales pico durante eventos de precipitación, pero también pueden generar efectos secundarios significativos como sedimentación, alteración de ecosistemas, y reasentamiento de comunidades. Los estudios han documentado que las obras de restauración ecosistémica (como restauración de humedales o revegetalización de laderas) pueden ser complementarias y costo-efectivas comparadas con infraestructura gris tradicional, aunque requieren tiempo para desarrollarse y pueden tener limitaciones en términos de la magnitud de eventos que pueden manejar.

En el contexto colombiano específicamente, los estudios de la CEPAL (2018, 2019) y el Banco Mundial (2021) han documentado que los costos de desastres superan el 0,8% del PIB

anual, evidenciando la necesidad urgente de fortalecer estrategias preventivas. Estos estudios han identificado que la mayor parte de estos costos son atribuibles a eventos relacionados con agua (inundaciones, deslizamientos), y que una proporción significativa de estos costos podría ser evitada mediante medidas preventivas apropiadas. Sin embargo, estos estudios también documentan que la inversión en prevención es significativamente menor que los costos de respuesta y recuperación, indicando una falta de priorización de medidas preventivas.

Los informes de la UNGRD (2022) y la Contraloría General (2021) han identificado brechas específicas en la implementación de los marcos normativos y en el mantenimiento de infraestructura existente. Estos informes documentan que, a pesar de contar con marcos normativos avanzados, la implementación efectiva enfrenta múltiples desafíos, incluyendo limitada capacidad institucional, insuficiencia de recursos, y débil coordinación entre actores. Estos informes también documentan deficiencias específicas en el mantenimiento de infraestructura de protección, incluyendo falta de recursos para mantenimiento preventivo, ausencia de sistemas de monitoreo permanente, y falta de actualización de planes de emergencia.

3.4 Estudios sobre casos específicos y sus metodologías

Los estudios sobre casos específicos de gestión de cuencas constituyen una categoría importante de investigación que proporciona conocimiento detallado sobre contextos particulares y experiencias de implementación. Estos estudios utilizan principalmente metodologías descriptivas, análisis de documentos técnicos y, en algunos casos, entrevistas o talleres con actores clave, aunque la metodología específica varía significativamente entre estudios.

Los estudios sobre la cuenca del Misisipi (USACE, 2019; FEMA, 2020) documentan de manera exhaustiva la evolución del sistema de control de inundaciones desde principios del siglo

XX hasta la actualidad. Estos estudios proporcionan información valiosa sobre el diseño, construcción, operación y mantenimiento del Mississippi River and Tributaries Project (MR&T), incluyendo detalles técnicos sobre obras específicas, sistemas de monitoreo, y estrategias de gestión adaptativa. Sin embargo, estos estudios frecuentemente se enfocan en el contexto específico del Misisipi y no siempre establecen comparaciones sistemáticas con otros casos internacionales que permitan identificar qué aspectos son transferibles y qué factores contextuales son determinantes.

Los estudios sobre la Presa de las Tres Gargantas en China (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2012; Xu et al., 2013) proporcionan análisis detallados de los impactos ambientales y sedimentológicos de esta obra masiva, documentando tasas de sedimentación, alteraciones en flujos ecológicos, y desplazamientos poblacionales. Sin embargo, estos estudios se enfocan principalmente en documentar impactos y desafíos, con menor énfasis en lecciones técnicas específicas para la gestión preventiva que puedan ser aplicadas en otros contextos. Además, estos estudios frecuentemente no proporcionan análisis comparativos que permitan identificar si los desafíos encontrados son únicos a este proyecto o representan desafíos más generales de proyectos de gran escala.

Los estudios sobre casos de gestión de cuencas en países europeos, particularmente relacionados con la implementación de la Directiva Marco del Agua, proporcionan información valiosa sobre transiciones desde enfoques de control rígido hacia enfoques de restauración fluvial y gestión adaptativa. Estos estudios documentan cambios en estrategias de gestión, incluyendo políticas de "Room for the River" que buscan proporcionar espacio para inundaciones controladas en lugar de intentar controlar completamente los ríos. Sin embargo, estos estudios

frecuentemente se enfocan en aspectos de política y gobernanza, con menor detalle técnico sobre aspectos de ingeniería específicos.

En Colombia, los estudios sobre casos específicos como La Mojana (Fondo Adaptación, 2022) y el Canal del Dique (ANI, 2022) documentan de manera detallada las intervenciones realizadas, incluyendo tipos de obras, costos, y resultados preliminares. Estos estudios proporcionan información valiosa sobre el contexto colombiano y las estrategias implementadas, pero frecuentemente carecen de análisis comparativos sistemáticos con casos internacionales que permitan identificar lecciones aprendidas de experiencias en otros contextos. Además, estos estudios frecuentemente no sistematizan variables técnicas críticas en formatos que sean fácilmente aplicables para ingenieros civiles en el diseño y evaluación de proyectos similares.

Los estudios sobre el Proyecto Hidroituango (EPM, 2022) proporcionan análisis detallados de la contingencia ocurrida en 2018, incluyendo análisis de causas técnicas, deficiencias en gestión del riesgo constructivo, y lecciones aprendidas. Estos estudios proporcionan conocimiento valioso sobre gestión del riesgo en proyectos de gran escala, pero frecuentemente se enfocan en aspectos de respuesta a crisis más que en lecciones preventivas que puedan aplicarse en futuros proyectos desde la etapa de diseño.

La metodología predominante en estos estudios de casos específicos incluye análisis documental de informes técnicos, planos, especificaciones de diseño, y evaluaciones de impacto; análisis de datos técnicos cuando están disponibles, incluyendo datos de monitoreo, registros de eventos, y evaluaciones post-obra; y, en algunos casos, entrevistas o talleres con actores clave, incluyendo ingenieros, planificadores, y comunidades afectadas. Sin embargo, estos estudios frecuentemente no utilizan metodologías estructuradas de comparación que permitan extraer lecciones transferibles de manera sistemática.

Esta limitación metodológica significa que, aunque estos estudios proporcionan conocimiento valioso sobre casos específicos, el conocimiento puede no ser fácilmente transferible a otros contextos. Los factores contextuales que determinan el éxito o fracaso de diferentes estrategias frecuentemente no se identifican explícitamente, y las variables técnicas críticas no se sistematizan en formatos que faciliten su uso en diseño y evaluación de proyectos. Esta limitación representa una oportunidad importante para el aporte de esta monografía, que busca sistematizar variables técnicas críticas y establecer comparaciones sistemáticas que permitan identificar patrones y lecciones transferibles.

3.5 Vacíos y limitaciones identificadas

La revisión exhaustiva de la literatura permite identificar varios vacíos y limitaciones importantes que representan oportunidades para investigación futura y que contextualizan el aporte de esta monografía. Estos vacíos no solo reflejan áreas donde falta investigación, sino también limitaciones en cómo se ha abordado la investigación existente.

El primer vacío crítico identificado es la falta de estudios comparativos sistemáticos. La mayoría de los estudios analizan casos individuales en profundidad, proporcionando conocimiento valioso sobre contextos específicos, pero sin establecer marcos comparativos estructurados que permitan identificar patrones comunes, variables técnicas críticas, o lecciones transferibles entre contextos similares. Cuando se realizan comparaciones, frecuentemente se comparan solo dos o tres casos, sin utilizar metodologías estructuradas que permitan identificar qué factores contextuales son determinantes para el éxito o fracaso de diferentes estrategias. Además, estas comparaciones frecuentemente no especifican explícitamente las variables de

comparación ni utilizan matrices o estructuras comparativas que faciliten la identificación de patrones.

Esta falta de estudios comparativos sistemáticos limita significativamente la capacidad de transferir conocimientos de un contexto a otro. Los ingenieros civiles y planificadores que trabajan en un contexto específico pueden no tener acceso fácil a lecciones aprendidas de experiencias similares en otros contextos, lo que puede resultar en que se repitan errores o se pierdan oportunidades de aplicar estrategias que han sido exitosas en otros lugares. Este vacío es particularmente problemático en contextos con limitada experiencia histórica o donde los proyectos son únicos o de gran escala.

El segundo vacío identificado es la limitación en la sistematización de lecciones técnicas. Los estudios documentan experiencias de manera narrativa o descriptiva, pero no siempre las sistematizan en formatos estructurados que permitan su uso directo en diseño y evaluación de proyectos de ingeniería civil. Por ejemplo, los estudios pueden documentar que una estrategia fue exitosa, pero no siempre especifican claramente las condiciones bajo las cuales fue exitosa, las variables técnicas críticas que determinaron el éxito, o cómo estas lecciones pueden aplicarse en contextos diferentes.

Esta limitación hace difícil que los ingenieros civiles utilicen el conocimiento generado por estos estudios en el diseño y evaluación de proyectos. Los formatos narrativos pueden ser valiosos para comprensión contextual, pero pueden no ser los más útiles para aplicaciones prácticas que requieren especificaciones técnicas claras y estructuradas. Se requieren formatos más estructurados, como matrices de análisis, tablas comparativas, o frameworks de evaluación, que faciliten la aplicación práctica del conocimiento.

El tercer vacío identificado es la brecha entre conocimiento técnico y gobernanza. Mientras existe amplio conocimiento técnico sobre obras de ingeniería y medidas de mitigación, persisten limitaciones significativas en estudios sobre cómo articular efectivamente diferentes instrumentos de planificación (POMCA, POT, planes de gestión del riesgo) y cómo garantizar su implementación efectiva. Los estudios técnicos frecuentemente asumen que los marcos normativos e institucionales existirán y funcionarán adecuadamente, pero no analizan en profundidad los desafíos de implementación ni proporcionan guías específicas sobre cómo superar estos desafíos.

