Estrategias de Drenaje Sostenible en la Gestión del Riesgo por inundación

Yohana García Ossa[1]

Juan Carlos Reyes Cáceres[2]

Introducción

El departamento de Antioquia de Colombia enfrenta actualmente problemáticas crecientes asociados a fenómenos hidrometeorológicos extremos, especialmente a las precipitaciones intensas, las cuales han aumentado en frecuencia y severidad como consecuencia de los efectos del cambio climático y de los procesos acelerados de la alta urbanización y/o crecimiento inmobiliario, como es la zona del oriente valles de san Nicolás. Estos fenómenos se manifiestan en emergencias recurrentes como inundaciones urbanas, crecientes súbitas y movimientos en masa, generando impactos significativos sobre la infraestructura, la protección territorial y en el bienestar y calidad de vida de las comunidades tanto urbanas como rurales.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) advierte que el incremento de los eventos de lluvia extrema constituye una de las evidencias más claras de los efectos del cambio climático, afectando de manera particular a las regiones tropicales y a las zonas montañosas vulnerables, como lo municipios ubicados en las cordilleras Andes colombianos (IPCC, 2021). En este contexto, Antioquia presenta condiciones geográficas y climáticas que intensifican la exposición a amenazas hidrológicas, especialmente en áreas con altas pendientes, cuencas intervenidas por deforestación y territorios densamente urbanizados.

Durante las más recientes temporadas de lluvias, el departamento ha experimentado múltiples emergencias asociadas al agua. En municipios del Valle de Aburrá, como Medellín y su área metropolitana, se han presentado inundaciones urbanas, desbordamientos de quebradas, colapsos

[1]Yohana García Ossa, Constructora en Arquitectura e ingeniería, estudiante, Gerencia de Proyectos. Universitaria Agustiniana. Técnico Operativo de Gestión del riesgo, Alcaldía de La Unión Antioquia, Correo: yohana.garciao@unigustiniana.edu.co

[2]Juan Carlos Reyes Cáceres, Ingeniería de Sistemas, estudiante, Gerencia de Proyectos. Universitaria Agustiniana. Gestor de Proyectos, Pensemos S.I., Bogotá D.C.Colombia, Correo: juan.reyesc@unigustiniana.edu.co

parciales de la red de drenaje urbano y movimientos en masa en zonas de ladera, afectando viviendas, vías y servicios públicos. De igual forma, en subregiones como el Urabá antioqueño y zonas limítrofes con el sur de Córdoba, incluyendo municipios como Montelíbano, las lluvias intensas han generado crecientes súbitos, inundaciones rurales y pérdidas en infraestructura productiva y habitacional, evidenciando la alta vulnerabilidad de estos territorios frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

De acuerdo con los reportes institucionales, los fenómenos asociados al agua representan aproximadamente el 75% del total de emergencias atendidas por los organismos de socorro en Antioquia, afectando a miles de familias y ejerciendo una presión significativa sobre los sistemas locales y departamentales de gestión del riesgo. Solo en el año 2025 se registraron más de 500 eventos relacionados con lluvias en diversos municipios del departamento, principalmente inundaciones y deslizamientos de tierra (Gobernación de Antioquia, 2025).

Adicionalmente, los análisis oficiales indican que más de 120 de los 125 municipios de Antioquia presentan zonas clasificadas con riesgo alto por inundación o movimientos en masa, situación que ha motivado la declaratoria de alertas en subregiones como el Valle de Aburrá, el Bajo Cauca y el Urabá antioqueño (UNGRD, 2024). Municipios altamente urbanizados como Medellín, Bello, Sabaneta y La Estrella han enfrentado episodios críticos asociados a la saturación de suelos, el desbordamiento de fuentes hídricas y afectaciones significativas a la infraestructura vial y residencial.

En este escenario, se evidencian las limitaciones estructurales de los sistemas tradicionales de drenaje urbano, los cuales se fundamentan principalmente en infraestructuras grises como canales, tuberías y cunetas. Estas soluciones fueron diseñadas bajo parámetros hidrológicos históricos que no corresponden a las condiciones climáticas actuales, por lo que resultan insuficientes frente al incremento de las cargas de agua pluvial (Fletcher et al., 2015).