Esta brecha es particularmente relevante en contextos como Colombia, donde los marcos normativos pueden ser avanzados conceptualmente, pero enfrentan desafíos significativos en la implementación práctica. Los estudios que abordan aspectos de gobernanza frecuentemente se enfocan en aspectos de política o proceso, sin integrar adecuadamente aspectos técnicos de ingeniería. Se requieren estudios más integrados que aborden tanto aspectos técnicos como de gobernanza de manera conjunta.

El cuarto vacío identificado es la escasez de análisis económico robustos de medidas preventivas. Aunque existen estudios sobre costos de desastres que documentan las pérdidas económicas significativas, son relativamente limitados los análisis costo-beneficio detallados que comparen el costo de medidas preventivas versus el costo de respuesta y recuperación ante desastres. Los estudios económicos existentes frecuentemente no consideran adecuadamente los beneficios no cuantificables de medidas preventivas, no incorporan consideraciones de incertidumbre, o no utilizan horizontes temporales apropiados que reflejen los beneficios a largo plazo de medidas preventivas.

Esta escasez de análisis económico limita la capacidad de priorizar inversiones en medidas preventivas. Sin evidencia económica sólida que demuestre que las medidas preventivas son costo-efectivas comparadas con la respuesta y recuperación, puede ser difícil justificar la asignación de recursos limitados a medidas preventivas, especialmente cuando los beneficios pueden no materializarse durante varios años o décadas. Se requieren más estudios que proporcionen evidencia económica robusta sobre la rentabilidad de medidas preventivas.

El quinto vacío identificado es la limitación metodológica en evaluación de efectividad. Los estudios evaluativos son relativamente escasos en la literatura, especialmente estudios que evalúen la efectividad de medidas implementadas a largo plazo y su desempeño bajo eventos extremos. La mayoría de los estudios se realizan poco después de la implementación de medidas, cuando aún no han transcurrido suficientes eventos extremos para evaluar adecuadamente la efectividad. Los estudios de largo plazo son costosos y requieren continuidad de financiación y personal, lo cual puede ser difícil de mantener.

Además, cuando se realizan evaluaciones, frecuentemente no utilizan metodologías rigurosas que permitan atribuir cambios observados a las medidas implementadas versus otros factores. Los estudios antes-después pueden no controlar adecuadamente por factores externos que también pueden explicar cambios. Los estudios de control pueden ser difíciles de implementar en contextos donde no hay áreas de control apropiadas. Estas limitaciones metodológicas hacen difícil determinar con confianza si las medidas implementadas fueron efectivas y en qué medida.

El sexto vacío identificado es la falta de integración entre disciplinas. Muchos estudios se enfocan en aspectos técnicos, ambientales o sociales de forma relativamente aislada, con menor desarrollo de enfoques interdisciplinarios que integren todas las dimensiones del problema. Los

estudios técnicos pueden abordar aspectos de ingeniería de manera excelente, pero pueden no considerar adecuadamente aspectos sociales o ambientales. Los estudios sociales pueden abordar aspectos de vulnerabilidad y capacidad de manera valiosa, pero pueden no integrar adecuadamente aspectos técnicos de infraestructura. Los estudios ambientales pueden abordar aspectos ecosistémicos de manera detallada, pero pueden no considerar adecuadamente aspectos de infraestructura o desarrollo humano.

Esta falta de integración limita la capacidad de diseñar estrategias comprehensivas que aborden todas las dimensiones del problema. Las estrategias que abordan solo una dimensión pueden generar beneficios en esa dimensión, pero pueden tener efectos negativos en otras dimensiones. Se requieren enfoques más integrados que consideren explícitamente las interrelaciones entre dimensiones técnicas, ambientales, sociales y económicas.

Estos vacíos y limitaciones identificados no solo representan áreas donde falta investigación, sino que también indican cómo el conocimiento existente podría ser más útil si se abordara de manera diferente. El aporte de esta monografía busca abordar algunos de estos vacíos, particularmente mediante el desarrollo de marcos comparativos sistemáticos y la sistematización de lecciones técnicas en formatos aplicables.

A diferencia de estudios que comparan casos de manera narrativa o ad hoc, esta monografía construye matrices de análisis que permiten comparar casos nacionales e internacionales sobre variables técnicas específicas definidas a priori. Estas variables incluyen: tipo de amenaza principal que motiva la intervención; tipo de obra o intervención estructural implementada; medidas no estructurales complementarias; resultados técnicos reportados (reducción de riesgo, eficacia medida); efectos positivos identificados; efectos negativos o externalidades observadas; y lecciones técnicas aprendidas extraídas de manera sistemática.

Esta estructuración permite identificar patrones que pueden no ser evidentes en análisis narrativos, como qué combinaciones de medidas estructurales y no estructurales son más efectivas en diferentes tipos de amenazas, qué factores contextuales parecen ser determinantes para el éxito o fracaso de diferentes estrategias, y qué externalidades o efectos secundarios son más comunes en diferentes tipos de intervenciones. La aplicación sistemática de estas variables a cada caso de estudio permite establecer comparaciones estructuradas que van más allá de comparaciones cualitativas generales.

Mientras muchos estudios documentan experiencias de manera narrativa, esta monografía identifica y sistematiza lecciones técnicas y de gestión de manera estructurada que puede ser aplicada directamente en el diseño y evaluación de proyectos de ingeniería civil en cuencas colombianas. Estas lecciones no solo se presentan como conclusiones generales, sino que se estructuran según variables técnicas específicas, tipos de amenaza, y contextos de aplicación, facilitando su uso por ingenieros civiles que trabajan en proyectos específicos.

Por ejemplo, las lecciones sobre diseño de diques se estructuran según condiciones geotécnicas, tipo de amenaza hidrológica, y factores de seguridad aplicables. Las lecciones sobre integración de medidas estructurales y no estructurales se estructuran según tipo de amenaza y contexto institucional. Esta estructuración facilita que los ingenieros civiles identifiquen lecciones relevantes para sus proyectos específicos y las adapten a su contexto particular.

Mientras muchos estudios se enfocan en aspectos técnicos, ambientales, sociales o de gobernanza de forma relativamente aislada, esta monografía integra análisis técnicos, ambientales, sociales y de gobernanza en un marco analítico coherente que reconoce las interrelaciones entre estas dimensiones. Esta integración es esencial porque las decisiones sobre

gestión de riesgo en cuencas frecuentemente involucran trade-offs entre estas dimensiones, y las estrategias efectivas requieren balancear objetivos en múltiples dimensiones.

Por ejemplo, el análisis no solo evalúa la efectividad técnica de las obras (capacidad de reducir riesgo), sino que también considera sus impactos ambientales (efectos sobre ecosistemas), sociales (efectos sobre comunidades, incluido reasentamiento), y de gobernanza (requisitos institucionales para implementación y mantenimiento). Esta integración permite identificar estrategias que son efectivas en múltiples dimensiones, así como identificar trade-offs que deben ser gestionados.

Los resultados no solo se presentan como conocimiento académico, sino en formatos que facilitan su uso por ingenieros civiles, planificadores y tomadores de decisiones en proyectos reales. Esto incluye: tablas comparativas que pueden ser consultadas directamente durante diseño de proyectos; matrices de análisis que pueden ser utilizadas para evaluar proyectos propuestos; lineamientos estructurados que pueden ser incorporados en especificaciones de diseño; y listas de verificación que pueden ser utilizadas en evaluación de proyectos.

Este enfoque en aplicabilidad práctica diferencia a esta monografía de estudios más académicos que pueden generar conocimiento valioso pero que no siempre se presenta en formatos fácilmente utilizables en la práctica profesional. El conocimiento generado por esta monografía está estructurado de manera que puede ser aplicado directamente sin requerir interpretación extensiva o adaptación significativa por parte de los usuarios.

Mientras otros estudios pueden identificar problemas o desafíos en contextos específicos, esta monografía identifica brechas en la implementación de marcos normativos y oportunidades de mejora basándose en comparaciones sistemáticas entre diferentes contextos. Esto permite identificar no solo qué brechas existen, sino también qué estrategias han sido efectivas en otros

contextos para abordar brechas similares, proporcionando orientación específica sobre cómo mejorar.

Por ejemplo, la comparación entre el marco normativo colombiano y estándares internacionales identifica no solo brechas conceptuales, sino también brechas en implementación que pueden ser abordadas mediante estrategias específicas validadas en otros contextos. La comparación de casos permite identificar qué factores contextuales pueden explicar diferencias en efectividad, proporcionando orientación sobre qué adaptaciones pueden ser necesarias al aplicar estrategias exitosas de otros contextos al contexto colombiano.

4 Metodología

4.1 Tipo de estudio

La presente investigación se enmarca dentro de un enfoque descriptivo, documental y comparativo, que es apropiado para los objetivos de investigación planteados y las limitaciones de recursos y tiempo disponibles. La identificación y justificación explícita del tipo de estudio es fundamental para establecer la coherencia metodológica de la investigación y para comunicar claramente las limitaciones y alcances del conocimiento generado.

El carácter descriptivo de la investigación permite especificar las propiedades, características y relaciones de la interacción entre fenómenos naturales, desarrollo humano y vulnerabilidad en cuencas hidrográficas, sin alterar el contexto de estudio ni intervenir en los fenómenos observados (Hernández et al., 2018). Este enfoque descriptivo es apropiado porque busca comprender y caracterizar un fenómeno complejo tal como existe en su contexto natural, identificando patrones, relaciones y características sin manipular variables ni realizar experimentos controlados.

La descripción en esta investigación se realiza mediante el análisis sistemático de información documental sobre múltiples casos de gestión de riesgo en cuencas, identificando características comunes y diferencias, patrones de éxito y fracaso, y factores que parecen determinar la efectividad de diferentes estrategias. Esta descripción sistemática permite generar conocimiento que, aunque no es experimental, proporciona insights valiosos sobre un fenómeno complejo donde la experimentación controlada sería difícil o imposible.

El carácter documental de la investigación se fundamenta en la recopilación y análisis sistemático de información técnica, científica y normativa proveniente de fuentes oficiales y académicas. Este enfoque documental es apropiado porque el fenómeno de interés (gestión de riesgo en cuencas) ha sido abordado en múltiples contextos durante décadas, generando un cuerpo significativo de literatura, informes técnicos, y documentos normativos que contienen información valiosa sobre experiencias, lecciones aprendidas, y mejores prácticas.

Es fundamental aclarar explícitamente que este enfoque documental no incluye trabajo de campo, mediciones directas, ni modelación propia. No se realizaron visitas de campo a los casos estudiados, no se obtuvieron datos primarios mediante instrumentos de medición, y no se desarrollaron modelos hidrológicos o de simulación propios. Toda la información utilizada proviene de fuentes secundarias: documentos técnicos, informes institucionales, artículos académicos, y normativas. Esta aclaración es esencial para mantener la honestidad metodológica y evitar que se interprete que la investigación incluye componentes que no fueron realizados.

El carácter comparativo de la investigación permite establecer relaciones y contrastes sistemáticos entre casos nacionales e internacionales mediante matrices de análisis estructuradas que sistematizan variables técnicas y de gestión. Este enfoque comparativo es esencial para identificar patrones, variables críticas, y lecciones transferibles que pueden no ser evidentes

cuando se analizan casos de manera individual. La comparación sistemática permite ir más allá de la descripción de casos individuales hacia la identificación de principios generales y factores contextuales que determinan la efectividad de diferentes estrategias.

La metodología comparativa utilizada en esta investigación se estructura mediante matrices de análisis que definen variables específicas de comparación y aplican estas variables de manera sistemática a cada caso estudiado. Esta estructuración permite realizar comparaciones más rigurosas y sistemáticas que comparaciones narrativas ad hoc, facilitando la identificación de patrones y la extracción de lecciones transferibles.

4.2 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico adoptado se fundamenta en el paradigma de la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD) y la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (IWRM), reconociendo que las cuencas son sistemas complejos donde interactúan procesos físicos, ecológicos y sociales (UNDRR, 2015; GWP, 2000). El estudio aplica un enfoque de análisis documental comparativo que integra la revisión de fuentes técnicas, normativas y de casos de estudio, permitiendo identificar relaciones causales entre amenazas naturales, vulnerabilidad territorial y estrategias de mitigación implementadas.

4.3 Fuentes y técnicas de recolección de información

4.3.1 Fuentes consultadas

La recolección de información se efectuó mediante un proceso de revisión documental sistemática que siguió protocolos estructurados para garantizar la calidad, relevancia y actualidad de las fuentes consultadas. Este proceso sistemático es esencial para garantizar que la

investigación se base en información confiable y representativa, y para permitir que otros investigadores puedan replicar o extender el trabajo.

Criterios de selección de fuentes. Se aplicaron criterios específicos para la selección de fuentes: (1) relevancia temática, requiriendo que las fuentes abordaran directamente aspectos de gestión de riesgo en cuencas, impactos del desarrollo humano, o estrategias de mitigación; (2) actualidad, priorizando fuentes publicadas entre 2010 y 2025, aunque se incluyeron fuentes anteriores cuando proporcionaban conocimiento fundamental o histórico esencial; (3) calidad, priorizando documentos oficiales de organismos reconocidos, artículos en revistas indexadas, y trabajos académicos revisados por pares; (4) accesibilidad, requiriendo que las fuentes fueran accesibles públicamente o mediante acceso institucional; y (5) representatividad, buscando incluir fuentes de diferentes contextos, metodologías, y perspectivas para evitar sesgos.

Fuentes institucionales nacionales. Se consultaron documentos de instituciones colombianas clave en gestión de riesgo y recursos hídricos, incluyendo: IDEAM (2022) - estudios nacionales del agua, mapas de amenaza, información hidrometeorológica; IGAC (2019) - cartografía de amenazas, estudios de suelos, información geográfica; UNGRD (2022) - informes nacionales de gestión del riesgo, planes y políticas; MinAmbiente (2012) - políticas ambientales, guías para POMCA, determinantes ambientales; Contraloría General (2021) - auditorías y evaluaciones de proyectos; ANI (2022) - informes de proyectos de infraestructura; Fondo Adaptación (2022) - informes de proyectos de reducción de riesgo; CORMAGDALENA (2021) - información sobre la cuenca del Magdalena; y EPM (2022) - informes técnicos sobre proyectos hidroeléctricos. Estas fuentes proporcionaron información específica del contexto colombiano y casos nacionales detallados.

Fuentes internacionales. Se consultaron documentos de organismos internacionales reconocidos, incluyendo: UNDRR (2015, 2023) - marcos globales de gestión del riesgo, evaluaciones globales; CEPAL (2018, 2019, 2020) - estudios sobre desastres en América Latina, metodologías de evaluación económica; Banco Mundial (2018, 2021, 2023) - estándares ambientales y sociales, evaluaciones de proyectos, mejores prácticas; ICOLD (2019, 2020) - estándares técnicos de seguridad de presas; ISO (2018) - estándares de gestión del riesgo; UNESCO (2012) - enfoques de gestión integrada de recursos hídricos; OMM (2021) - estándares para sistemas de alerta temprana; FEMA (2020) - estándares de gestión de inundaciones; USACE (2017, 2019) - informes técnicos sobre proyectos de control de inundaciones; y NOAA (2022) - información sobre eventos climáticos extremos. Estas fuentes proporcionaron marcos de referencia internacionales, estándares técnicos, y casos internacionales.

Fuentes normativas. Se consultaron marcos normativos y programáticos relevantes, incluyendo: Ley 99 de 1993 - sistema nacional ambiental; Ley 1523 de 2012 - gestión del riesgo de desastres; Decreto 2811 de 1974 - código de recursos naturales; NSR-10 (2010) - reglamento de construcción sismo resistente; Marco de Sendai 2015-2030 - marco global de reducción del riesgo; y ODS 6, 11, 13 - objetivos de desarrollo sostenible relacionados. Estas fuentes proporcionaron el marco normativo que guía la gestión de riesgo en Colombia y a nivel internacional.

Fuentes académicas. Se consultaron artículos indexados en bases de datos académicas reconocidas (Scopus, ScienceDirect, Scielo), tesis de posgrado relevantes, e informes técnicos especializados. Se incluyeron trabajos de autores como Giraldo (2019) - evaluación hidrológica en cuencas colombianas; Ocampo (2018) - hidrología aplicada; Martínez (2017, 2023) - impactos de urbanización e hidrología; Rodríguez (2021) - vulnerabilidad territorial; y García &

López (2020) - sedimentación y erosión. Estas fuentes proporcionaron conocimiento científico especializado y metodologías de investigación aplicables.

4.3.2 Técnicas de recolección y análisis

Análisis documental sistemático: Revisión exhaustiva de documentos técnicos, normativos, informes institucionales y estudios académicos sobre gestión del riesgo, ingeniería hidráulica y desarrollo sostenible en cuencas. Se aplicaron criterios de pertinencia, actualidad y calidad metodológica.

Evaluación normativa comparativa: Estudio comparativo de la legislación colombiana frente a marcos internacionales, identificando convergencias, brechas y oportunidades de alineación normativa.

Análisis cartográfico: Interpretación de mapas de amenaza, riesgo y vulnerabilidad elaborados por el IDEAM e IGAC, complementados con bases geográficas de la UNGRD, para contextualizar espacialmente el análisis.

Construcción de matriz de análisis documental: Se construyó una matriz (Anexo A) que sistematiza la información técnica, legal y conceptual, clasificando las fuentes según su pertinencia en la prevención y mitigación de riesgos naturales, aporte técnico y relevancia para la investigación.

4.4 Procedimiento analítico

El procedimiento analítico se estructuró en cuatro fases consecutivas e interrelacionadas que progresan desde la recolección de información hacia la síntesis de hallazgos aplicables. Cada

fase tiene productos específicos que alimentan las fases siguientes, garantizando coherencia y rigor en el proceso analítico.

Fase I – Búsqueda y selección de fuentes

Esta fase inicial comprendió la identificación, recolección y selección sistemática de fuentes documentales relevantes para la investigación. El proceso comenzó con búsquedas sistemáticas en bases de datos académicas reconocidas (Scopus, ScienceDirect, Scielo) utilizando términos de búsqueda específicos relacionados con gestión de riesgo, cuencas hidrográficas, prevención y mitigación. Las búsquedas se complementaron con búsquedas en repositorios institucionales de organismos nacionales (IDEAM, IGAC, UNGRD, MinAmbiente) e internacionales (UNDRR, CEPAL, Banco Mundial), y con revisión de documentos normativos relevantes.

Se aplicaron criterios de inclusión/exclusión estructurados basados en: relevancia temática (las fuentes debían abordar directamente aspectos de gestión de riesgo en cuencas, impactos del desarrollo humano, o estrategias de mitigación); actualidad (priorizando publicaciones entre 2010 y 2025, aunque incluyendo fuentes anteriores cuando proporcionaban conocimiento fundamental); y calidad metodológica (priorizando documentos oficiales de organismos reconocidos, artículos en revistas indexadas, y trabajos académicos revisados por pares).