De manera complementaria, la expansión urbana acelerada ha incrementado las superficies impermeables y ha reducido las áreas naturales de infiltración, intensificando

la escorrentía superficial y aumentando la vulnerabilidad de los territorios frente a inundaciones repentinas (Ahiablame, Engel & Chaubey, 2012). Como consecuencia, se generan impactos socioeconómicos y ambientales relevantes, tales como interrupciones en la movilidad, daños en infraestructura pública y privada, afectaciones a los servicios básicos, incremento de riesgos sanitarios y profundización de las desigualdades en comunidades vulnerables.

Tomando en cuenta lo anterior, se define la siguiente pregunta problema.

¿De qué manera la implementación de estrategias de drenaje urbano sostenible puede mitigar las afectaciones por inundaciones y reducir el riesgo asociado a eventos hidrometeorológicos extremos en el departamento de Antioquia**?**

El objetivo general del estudio es crear una estrategia de drenaje urbano sostenible que contribuya a la reducción del riesgo por inundación y fortalezca la resiliencia en las comunidades frente a los efectos del cambio climático.

Como objetivos específicos, se plantean los siguientes:

- Analizar el comportamiento hídrico del territorio y las zonas críticas del departamento de Antioquia, identificando áreas con alta vulnerabilidad frente a inundaciones y movimientos en masa.

- Diseñar soluciones basadas en la naturaleza, tales como jardines de lluvia, zonas verdes permeables y humedales urbanos, que complementen los sistemas tradicionales de conducción de la escorrentía.
- Generar una propuesta de proyecto de modelo tipo de la MGA a partir de la estrategia de drenaje sostenible en la plataforma de proyectos públicos.

Estrategia metodológica

El alcance metodológico utilizado será mixto, cualitativo y cuantitativo descriptivo, esto debido a la naturaleza compleja y multidimensional del problema de las inundaciones urbanas en general. El enfoque cuantitativo permite identificar y analizar las zonas críticas y evaluación de escenarios

con y sin drenaje sostenible; mientras el enfoque cualitativo brinda una comprensión profunda de las dinámicas sociales, institucionales y territoriales que influyen en la gestión del riesgo y la planificación urbana resiliente.

Con el enfoque en Antioquia, esta metodología permite contextualizar la propuesta, adaptándola a las condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas del territorio. Del mismo modo, la investigación aplicada busca generar soluciones prácticas y transferibles, como jardines de lluvia, humedales urbanos y zonas verdes, que complementen el direccionamiento tradicional del agua de escorrentía.

Es así, como la combinación de métodos y fuentes garantiza una visión integral del problema, facilitando la formulación de estrategias que no solo sean técnicamente viables, sino también socialmente aceptables y políticamente implementables

El enfoque cuantitativo permite identificar, medir y analizar zonas críticas, así como evaluar escenarios con y sin implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible - (SUDS). Para ello se emplearán series históricas climáticas, modelos probabilísticos y análisis geoespacial. En ciudades del departamento de Antioquia como Medellín se registran altos valores de precipitación anual, característicos de regiones tropicales andinas con régimen bimodal de lluvias, lo que evidencia un comportamiento pluviométrico elevado y constante durante el año (IDEAM, 2023).

Los datos climatológicos muestran además que los periodos lluviosos predominan durante gran parte del año en la región andina colombiana, aumentando la susceptibilidad a inundaciones urbanas y procesos de saturación del suelo (IDEAM, 2023; IPCC, 2022).

Eventos recientes confirman la tendencia de intensificación de precipitaciones extremas asociadas a fenómenos de variabilidad climática como La Niña, los cuales incrementan significativamente los acumulados mensuales y diarios de lluvia en Colombia (IDEAM, 2024).

De forma complementaria, proyecciones climáticas nacionales indican que durante temporadas lluviosas los acumulados pueden aumentar considerablemente respecto a los promedios históricos, elevando la

probabilidad de inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales (IDEAM, 2024; World Meteorological Organization, 2021).

En el plano nacional, los reportes oficiales evidencian que las temporadas de lluvias generan impactos recurrentes sobre población, vivienda e infraestructura, afectando miles de personas cada año y produciendo emergencias en numerosos municipios del país (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2024).

Estos indicadores evidencian científicamente que la variabilidad climática y los eventos extremos están aumentando en frecuencia e intensidad, lo que justifica la necesidad de soluciones basadas en infraestructura verde y drenaje sostenible como estrategia de adaptación y reducción del riesgo (IPCC, 2022).

El enfoque cualitativo permitirá comprender las dinámicas institucionales, normativas y socio territoriales que influyen en la gestión del riesgo urbano. Este componente incluirá análisis documental de instrumentos de planificación territorial (POT, planes de gestión del riesgo, políticas ambientales), revisión de reportes históricos de emergencias y evaluación de capacidades institucionales. La incorporación de estas variables responde a la literatura científica internacional que demuestra que el riesgo de inundación urbana depende de la interacción entre **amenaza, exposición y vulnerabilidad**, y no únicamente de factores hidrológicos.

Los métodos para el levantamiento de la información serán:

- Cuantitativos:

- Recolección de datos hidrometeorológicos, los cuales reposan en la base de datos del IDEAM

- Cualitativos:

- Recolección información de emergencias invernales
- Revisión de planes de ordenamiento territorial (POT) y políticas ambientales.

La combinación de fuentes de información y el análisis permite una comprensión de los fenómenos asociados al cambio climático, coherente con enfoques de gestión integral del riesgo y planificación resiliente. Estas

estrategias formuladas no sólo son técnicamente viables, sino también socialmente aceptables, económicamente sostenibles y políticamente implementables

Indicadores de medición

- Reducción del número de inundaciones reportadas

-Zonas de inundación intervenidas

En conclusión, el presente trabajo corresponde a un ejercicio académico orientado al análisis metodológico de datos estadísticos e información relevante, desarrollado bajo criterios de organización, rigurosidad y coherencia investigativa. El proceso permitió interpretar resultados de manera objetiva y fundamentada, aportando claridad al tema estudiado. Asimismo, en caso de haberse aplicado entrevistas como técnica de recolección de información, estas se realizaron de forma anónima, garantizando la confidencialidad de los participantes y el cumplimiento de principios éticos. En conjunto, el trabajo evidencia un manejo adecuado del análisis de información y el uso responsable de metodologías propias del ámbito académico.

Resultados del Análisis del comportamiento hídrico del territorio y las zonas críticas del departamento de Antioquia, identificando áreas con alta vulnerabilidad frente a inundaciones y movimientos en masa

El departamento de Antioquia está conformado por nueve subregiones que agrupan 125 municipios, destacándose Oriente y Suroeste con el 18,4 % cada una, seguidas por Occidente (15,2 %) y Norte (13,6 %). Esta concentración territorial implica una mayor exposición al riesgo, lo que hace prioritario el análisis de la vulnerabilidad frente a fenómenos hidrometeorológicos.



Imagen 1: Mapa de susceptibilidad, Fuente DAGRAN

El comportamiento hídrico del departamento está determinado por la interacción de factores geomorfológicos y climáticos, como fuertes pendientes, cuencas de respuesta rápida y altas intensidades de precipitación, condiciones que favorecen la ocurrencia de inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa. A partir de la zonificación de susceptibilidad, se identifican áreas aluviales con propensión a inundaciones, zonas con acumulación de materiales susceptibles a desbordamientos y sectores de alta pendiente con riesgo elevado de flujos torrenciales y deslizamientos.

En este contexto, un porcentaje significativo del territorio presenta algún nivel de susceptibilidad, evidenciando la amplia distribución de zonas vulnerables en el departamento. Esta situación se ve intensificada por la intervención antrópica, que altera la dinámica natural del agua y aumenta la escorrentía superficial.

Por tanto, la incorporación de estudios hidrológicos e hidráulicos, junto con herramientas como la modelación hidrológica, los sistemas de drenaje sostenible (SUDS) y la planificación basada en cuencas, resulta fundamental para la gestión del riesgo. De esta manera, el análisis del comportamiento hídrico se consolida como un elemento clave para la toma de decisiones orientadas a reducir la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia territorial.

El análisis del comportamiento hídrico del territorio en el departamento de Antioquia permitió identificar una alta susceptibilidad a inundaciones y movimientos en masa, asociada a condiciones geomorfológicas, climáticas y a la intervención antrópica. Este diagnóstico evidencia la necesidad de fortalecer la gestión del riesgo mediante herramientas técnicas y planificación basada en cuencas, orientadas a la reducción de la vulnerabilidad territorial.

Para ver más detalle en el desarrollo en el objetivo 1, ver anexo 001 Análisis del comportamiento hídrico del territorio y las zonas críticas del departamento de Antioquia, identificando áreas con alta vulnerabilidad frente a inundaciones y movimientos en masa

Resultados de las soluciones basadas en la naturaleza, tales como jardines de lluvia, zonas verdes permeables y humedales urbanos, que complementen los sistemas tradicionales de conducción de la escorrentía.