El proceso de selección se realizó mediante revisión de títulos, resúmenes y, cuando fue necesario, lectura completa de documentos para determinar su relevancia y calidad. Se mantuvo un registro sistemático de todas las fuentes consultadas, incluyendo aquellas que fueron excluidas y las razones para su exclusión. Este registro facilita la transparencia y reproducibilidad del proceso de selección.

Fase II – Construcción de matriz de análisis documental

Una vez identificadas y seleccionadas las fuentes, se desarrolló una matriz de análisis estructurada (presentada en el Anexo A) que permite sistematizar información clave de manera organizada y comparable. Esta matriz incluye las siguientes columnas para cada fuente: tipo de documento (informe técnico, artículo académico, norma, política pública, etc.); institución o autor responsable; año de publicación; aporte técnico específico (qué conocimiento o información proporciona); y relevancia para la investigación (cómo contribuye a los objetivos específicos).

La construcción de esta matriz facilitó la organización sistemática de información y permitió identificar qué fuentes proporcionaban información sobre qué aspectos del problema. La matriz también permitió identificar vacíos de información y áreas donde se requerían fuentes adicionales. Durante la construcción de la matriz, se fueron identificando categorías temáticas principales que posteriormente guiaron la organización del análisis.

Fase III – Identificación y aplicación de variables de análisis en casos

Esta fase comprendió la identificación de variables técnicas críticas para el análisis comparativo de casos nacionales e internacionales, y la aplicación sistemática de estas variables a cada caso de estudio. Las variables identificadas fueron:

a) Tipo de amenaza principal: identificación de la amenaza natural principal que motivó la intervención (inundación, deslizamiento, sequía, sismo, o eventos compuestos), incluyendo características específicas de la amenaza (magnitud, frecuencia, alcance espacial).

b) Tipo de obra o intervención estructural: identificación de las obras de infraestructura implementadas (presas, diques, sistemas de drenaje, estructuras de contención, etc.), incluyendo características técnicas clave (capacidad, dimensiones, materiales, criterios de diseño).

c) Medidas no estructurales implementadas: identificación de medidas complementarias no estructurales (ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana, educación ambiental, restauración ecosistémica, etc.), incluyendo cómo se articulan con las medidas estructurales.

d) Resultados técnicos reportados: identificación de resultados medibles reportados (reducción de riesgo, eficacia en eventos específicos, desempeño bajo cargas extremas), incluyendo métricas cuando están disponibles y limitaciones en la evaluación.

e) Efectos positivos: identificación de beneficios logrados más allá de los objetivos principales (beneficios ambientales, sociales, económicos), incluyendo co-beneficios no anticipados.

f) Efectos negativos o externalidades: identificación de impactos adversos o efectos secundarios no deseados (impactos ambientales, desplazamientos poblacionales, efectos aguas arriba o aguas abajo), incluyendo cómo se han abordado estos efectos.

g) Lecciones técnicas aprendidas: extracción sistemática de lecciones técnicas y de gestión que pueden aplicarse en otros contextos, estructuradas según tipo de amenaza, tipo de obra, y contexto institucional.

h) Brechas o limitaciones identificadas: identificación de deficiencias, desafíos, o áreas donde las intervenciones no lograron los objetivos esperados, incluyendo factores que pueden explicar estas limitaciones.

Estas variables se aplicaron de forma sistemática a cada caso de estudio mediante revisión exhaustiva de los documentos disponibles sobre cada caso, extracción estructurada de información relevante, y organización de esta información en formatos comparables. La aplicación sistemática garantizó que cada caso fuera analizado sobre las mismas dimensiones, facilitando comparaciones rigurosas.

Fase IV – Comparación técnica y síntesis de hallazgos

La fase final comprendió el análisis comparativo estructurado entre casos nacionales (La Mojana, Canal del Dique, Hidroituango, Río Magdalena) e internacionales (Misisipi, Yangtsé, Hoover, Majes-Siguas II), identificando patrones comunes, diferencias significativas, factores de éxito y lecciones transferibles.

El análisis comparativo se estructuró mediante: (1) comparación de variables técnicas específicas entre casos similares (por ejemplo, comparación de casos de control de inundaciones); (2) identificación de patrones comunes que aparecen consistentemente en múltiples casos (por ejemplo, la efectividad de combinar medidas estructurales y no estructurales); (3) identificación de diferencias significativas que pueden explicarse por factores contextuales (por ejemplo, diferencias en efectividad relacionadas con capacidad institucional o recursos disponibles); (4) análisis de factores de éxito que parecen ser determinantes para la efectividad de diferentes estrategias; y (5) extracción de lecciones transferibles que pueden aplicarse en contextos similares.

La síntesis de hallazgos se realizó mediante: (1) organización de hallazgos según objetivos específicos de investigación; (2) identificación de relaciones entre hallazgos y construcción de argumentos coherentes; (3) formulación de lineamientos técnicos, de gestión y de gobernanza basados en evidencia de los casos comparados; y (4) estructuración de hallazgos en formatos aplicables (tablas comparativas, lineamientos estructurados, recomendaciones priorizadas).

Este proceso de síntesis permitió transformar el conocimiento generado por el análisis comparativo en productos aplicables directamente a la práctica profesional y a la formulación de

políticas, cumpliendo así con el objetivo de generar lineamientos técnicos aplicables al contexto colombiano.

4.5 Validación y calidad de la información

La validez y confiabilidad de una investigación documental depende críticamente de la calidad de las fuentes consultadas y de la rigurosidad en el proceso de análisis. Para garantizar la calidad de la información utilizada, se aplicaron múltiples estrategias de validación y triangulación.

Triangulación de fuentes. Se utilizó triangulación de fuentes, consultando múltiples fuentes sobre los mismos temas y casos para verificar consistencia y identificar discrepancias. Cuando se encontraron discrepancias entre fuentes, se analizaron las diferencias, se consideraron las características y posibles sesgos de cada fuente, y se presentaron múltiples perspectivas cuando fue apropiado. Esta triangulación permite identificar información más confiable y reconocer áreas donde persiste incertidumbre.

Criterios de calidad de fuentes. Se aplicaron criterios específicos para evaluar la calidad de las fuentes: (1) autoridad de la fuente, priorizando documentos de organismos reconocidos y autores con credibilidad establecida; (2) actualidad, priorizando información reciente pero reconociendo que información histórica también puede ser valiosa; (3) metodología, considerando la calidad metodológica de estudios cuando fue relevante; (4) objetividad, considerando posibles sesgos de las fuentes y buscando múltiples perspectivas; y (5) coherencia, verificando que la información sea coherente con conocimiento establecido y con información de otras fuentes.

Proceso de verificación. Durante el proceso de análisis, se realizaron verificaciones cruzadas de información crítica mediante consulta de múltiples fuentes. Se verificó especialmente información técnica sobre casos de estudio, resultados reportados, y características de obras, consultando fuentes primarias cuando fue posible y verificando consistencia con información de fuentes secundarias.

4.6 Limitaciones metodológicas

Es fundamental reconocer explícitamente las limitaciones metodológicas de la investigación para mantener la honestidad metodológica y permitir que los usuarios del conocimiento generado comprendan sus alcances y restricciones. Estas limitaciones no invalidan los hallazgos, pero contextualizan su interpretación y aplicación.

Limitación 1: Acceso a información técnica detallada. El acceso a información técnica detallada de proyectos privados o confidenciales puede estar restringido por razones de confidencialidad comercial, seguridad nacional, o políticas de privacidad. Esta limitación puede resultar en que algunos casos no puedan analizarse con el mismo nivel de detalle que otros, o que ciertos aspectos técnicos no estén completamente documentados en fuentes públicas. Esta limitación se reconoce explícitamente y se abordó consultando la mayor cantidad de fuentes públicas disponibles y utilizando información agregada cuando la información detallada no estaba disponible.

Limitación 2: Actualización de bases de datos institucionales. Las bases de datos institucionales pueden tener rezagos temporales entre la ocurrencia de eventos, la recopilación de información, y la publicación de informes. Además, la actualización periódica de información puede no ocurrir con la frecuencia deseada. Esta limitación puede resultar en que la información

utilizada no refleje el estado más reciente de algunos casos o contextos. Se abordó esta limitación consultando múltiples fuentes y reconociendo explícitamente cuando la información puede estar desactualizada.

Limitación 3: Enfoque exclusivamente documental. Esta investigación no incluye trabajo de campo, mediciones directas, ni modelación propia. No se realizaron visitas a los casos estudiados, no se obtuvieron datos primarios mediante instrumentos de medición, y no se desarrollaron modelos hidrológicos o de simulación propios. Toda la información proviene de fuentes secundarias. Esta limitación significa que la investigación depende completamente de la calidad, disponibilidad y representatividad de las fuentes consultadas. No se pueden verificar directamente las afirmaciones de las fuentes mediante observación o medición propia, y no se pueden generar datos nuevos para llenar vacíos de información.

Limitación 4: Dependencia de calidad y disponibilidad de fuentes. La calidad y disponibilidad de las fuentes consultadas varía significativamente entre casos y temas. Algunos casos tienen documentación extensa y detallada, mientras que otros tienen documentación limitada o fragmentada. Esta variabilidad puede resultar en análisis más completos para algunos casos que para otros. Se abordó esta limitación siendo explícitos sobre el nivel de detalle disponible para cada caso y reconociendo limitaciones en el análisis cuando la información era insuficiente.

Limitación 5: Sesgos potenciales en fuentes. Las fuentes consultadas pueden tener sesgos inherentes. Por ejemplo, informes de organismos ejecutores pueden enfatizar logros y minimizar problemas, mientras que informes de auditorías pueden enfatizar deficiencias. Se abordó esta limitación consultando múltiples tipos de fuentes (ejecutores, auditores, académicos, comunidades) para obtener múltiples perspectivas y desarrollar una visión balanceada.

Estas limitaciones son inherentes al tipo de estudio documental y comparativo realizado y se mencionan explícitamente para mantener la honestidad metodológica. Reconocer estas limitaciones no debilita el valor del conocimiento generado, sino que contextualiza su interpretación y aplicación, permitiendo que los usuarios comprendan qué puede y qué no puede concluirse con confianza basándose en esta investigación.

4.7 Consideraciones éticas

La investigación se desarrolló siguiendo principios éticos fundamentales de investigación académica, incluyendo transparencia, respeto a la autoría intelectual, veracidad de la información, y reconocimiento apropiado de contribuciones. Estos principios éticos son esenciales para mantener la integridad académica y generar confianza en el conocimiento producido.

Transparencia metodológica. Se mantuvo transparencia completa sobre la metodología utilizada, incluyendo criterios de selección de fuentes, proceso de análisis, y limitaciones metodológicas. Esta transparencia permite que otros investigadores comprendan cómo se generó el conocimiento, evalúen la rigurosidad del proceso, y repliquen o extiendan el trabajo si lo desean.

Respeto a la autoría intelectual. Todas las fuentes empleadas fueron citadas y referenciadas apropiadamente conforme a la normativa APA 7.^a edición. Se reconoció explícitamente el trabajo y las ideas de otros autores mediante citas apropiadas, sin apropiación indebida de ideas o información. Las citas se realizaron tanto para afirmaciones específicas como para conceptos y marcos teóricos derivados del trabajo de otros.

Veracidad de la información. No se manipularon datos ni se realizaron interpretaciones sesgadas que pudieran alterar los resultados. La información se presentó de manera fiel a como aparece en las fuentes, y cuando se realizaron interpretaciones o síntesis, se hizo de manera transparente y explícita. Cuando se encontraron discrepancias entre fuentes o incertidumbres, se reconocieron explícitamente en lugar de seleccionar información que favoreciera conclusiones preconcebidas.

Uso apropiado de información. Se utilizó información pública y accesible, respetando restricciones de confidencialidad cuando existían. No se utilizó información confidencial o restringida, y cuando se encontró información que podría ser sensible, se manejó de manera apropiada, presentando información agregada o generalizada cuando fue necesario proteger privacidad o confidencialidad.

Reconocimiento de limitaciones. Se reconocieron explícitamente las limitaciones metodológicas y las restricciones en el alcance del conocimiento generado, en lugar de presentar el conocimiento como más definitivo o completo de lo que realmente es. Este reconocimiento honesto de limitaciones es fundamental para el uso apropiado del conocimiento generado.

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

El análisis desarrollado en esta investigación, mediante un estudio descriptivo, documental y comparativo de casos nacionales e internacionales, permitió constatar que la prevención, protección y mitigación frente a fenómenos naturales en cuencas hidrográficas requiere abordajes integrados y comprehensivos que combinen múltiples dimensiones: ingeniería

hidráulica para la reducción técnica del riesgo, gestión ambiental para la protección de ecosistemas y servicios ecosistémicos, y gobernanza territorial para la coordinación efectiva entre múltiples actores y niveles. Esta conclusión emerge consistentemente del análisis comparativo de múltiples casos, donde los casos más exitosos son aquellos que integran estas dimensiones de manera coherente y sistemática.

Los resultados de la investigación confirman de manera robusta que los desastres asociados a inundaciones, deslizamientos, sequías y sismos no son consecuencia exclusiva de la dinámica natural de estos fenómenos, sino que resultan fundamentalmente del producto de la interacción entre amenazas físicas inherentes a la naturaleza y vulnerabilidades sociales, económicas e infraestructurales generadas o amplificadas por decisiones de desarrollo humano. Esta comprensión es fundamental porque implica que los desastres no son inevitables, sino que pueden prevenirse y mitigarse mediante decisiones de desarrollo apropiadas y estrategias de gestión del riesgo bien diseñadas e implementadas.

La evidencia técnica obtenida a través del análisis documental demuestra de manera consistente que el incremento del desarrollo humano sobre las cuencas ha modificado profundamente los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos que determinan el comportamiento de estos sistemas. Actividades como la urbanización descontrolada, la deforestación, la minería y la expansión agrícola han generado cambios significativos y medibles en múltiples parámetros: incrementos en los coeficientes de escorrentía del 60-80% debido a la impermeabilización del suelo, pérdida de cobertura vegetal que ha incrementado las tasas de erosión en un 25% a nivel nacional, aumento de la sedimentación en cauces y embalses, y reducción de hasta un 40% en la capacidad natural de almacenamiento temporal de los ríos en algunas regiones.

Estas transformaciones no solo alteran los procesos naturales, sino que elevan directamente la frecuencia e intensidad de los desastres, creando condiciones donde eventos naturales que previamente no generaban desastres ahora sí lo hacen. Esta evidencia demuestra de manera clara que la gestión del riesgo no puede limitarse a la etapa de respuesta ante desastres, sino que debe incorporarse desde la fase de planificación de proyectos y decisiones de desarrollo, reconociendo que estas decisiones tienen implicaciones directas para el riesgo futuro.

La aplicación del enfoque de análisis comparativo mediante matrices estructuradas permitió sistematizar variables técnicas críticas, identificar patrones comunes que aparecen consistentemente en múltiples casos, y formular lecciones aprendidas que pueden ser aplicadas directamente al contexto colombiano. Este aporte metodológico diferencia significativamente a esta investigación de estudios previos que analizan casos individuales sin establecer marcos comparativos sistemáticos, proporcionando conocimiento que es más transferible y aplicable a la práctica profesional.

5.2 Conclusiones específicas vinculadas a objetivos

Las conclusiones específicas se estructuran según los objetivos específicos de la investigación, proporcionando respuestas directas y basadas en evidencia a cada objetivo planteado. Esta estructuración garantiza que las conclusiones sean directamente vinculables a los objetivos y que respondan específicamente a las preguntas de investigación planteadas.

5.2.1 Respecto al objetivo específico 1: Identificación y caracterización de fenómenos naturales

El análisis documental sistemático permitió identificar y caracterizar los principales fenómenos naturales que afectan las cuencas hidrográficas colombianas y su interacción con el desarrollo humano. Los fenómenos naturales más críticos identificados son las inundaciones fluviales y pluviales y los movimientos en masa, los cuales, según información del IDEAM y la UNGRD, afectan directa o indirectamente a más del 70% del territorio nacional, generando la mayor proporción de pérdidas económicas y humanas por desastres en el país.

Las inundaciones fluviales se caracterizan por su alta frecuencia (eventos anuales o bianuales en muchas cuencas) y por su amplio alcance espacial, afectando no solo áreas ribereñas sino también planicies de inundación donde se ha desarrollado infraestructura y asentamientos humanos. Las inundaciones pluviales, aunque de menor alcance espacial, son altamente destructivas en áreas urbanas donde la impermeabilización del suelo genera escorrentía concentrada. Los movimientos en masa, incluyendo deslizamientos, flujos de detritos y caídas de roca, son particularmente críticos en zonas montañosas donde se combinan pendientes pronunciadas, suelos susceptibles, y desarrollo humano en laderas.

Los mapas de amenaza elaborados por el IDEAM y el IGAC son herramientas fundamentales para la planificación de obras civiles y para la evaluación inicial de riesgo. Sin embargo, el análisis identificó que estos mapas requieren actualización periódica y mayor resolución espacial para ser efectivos en la evaluación de riesgo a nivel de proyecto específico. La escala de estos mapas (frecuentemente 1:100,000 o menor) puede no proporcionar el detalle necesario para decisiones de diseño específicas, requiriendo estudios locales adicionales.

Además, la actualización periódica es esencial porque las condiciones de amenaza pueden cambiar debido a cambios en uso del suelo, cambios climáticos, o intervenciones humanas.

El análisis comparativo de casos internacionales evidencia que la identificación sistemática de amenazas mediante criterios estructurados de frecuencia (probabilidad de ocurrencia), magnitud (intensidad o tamaño del evento), e impacto (consecuencias potenciales) constituye la base técnica esencial para el diseño de estrategias de mitigación efectivas. Casos exitosos muestran que esta caracterización sistemática de amenazas permite diseñar estrategias apropiadas a las características específicas de cada amenaza y contexto, en lugar de aplicar estrategias genéricas que pueden ser inapropiadas o inefectivas.

5.2.2 Respecto al objetivo específico 2: Impactos del desarrollo humano sobre las cuencas

El desarrollo humano desordenado altera significativamente los balances hidrológicos y geomorfológicos de las cuencas, incrementando la exposición al riesgo. La urbanización no planificada ha reducido hasta en un 40% la capacidad natural de almacenamiento temporal de los ríos, mientras que la pérdida de cobertura vegetal ha incrementado la erosión y sedimentación en un 25%. El cambio de uso del suelo y la ocupación de zonas inundables son los factores que más contribuyen a la generación de nuevos desastres. Esto confirma la necesidad de reforzar la aplicación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCA) como instrumentos vinculantes para la ingeniería civil y la planificación territorial.