El Análisis aborda el diseño e implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como estrategia para la gestión eficiente de aguas lluvias, bajo el enfoque de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN). Conceptualmente, los SUDS se definen como un conjunto de técnicas orientadas a replicar el comportamiento del ciclo hidrológico natural, mediante procesos de infiltración, retención y filtración en el origen, con el objetivo de reducir la escorrentía superficial y mejorar la calidad del agua.

Desde una perspectiva metodológica, el diseño se estructura en fases secuenciales que incluyen: recolección de información, diagnóstico territorial, definición de objetivos, selección de alternativas y evaluación multicriterio. En términos cuantitativos, el análisis hidráulico se fundamenta en la estimación de caudales de diseño mediante curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), lo que permite modelar escenarios de precipitación y dimensionar las estructuras bajo condiciones de eventos extremos.

El enfoque analítico establece como variable de interés la reducción del volumen de escorrentía y la mejora en la capacidad de infiltración del sistema urbano, las cuales se relacionan directamente con la implementación de tipologías SUDS tales como jardines de lluvia, pavimentos permeables y humedales urbanos. En este sentido, se plantea una relación inversa entre el grado de impermeabilización del suelo y la eficiencia del sistema de drenaje, lo que sustenta la necesidad de incorporar infraestructura verde como mecanismo de compensación hidrológica.

En el caso del Valle de Aburrá, las condiciones topográficas (pendientes pronunciadas) y la configuración de la red hidrográfica incrementan la vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos, lo que refuerza la pertinencia del enfoque propuesto. Asimismo, la incorporación de criterios técnicos, ambientales, económicos y sociales en la evaluación de alternativas permite optimizar la selección de soluciones, maximizando su eficiencia bajo restricciones reales de implementación.

Los resultados esperados sugieren que la aplicación de SUDS genera una disminución significativa de la escorrentía superficial, reducción del riesgo de inundaciones y mejora en la calidad del agua, con efectos adicionales en la recuperación ambiental urbana.

En consecuencia, se concluye que las soluciones basadas en la naturaleza constituyen un enfoque robusto y medible para la gestión del drenaje urbano, con alta capacidad de adaptación a escenarios de variabilidad climática**.**

La **Tabla 01** permite evidenciar las características de cada una de las soluciones de SUDS

Para ver más detalle en el desarrollo en el objetivo 2, ver anexo 002 Diseñar soluciones basadas en la naturaleza, tales como jardines de lluvia, zonas verdes permeables y humedales urbanos, que complementen los sistemas tradicionales de conducción de la escorrentía.

Resultados del Modelo tipo de la MGA a partir de la estrategia de drenaje sostenible en la plataforma de proyectos públicos.

El presente estudio formula un modelo de intervención basado en la metodología MGA para la implementación de infraestructura de drenaje sostenible en municipios del departamento de Antioquia, donde la frecuencia de eventos de inundación y procesos erosivos presenta una tendencia creciente, explicada por la impermeabilización del suelo y la insuficiencia de redes pluviales convencionales. En este contexto, el problema central se operacionaliza como una falla estructural en la gestión de aguas lluvias, cuya magnitud se refleja en el incremento sostenido de emergencias hidrometeorológicas y en los costos asociados a la rehabilitación de infraestructura.

Desde un enfoque cuantitativo, la intervención define como variable dependiente la incidencia de eventos de inundación en zonas críticas, proyectando una reducción ≥ 60% posterior a la implementación de las obras. Este efecto esperado se modela en función de variables independientes como la longitud de infraestructura SUDS instalada (m), área intervenida (m²) y número de puntos críticos mitigados, permitiendo la construcción de un

sistema de seguimiento basado en indicadores comparables y verificables en el tiempo .

El modelo técnico integra soluciones como redes pluviales complementarias, parques lineales con capacidad de almacenamiento hidráulico y obras de bioingeniería para estabilización de taludes, configurando un sistema híbrido que combina infraestructura gris y verde. Bajo un enfoque causal, se establece que la implementación de estas soluciones permite reducir los caudales pico, incrementar la infiltración y disminuir la presión sobre las redes existentes, generando una relación inversa significativa con la ocurrencia de eventos de inundación.

Adicionalmente, la propuesta se articula con marcos estratégicos de desarrollo sostenible, particularmente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), destacando su contribución al ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), ODS 13 (acción por el clima) y ODS15 (vida de ecosistemas terrestres), al incorporar criterios de gestión integral del recurso hídrico, adaptación climática y recuperación ambiental. De manera complementaria, el modelo se alinea con el Plan de Desarrollo Departamental de Antioquia 2024–2027, específicamente con la línea estratégica de sostenibilidad ambiental y resiliencia territorial, así como con programas orientados a la gestión del riesgo de desastres y la protección de ecosistemas.