5.2.3 Respecto al objetivo específico 3: Estrategias de prevención, protección y mitigación

El análisis comparativo de casos nacionales e internacionales demuestra que las estrategias más efectivas combinan obras hidráulicas (presas, diques, jarillones, canales) con

medidas no estructurales (ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana, educación ambiental, restauración ecosistémica). Los casos del Misisipi y La Mojana evidencian que esta combinación puede reducir los daños por inundación en más del 60%. Sin embargo, la efectividad depende críticamente del mantenimiento continuo, la auscultación geotécnica permanente y la aplicación sistemática de estándares técnicos internacionales (International Commission on Large Dams [ICOLD], 2020; ISO, 2018; NSR-10, 2010). Los sistemas de alerta temprana, cuando se integran con redes comunitarias, pueden reducir las pérdidas humanas hasta en un 70%.

5.2.4 Respecto al objetivo específico 4: Matriz de análisis comparativo

La construcción de matrices de análisis comparativo permitió sistematizar variables técnicas críticas (tipo de amenaza, obras implementadas, medidas no estructurales, resultados técnicos, efectos positivos y negativos, lecciones aprendidas) y establecer comparaciones sistemáticas entre casos nacionales e internacionales. Esta sistematización identifica patrones comunes: (1) integración estructural-no estructural como factor de éxito, (2) monitoreo continuo y mantenimiento preventivo como condiciones de efectividad, (3) aplicación de estándares técnicos internacionales como requisito de seguridad, y (4) gobernanza articulada como factor diferenciador de sostenibilidad. Las matrices desarrolladas constituyen herramientas aplicables directamente para el diseño y evaluación de proyectos de ingeniería civil en cuencas colombianas.

5.2.5 Respecto al objetivo específico 5: Lineamientos técnicos, de gestión y de gobernanza

Los lineamientos formulados se basan en la evidencia comparativa y se estructuran en tres categorías: (a) técnicos, enfocados en diseño, operación y mantenimiento de infraestructura; (b) de gestión, orientados a la articulación entre instrumentos de planificación y procesos institucionales; y (c) de gobernanza, dirigidos a fortalecer la coordinación interinstitucional y la participación social. Estos lineamientos proporcionan guías concretas para la implementación efectiva de estrategias de prevención y mitigación en el contexto colombiano, basadas en lecciones aprendidas validadas en casos comparados.

5.3 Recomendaciones

5.3.1 Recomendaciones técnicas (diseño y operación de infraestructura)

1. Fortalecer los procesos de monitoreo, auscultación y mantenimiento preventivo: Priorizar la instalación de instrumentación geotécnica automatizada (piezómetros, inclinómetros, extensómetros) en presas, diques y estructuras de contención, con sistemas de telemetría y alerta temprana.

2. Actualizar parámetros de diseño: Actualizar caudales de diseño y curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) considerando escenarios de cambio climático proyectados por el IDEAM y la Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2021), incorporando incertidumbre climática en el diseño.

3. Promover tecnologías de modelación avanzada: Utilizar modelación hidrodinámica 2D y 3D para anticipar comportamientos de flujo y sedimentación en eventos extremos, incorporando estas herramientas en los estudios de diseño y evaluación de impacto.

4. Aplicar estándares internacionales sistemáticamente: Institucionalizar la aplicación de estándares de la ICOLD, ISO 31000 y NSR-10 en procesos de licenciamiento y contratación pública, estableciendo requisitos mínimos verificables.

5. Integrar soluciones basadas en la naturaleza: Incorporar sistemáticamente soluciones basadas en la naturaleza (restauración de humedales, revegetalización de rondas, sistemas de drenaje sostenible) como componentes integrales de proyectos de infraestructura, desde la etapa de diseño hasta la operación.

5.3.2 Recomendaciones de gestión y gobernanza (articulación GRD, POMCA, POT)

1. Fortalecer la articulación entre instrumentos de planificación: Establecer mecanismos formales de articulación entre POMCA, POT y Planes de Gestión del Riesgo, garantizando coherencia en determinantes ambientales y de riesgo, con mecanismos de control y sanción por incumplimiento.

2. Crear Fondo Nacional de Mantenimiento Preventivo: Establecer un Fondo Nacional de Mantenimiento Preventivo de Infraestructura Hidráulica, administrado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD] y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], destinado a garantizar la sostenibilidad financiera del mantenimiento de obras existentes.

3. Fortalecer capacidades técnicas locales: Desarrollar programas de capacitación y asistencia técnica para entidades territoriales en formulación de POMCA, evaluación de riesgo y diseño de infraestructura, priorizando regiones con mayor exposición.

4. Institucionalizar evaluación post-obra: Establecer mecanismos obligatorios de evaluación post-obra que midan la efectividad de las intervenciones implementadas, comparando resultados proyectados versus observados, y sistematizando lecciones aprendidas.

5. Promover participación social estructurada: Consolidar los Comités Locales de Gestión del Riesgo como espacios técnicos de participación ciudadana, donde las comunidades intervengan en la planificación, seguimiento y evaluación de obras.

5.3.3 Recomendaciones de investigación futura

1. Estudios de evaluación de efectividad: Desarrollar estudios evaluativos que midan la efectividad de medidas de mitigación implementadas a largo plazo, bajo diferentes escenarios de eventos extremos, utilizando metodologías cuantitativas (análisis antes-después, estudios de control).

2. Análisis económico de medidas preventivas: Realizar análisis costo-beneficio y costo-efectividad comparativos entre medidas preventivas versus costos de respuesta y recuperación ante desastres, proporcionando evidencia económica para priorización de inversiones.

3. Modelación hidrológica avanzada con escenarios climáticos: Desarrollar estudios de modelación hidrológica que integren proyecciones de cambio climático y variabilidad climática, utilizando ensambles de modelos y análisis de incertidumbre, para informar diseño de infraestructura resiliente.

4. Investigación sobre gobernanza efectiva: Estudiar casos comparados de gobernanza exitosa en gestión de cuencas, identificando factores institucionales, procesos de coordinación y mecanismos de participación que contribuyen a la efectividad de la gestión.

5. Evaluación de soluciones basadas en la naturaleza: Desarrollar estudios cuantitativos sobre efectividad técnica, económica y social de soluciones basadas en la naturaleza en contexto colombiano, comparándolas con infraestructura tradicional para informar decisiones de diseño.

6. Investigación sobre financiación sostenible: Estudiar mecanismos innovadores de financiación para medidas preventivas y mantenimiento de infraestructura, incluyendo instrumentos económicos, esquemas de pago por servicios ambientales y fondos rotatorios.

Estas recomendaciones de investigación futura contribuirían a superar las limitaciones metodológicas identificadas en esta investigación y proporcionar evidencia adicional para la toma de decisiones en gestión de riesgo en cuencas.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones generales

El análisis desarrollado en esta investigación, mediante un estudio descriptivo, documental y comparativo de casos nacionales e internacionales, permitió constatar que la prevención, protección y mitigación frente a fenómenos naturales en cuencas hidrográficas requiere abordajes integrados y comprehensivos que combinen múltiples dimensiones: ingeniería hidráulica para la reducción técnica del riesgo, gestión ambiental para la protección de ecosistemas y servicios ecosistémicos, y gobernanza territorial para la coordinación efectiva entre múltiples actores y niveles. Esta conclusión emerge consistentemente del análisis comparativo de múltiples casos, donde los casos más exitosos son aquellos que integran estas dimensiones de manera coherente y sistemática.

Los resultados de la investigación confirman de manera robusta que los desastres asociados a inundaciones, deslizamientos, sequías y sismos no son consecuencia exclusiva de la

dinámica natural de estos fenómenos, sino que resultan fundamentalmente del producto de la interacción entre amenazas físicas inherentes a la naturaleza y vulnerabilidades sociales, económicas e infraestructurales generadas o amplificadas por decisiones de desarrollo humano. Esta comprensión es fundamental porque implica que los desastres no son inevitables, sino que pueden prevenirse y mitigarse mediante decisiones de desarrollo apropiadas y estrategias de gestión del riesgo bien diseñadas e implementadas.

La evidencia técnica obtenida a través del análisis documental demuestra de manera consistente que el incremento del desarrollo humano sobre las cuencas ha modificado profundamente los procesos hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos que determinan el comportamiento de estos sistemas. Actividades como la urbanización descontrolada, la deforestación, la minería y la expansión agrícola han generado cambios significativos y medibles en múltiples parámetros: incrementos en los coeficientes de escorrentía del 60-80% debido a la impermeabilización del suelo, pérdida de cobertura vegetal que ha incrementado las tasas de erosión en un 25% a nivel nacional, aumento de la sedimentación en cauces y embalses, y reducción de hasta un 40% en la capacidad natural de almacenamiento temporal de los ríos en algunas regiones.

Estas transformaciones no solo alteran los procesos naturales, sino que elevan directamente la frecuencia e intensidad de los desastres, creando condiciones donde eventos naturales que previamente no generaban desastres ahora sí lo hacen. Esta evidencia demuestra de manera clara que la gestión del riesgo no puede limitarse a la etapa de respuesta ante desastres, sino que debe incorporarse desde la fase de planificación de proyectos y decisiones de desarrollo, reconociendo que estas decisiones tienen implicaciones directas para el riesgo futuro.

La aplicación del enfoque de análisis comparativo mediante matrices estructuradas permitió sistematizar variables técnicas críticas, identificar patrones comunes que aparecen consistentemente en múltiples casos, y formular lecciones aprendidas que pueden ser aplicadas directamente al contexto colombiano. Este aporte metodológico diferencia significativamente a esta investigación de estudios previos que analizan casos individuales sin establecer marcos comparativos sistemáticos, proporcionando conocimiento que es más transferible y aplicable a la práctica profesional.

6.2 Conclusiones específicas vinculadas a objetivos

Las conclusiones específicas se estructuran según los objetivos específicos de la investigación, proporcionando respuestas directas y basadas en evidencia a cada objetivo planteado. Esta estructuración garantiza que las conclusiones sean directamente vinculables a los objetivos y que respondan específicamente a las preguntas de investigación planteadas.

6.2.1 Respecto al objetivo específico 1: Identificación y caracterización de fenómenos naturales

El análisis documental sistemático permitió identificar y caracterizar los principales fenómenos naturales que afectan las cuencas hidrográficas colombianas y su interacción con el desarrollo humano. Los fenómenos naturales más críticos identificados son las inundaciones fluviales y pluviales y los movimientos en masa, los cuales, según información del IDEAM y la UNGRD, afectan directa o indirectamente a más del 70% del territorio nacional, generando la mayor proporción de pérdidas económicas y humanas por desastres en el país.

Las inundaciones fluviales se caracterizan por su alta frecuencia (eventos anuales o bianuales en muchas cuencas) y por su amplio alcance espacial, afectando no solo áreas ribereñas sino también planicies de inundación donde se ha desarrollado infraestructura y asentamientos humanos. Las inundaciones pluviales, aunque de menor alcance espacial, son altamente destructivas en áreas urbanas donde la impermeabilización del suelo genera escorrentía concentrada. Los movimientos en masa, incluyendo deslizamientos, flujos de detritos y caídas de roca, son particularmente críticos en zonas montañosas donde se combinan pendientes pronunciadas, suelos susceptibles, y desarrollo humano en laderas.

Los mapas de amenaza elaborados por el IDEAM y el IGAC son herramientas fundamentales para la planificación de obras civiles y para la evaluación inicial de riesgo. Sin embargo, el análisis identificó que estos mapas requieren actualización periódica y mayor resolución espacial para ser efectivos en la evaluación de riesgo a nivel de proyecto específico. La escala de estos mapas (frecuentemente 1:100,000 o menor) puede no proporcionar el detalle necesario para decisiones de diseño específicas, requiriendo estudios locales adicionales. Además, la actualización periódica es esencial porque las condiciones de amenaza pueden cambiar debido a cambios en uso del suelo, cambios climáticos, o intervenciones humanas.

El análisis comparativo de casos internacionales evidencia que la identificación sistemática de amenazas mediante criterios estructurados de frecuencia (probabilidad de ocurrencia), magnitud (intensidad o tamaño del evento), e impacto (consecuencias potenciales) constituye la base técnica esencial para el diseño de estrategias de mitigación efectivas. Casos exitosos muestran que esta caracterización sistemática de amenazas permite diseñar estrategias apropiadas a las características específicas de cada amenaza y contexto, en lugar de aplicar estrategias genéricas que pueden ser inapropiadas o inefectivas.

6.2.2 Respecto al objetivo específico 2: Impactos del desarrollo humano sobre las cuencas

El desarrollo humano desordenado altera significativamente los balances hidrológicos y geomorfológicos de las cuencas, incrementando la exposición al riesgo. La urbanización no planificada ha reducido hasta en un 40% la capacidad natural de almacenamiento temporal de los ríos, mientras que la pérdida de cobertura vegetal ha incrementado la erosión y sedimentación en un 25%. El cambio de uso del suelo y la ocupación de zonas inundables son los factores que más contribuyen a la generación de nuevos desastres. Esto confirma la necesidad de reforzar la aplicación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCA) como instrumentos vinculantes para la ingeniería civil y la planificación territorial.

6.2.3 Respecto al objetivo específico 3: Estrategias de prevención, protección y mitigación

El análisis comparativo de casos nacionales e internacionales demuestra que las estrategias más efectivas combinan obras hidráulicas (presas, diques, jarillones, canales) con medidas no estructurales (ordenamiento territorial, sistemas de alerta temprana, educación ambiental, restauración ecosistémica). Los casos del Misisipi y La Mojana evidencian que esta combinación puede reducir los daños por inundación en más del 60%. Sin embargo, la efectividad depende críticamente del mantenimiento continuo, la auscultación geotécnica permanente y la aplicación sistemática de estándares técnicos internacionales (International Commission on Large Dams [ICOLD], 2020; ISO, 2018; NSR-10, 2010). Los sistemas de alerta temprana, cuando se integran con redes comunitarias, pueden reducir las pérdidas humanas hasta en un 70%.

6.2.4 Respecto al objetivo específico 4: Matriz de análisis comparativo

La construcción de matrices de análisis comparativo permitió sistematizar variables técnicas críticas (tipo de amenaza, obras implementadas, medidas no estructurales, resultados técnicos, efectos positivos y negativos, lecciones aprendidas) y establecer comparaciones sistemáticas entre casos nacionales e internacionales. Esta sistematización identifica patrones comunes: (1) integración estructural-no estructural como factor de éxito, (2) monitoreo continuo y mantenimiento preventivo como condiciones de efectividad, (3) aplicación de estándares técnicos internacionales como requisito de seguridad, y (4) gobernanza articulada como factor diferenciador de sostenibilidad. Las matrices desarrolladas constituyen herramientas aplicables directamente para el diseño y evaluación de proyectos de ingeniería civil en cuencas colombianas.

6.2.5 Respecto al objetivo específico 5: Lineamientos técnicos, de gestión y de gobernanza

Los lineamientos formulados se basan en la evidencia comparativa y se estructuran en tres categorías: (a) técnicos, enfocados en diseño, operación y mantenimiento de infraestructura; (b) de gestión, orientados a la articulación entre instrumentos de planificación y procesos institucionales; y (c) de gobernanza, dirigidos a fortalecer la coordinación interinstitucional y la participación social. Estos lineamientos proporcionan guías concretas para la implementación efectiva de estrategias de prevención y mitigación en el contexto colombiano, basadas en lecciones aprendidas validadas en casos comparados.

7 Referencias

- ANI. (2022). *Proyecto de restauración ambiental y control de inundaciones del Canal del Dique*. Agencia Nacional de Infraestructura.
- AUTODEMA. (2018). *Informe técnico de avance del Proyecto Majes-Siguas II*. Autoridad Autónoma de Majes.
- Banco Mundial. (2018). *Environmental and Social Framework (ESF)*. World Bank Publications.
- Banco Mundial. (2021). *Gestión del riesgo de desastres en América Latina y el Caribe*. Washington, D.C.
- Banco Mundial. (2023). *Building resilient infrastructure for climate adaptation*. Washington, D.C.
- Cardona, O. D. (2003). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo*. Revista Internacional de Gestión del Riesgo.
- CEPAL. (2018). *Los desastres naturales en América Latina: Evaluación y estrategias de reducción del riesgo*. Naciones Unidas.
- CEPAL. (2019). *Manual para la evaluación de desastres y daños económicos*. Naciones Unidas.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- CORMAGDALENA. (2021). *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Magdalena (POMCA) – Informe técnico*.
- Contraloría General de la República. (2021). *Informe de auditoría sobre el Proyecto de La Mojana*.

- Decreto 2811 de 1974. *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Diario Oficial de la República de Colombia.
- Dourojeanni, A. (2001). *Gestión integrada de cuencas hidrográficas*. CEPAL.
- EPM. (2022). *Informe técnico de contingencia del Proyecto Hidroituango*. Empresas Públicas de Medellín.
- FEMA. (2020). *National Flood Insurance Program (NFIP) Technical Guidelines*. U.S. Federal Emergency Management Agency.
- Fondo Adaptación. (2022). *Programa Integral de Reducción del Riesgo en La Mojana*. Gobierno de Colombia.
- García, L., & López, M. (2020). *Sedimentación y erosión en cuencas tropicales*. Revista Andina de Ingeniería Ambiental.
- Giraldo, J. (2019). *Evaluación hidrológica en grandes cuencas colombianas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Global Water Partnership (GWP). (2000). *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*.
- IDEAM. (2019). *Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua 2022 (ENA)*. Bogotá, Colombia.

- IGAC. (2019). *Cartografía de amenazas y erosión en Colombia*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- ICOLD. (2019). *Dam Safety Guidelines*. International Commission on Large Dams.
- ICOLD. (2020). *Bulletin for Structural and Hydraulic Safety of Large Dams*. París.
- ISO. (2018). *ISO 31000:2018 – Risk Management Guidelines*. International Organization for Standardization.
- Ley 99 de 1993. *Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y se organiza el SINA*. Colombia.
- Ley 1523 de 2012. *Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres*. Colombia.
- Martínez, P. (2017). *Impacto de la urbanización en la escorrentía superficial en cuencas tropicales*. Revista Ingeniería y Territorio.
- Martínez, S. (2023). *Modelación hidrológica y vulnerabilidad de cuencas en Colombia*. Universidad de Antioquia.
- MinAmbiente. (2010). *Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico*.
- MinAmbiente. (2012). *Guía para la formulación de POMCA*.
- NOAA. (2022). *Extreme rainfall events in the Mississippi Basin*. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- NSR-10. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Ministerio de Vivienda.

- OCDE. (2022). *Evaluación de la gobernanza del agua en Colombia*. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.
- Ocampo, A. (2018). *Hidrología aplicada a cuencas colombianas*. Universidad del Valle.
- OMM. (2021). *Hydrological Hazards and Early Warning Systems*. Organización Meteorológica Mundial.
- Rodríguez, J. (2021). *Vulnerabilidad territorial y gestión del riesgo*. Revista Latinoamericana de Ingeniería Civil.
- SGC. (2021). *Inventario nacional de movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano.
- Smith, K. (2021). *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. Routledge.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2017). *Federal Guidelines for Dam Safety*.
- USACE. (2019). *Mississippi River & Tributaries Project – Report Summary*.
- UNESCO. (2012). *Managing Water under Uncertainty and Risk*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- UNGRD. (2016). *Guía técnica de gestión del riesgo para proyectos de infraestructura*.
- UNGRD. (2022). *Informe nacional de gestión del riesgo de desastres 2022*.
- UNDRR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- UNDRR. (2023). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Naciones Unidas.
- Xu, K., Milliman, J., & Wang, H. (2013). Sediment loads and geomorphic impacts of the Yangtze River. *Earth Science Reviews*.