El análisis incorpora una estructura de riesgos multivariada (técnicos, ambientales, prediales y climáticos), lo que introduce condiciones de incertidumbre mitigadas mediante modelación hidrológica, planificación adaptativa y articulación institucional. En términos de resultados, se proyecta no solo una reducción estadísticamente significativa de eventos de inundación, sino también efectos indirectos en la valorización del suelo, recuperación de ecosistemas y generación de espacio público funcional, consolidando un enfoque integral de resiliencia urbana.

En síntesis, el modelo evidencia que la implementación de infraestructura de drenaje sostenible, bajo un esquema de planificación estructurada, alineación institucional y medición basada en indicadores, constituye una estrategia eficiente para la reducción del riesgo hidrológico, con impactos cuantificables en términos de desempeño hidráulico,

sostenibilidad ambiental y coherencia con agendas globales y territoriales de desarrollo.

El modelo tipo formulado bajo la metodología MGA evidencia que la implementación de infraestructura de drenaje sostenible constituye una estrategia técnica eficaz para la gestión de aguas lluvias en municipios de Antioquia, al permitir una reducción significativa de eventos de inundación mediante la integración de soluciones híbridas, medición basada en indicadores y planificación estructurada. Los resultados del análisis confirman su viabilidad como herramienta de intervención pública, con impactos cuantificables en la mitigación del riesgo hidrológico, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia territorial.

Para ver más detalle en el desarrollo en el objetivo 3, ver anexo 003 Modelo tipo de la MGA a partir de la estrategia de drenaje sostenible en la plataforma de proyectos públicos.

Referencias

Alcaldía de Medellín. (2015). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Medellín*. DAGRD.

Departamento Nacional de Planeación. (2022). Guía metodológica para la formulación y evaluación de proyectos de inversión pública. DNP.

IDEAM. (2023). Atlas climatológico de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Lineamientos de infraestructura verde y soluciones basadas en la naturaleza en entornos urbanos. MinAmbiente.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2024). Reporte nacional de escenarios de riesgo por inundación y movimientos en masa. UNGRD.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2019). Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. UNDR

Tabla 01 -Características SUDS

Tipo de SUDS	Características
Superficies Permeables (Parques Lineales)	Pavimentos (adoquines, hormigón poroso) que permiten que el agua atraviese la superficie hacia el terreno, reduciendo la escorrentía superficial.
Jardines de Lluvia y Áreas de Bioretención	Zonas de jardines diseñadas para capturar, filtrar y absorber el agua de lluvia, mejorando la calidad del agua mediante procesos biológicos.
Cubiertas Verdes o Ecológicas	Techos cubiertos de vegetación que retienen agua de lluvia, reducen la escorrentía, mejoran el aislamiento térmico y fomentan la biodiversidad.
Zanjas y Pozos de Infiltración	Excavaciones rellenas de material drenante (como grava) que almacenan agua y facilitan su infiltración lenta en el subsuelo, ideales para captar agua lluvia de carreteras..
Cunetas Verdes/ Vegetadas	Canales superficiales con vegetación que transportan, filtran y reducen la velocidad del agua de escorrentía.
Estanques y Balsas de Retención/ Detención	Depósitos (superficiales o enterrados) diseñados para almacenar agua de lluvia temporalmente durante tormentas, permitiendo su liberación controlada y la sedimentación de contaminantes.
Humedales Artificiales (Wetlands)	Áreas húmedas creadas para gestionar aguas pluviales mediante procesos biológicos y fitodepuración, ofreciendo una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes
Obras de Bioingeniería	Utilizan vegetación viva (fajinas, trinchos, filtros vivos) para estabilizar taludes, controlar la erosión y restaurar los suelos, funcionando como SUDS al infiltrar agua, reducir la escorrentía y mejorar la biodiversidad. Estos funcionan como infraestructura verde, recreando el ciclo hidrológico natural y protegiendo
Canales revestidos y disipadores de energía	Gestionan el agua pluvial en origen, reduciendo la escorrentía, controlando la velocidad de flujo y mejorando la calidad del agua a través de la infiltración, la retención y la laminación. Estos elementos son claves para la sostenibilidad en el diseño urbano

Fuente: Construcción propia