Anexos

Anexo A. Matriz de análisis documental

Tipo de documento	Institución / Autor	Año	Aporte técnico	Relevancia para la tesis
Estudio Nacional del Agua (ENA)	IDEAM	2022	Diagnóstico integral del recurso hídrico; amenazas por inundación, sequía, erosión; balances hídricos nacionales.	Base principal para caracterización hidrológica y análisis de riesgo hídrico en cuencas. Fundamenta cap. 1 y 4.
Mapas de susceptibilidad a movimientos en masa	IGAC	2019	Cartografía geotécnica de pendientes, estabilidad y procesos de ladera.	Insumo para análisis geológico y para caracterizar amenazas de deslizamiento.
Informe Nacional de Gestión de Riesgo	UNGRD	2022	Estadísticas de desastres; vulnerabilidad territorial; fallas institucionales; análisis multiamenaza.	Fundamenta la relación entre riesgo, vulnerabilidad y gobernanza. Apoya conclusiones.
Guía técnica de GRD en infraestructura	MinAmbiente	2010	Lineamientos para ordenamiento hídrico, determinantes ambientales, caudal ecológico.	Sustento normativo central para IWRM y POMCA.
Ley 1523 de 2012	Congreso de Colombia	2012	Define el SNGRD, responsabilidades, gestión prospectiva y correctiva.	Eje normativo central de toda la tesis.
Ley 99 de 2012	Congreso de Colombia	1993	Crea el SINA; directrices de desarrollo sostenible.	Marco legal colombiano para gestión ambiental.

Decreto 2811 de 1974	Gobierno Nacional	1974	Código de Recursos Naturales; ordenación ambiental.	Base histórica para ordenación de cuencas.
Informe La Mojana	Fondo Adaptación	2022	Obras hidráulicas, drenaje, diques, reasentamientos.	Caso aplicado nacional; referente técnico de mitigación.
Auditoría La Mojana	Contraloría	2021	Deficiencias técnicas en diques, vulnerabilidades estructurales.	Evidencia fallas constructivas; apoya recomendaciones.
Proyecto Canal del Dique	ANI / CORMAGDALENA	2022	Rediseño hidráulico, esclusas, regulación de caudales.	Caso clave para análisis ecohidrosocial.
POMCA Río Magdalena	CORMAGDALENA	2021	Ordenación, zonificación de riesgo, determinantes ambientales.	Instrumento territorial fundamental.
Informe Hidroituango	EPM	2022	Análisis de contingencias; fallas geotécnicas; lecciones de ingeniería.	Caso nacional de riesgo constructivo.
Marco de Sendai	UNDRR	2015	Principios globales de reducción del riesgo; multiamenaza.	Base conceptual internacional del análisis comparado.
Global Assessment Report	UNDRR	2023	Riesgo sistémico e interdependencias.	Sustenta análisis de vulnerabilidad compleja.
Dam Safety Guidelines	ICOLD	2019	Estándares de seguridad de presas y diques.	Marco técnico para obras estructurales.
ICOLD Bulletin sobre seguridad hidráulica	ICOLD	2020	Monitoreo, estabilidad estructural y operación segura.	Aporta comparativo internacional.

ISO 31000	ISO	2018	Gestión del riesgo: identificación, análisis y monitoreo.	Sostén metodológico del cap. 3.
Hydrological Hazards & EWS	OMM	2021	Diseño de sistemas de alerta temprana.	Base de SAT en medidas no estructurales.
Managing Water under Uncertainty	UNESCO	2012	Enfoque IWRM; gestión sostenible del agua.	Sustenta la parte ambiental y territorial.
Manual para evaluación de desastres	CEPAL	2019	Evaluación económica de daños.	Sustenta análisis de impactos.
Enviromental Hazards	Smith	2021	Modelos de amenaza, exposición y vulnerabilidad.	Soporte conceptual técnico del riesgo.
Applied Hydrology	Chow et al.	1988	Cálculos de caudales, escorrentía, hidrogramas.	Base hidrológica del cap. 1 y 4.
Hidrología aplicada	Ocampo	2018	Modelación hidrológica en cuencas colombianas.	Aporta contexto nacional científico.
Evaluación hidrológica	Giraldo	2019	Desafíos de calibración y modelación.	Respalda brechas técnicas del país.
Urban runoff impact	Martínez	2017	Impactos de urbanización en escorrentía.	Fundamento técnico para impactos antrópicos.
Sedimentación y erosión	García & López	2020	Procesos sedimentarios en cuencas tropicales.	Sustenta análisis de casos como Yangtsé.
Vulnerabilidad territorial	Rodríguez	2021	Factores sociales y estructurales de vulnerabilidad.	Apoya análisis social del riesgo.
Resilience & Stability	Holling	1973	Teoría original de resiliencia ecológica.	Base conceptual del enfoque de resiliencia.
MR&T Project	USACE	2019	Control estructural de inundaciones.	Caso internacional de ingeniería.

NFIP Technical Guidelines	FEMA	2020	Normas de diseño y control de inundación.	Estándares de EE. UU. para comparación.
Extreme rainfall	NOAA	2022	Aumento de lluvias extremas por CC.	Soporte climático del estudio.
Three Gorges sedimentation	Xu et al.	2013	Impactos geomorfológicos y sedimentarios.	Caso técnico internacional.
Water Basin EU Directive	UE/EEA	2018	Gestión preventiva y restauración fluvial.	Comparación internacional relevante.
Informe Magdalena	CORMAGDALENA	2021	Sedimentos, navegabilidad, erosión.	Aporta análisis directo del Magdalena.
Proyecto Majes-Siguas	AUTODEMA	2018	Transferencias intercuenca; riego; regulación.	Caso comparado latinoamericano.

Anexo B. Normativa comparada nacional e internacional

Norma	País / Organización	Aplicación	Observaciones técnicas
Ley 1523 de 2012	Colombia	Política Nacional GRD	Alto nivel técnico, débil ejecución
Marco de Sendai	ONU	Reducción del riesgo	Enfoque multiamenaza
ICOLD 2020	Internacional	Seguridad de presas	Norma de referencia mundial
ISO 31000:2018	Internacional	Gestión del riesgo	Estándar metodológico

Anexo C. Fichas técnicas de casos de estudio comparados

- Ficha Técnica 1. Proyecto Hoover Dam – EE. UU.**

Nombre del proyecto	Hoover Dam
Ubicación	Río Colorado – Nevada / Arizona
Entidad ejecutora	Three Gorges Project
Tipo de intervención	Presa de gravedad en hormigón
Año de construcción	1931 – 1936
Objetivos principales	Control de inundaciones, generación hidroeléctrica, regulación de caudales.
Capacidad instalada	2.080 MW

Regulación anual	~14,5 km ³
Normatividad aplicada	ICOLD 2020, ISO 31000:2018
Hallazgos relevantes	Riesgos actuales por sedimentación y reducción del nivel del lago Mead. Necesidad de actualización de sistemas de auscultación.

- **Ficha Técnica 2. Presa Tres Gargantas - China**

Ubicación	Río Yangtsé
Entidad ejecutora	Three Gorges Project Construction Commission
Tipo de intervención	Presa de gravedad en hormigón
Año de construcción	1994 – 2012
Objetivos principales	Control de crecidas, generación eléctrica, navegación.
Capacidad instalada	22.500 MW
Volumen del embalse	39.300 millones m ³
Normatividad aplicada	ICOLD 2020, políticas ambientales chinas, estándares del Banco Mundial (OP 4.01).
Hallazgos relevantes	Sedimentación acelerada. Impactos ecológicos aguas abajo. Reasentamiento masivo > 1 millón de personas.

- **Ficha Técnica 3. Proyecto Majes-Siguas II – Perú.**

Ubicación	Región Arequipa
Entidad ejecutora	AUTODEMA
Componentes principales	Presa Angostura, túneles, canales de riego.
Área a irrigar	38.500 ha
Objetivo	Ampliación agrícola mediante transferencia intercuenas.
Normatividad aplicada	Ley N°. 29338 – Recursos Hídricos; ESF Banco Mundial.
Hallazgos relevantes	Riesgos por disponibilidad hídrica. Conflictos territoriales. Complejidad en modelación hidrológica.

- **Ficha Técnica 4. Proyecto Integral de La Mojana – Colombia.**

Ubicación	Sucre, Córdoba, Bolívar, Antioquia.
Entidad	UNGRD
Componentes	Drenajes, jarillones, diques, reubicación, restauración ecológica.
Objetivo	Reducir riesgo de inundación (post-La Niña 2010-2011)
Normatividad aplicada	Ley 1523/2012, Ley 99/1993, CONPES 3700
Hallazgos relevantes	Deficiencias en compactación de diques. Falta de mantenimiento. Tensión entre ingeniería y dinámica natural.

- **Ficha Técnica 5. Proyecto Canal del Dique – Colombia.**

Ubicación	Bolívar – Atlántico
Entidad	ANI / CORMAGDALENA
Componentes	Esclusas, regulación de caudales, restauración de manglares.
Objetivo	Control hidráulico + restauración ecohidrosocial.
Normatividad aplicada	Ley 1523/2012; Decreto 1640/2012; PNGRH
Hallazgos relevantes	Megaproyecto con alta complejidad hidrodinámica. Retrasos por costos y trámites. Necesidad de monitoreo permanente.