

TRABAJO DE GRADO
Opción Investigación o Proyecto de Grado

**Contraste de Esquemas Agregado y Semidistribuido en HEC-HMS para Estimar
Caudales Máximos en la Cuenca del Río Sucio (Urabá – Antioquia)**

Corporación Universitaria Remington
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil

Sneider Grajales Arrieta

Ing. MSc. PhD.

Juan Mauricio Bedoya Soto

Proyecto de Grado

Medellín

2025

Tabla de Contenidos

1	Resumen.....	6
2	Abstract.....	8
3	Palabras clave.....	10
4	Introducción.....	12
5	Justificación.....	14
6	Marco teórico y estado del arte.....	17
6.1	Modelo Digital de Elevación (MDE).....	19
6.2	Pendiente del canal principal.....	20
6.3	Curva Numero (CN).....	21
6.4	Curvas IDF.....	22
6.5	Tiempo de concentración (Tc).....	22
6.6	Hidrograma Unitario Sintético triangular SCS.....	24
6.7	Hidrograma Unitario Sintético de Snyder.....	24
6.8	Diagramas de Huff.....	25
6.9	Factor de Reducción de Área.....	26
6.10	Tránsito de hidrogramas.....	28
6.11	Modelo Hidrológico Agregado.....	30
6.12	Modelo Hidrológico Distribuido.....	32
6.13	Fundamento Teórico de la Subdivisión de la Cuenca.....	34
6.13.1	Criterios Hidrológicos para la Representación Espacial de una Cuenca ..	34
6.13.2	Justificación Teórica según Moussa (2003).....	35
6.13.3	Aplicación del Criterio de Moussa en la Cuenca del Río Sucio.....	36
6.13.4	Implicaciones en la Modelación Hidrológica con HEC-HMS.....	36
6.14	El Umbral de Área de Formación de Canal (S ₁).....	37
6.15	Método de Muskingum-Cunge.....	39
6.16	Elementos de red hidrológica en HEC-HMS: Source, Junction, Diversion y Sink	40
6.17	Velocidad hidrodinámica en el cálculo del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico.....	42
7	Planteamiento del problema.....	44
7.1	Antecedentes del problema.....	46
8	Objetivos.....	50
8.1	Objetivo General.....	50
8.2	Objetivos específicos.....	50
9	Metodología.....	51
10	Resultados y Discusión.....	55
10.1	Localización.....	55
10.2	MDE Delimitado de la cuenca.....	58
10.3	Parámetros básicos de la Cuenca Agregada.....	60
10.4	Mapas de Asociaciones y Tipos Hidrológicos.....	60
10.5	Mapa de Coberturas y Coberturas Reclasificadas.....	61
10.6	Mapas de Curva Numero.....	62

10.7	Tiempo de concentración.....	64
10.8	Tiempo de rezago del HUS de Snyder y SCS Triangular.....	68
10.9	Velocidad hidrodinámica.....	69
10.10	Curvas IDF.....	70
10.11	Factor de Reducción de Área (FRA).....	75
10.12	Umbral de Área de Formación de Canal (S) y su Relación con el Número de Fuentes (N).....	78
10.13	Justificación de la Estructura de Subcuencas del Río Sucio.....	80
10.14	Método de Muskingum-Cunge.....	82
10.15	Modelo en el entorno del software HEC-HMS.....	83
10.16	Hietograma de tormenta.....	86
10.17	Caudal Pico HUS de SCS triangular y Snyder.....	88
10.18	Hidrogramas simulados con Metodos SCS y Snyder con periodos de retorno 90	
10.19	Tránsito y Atenuación de Hidrogramas.....	95
11	Conclusiones.....	103
12	Conclusiones más importantes.....	105
13	Referencias.....	107

Lista de tablas

Tabla 1	<i>Fórmulas para estimar los tiempos de concentración.</i>	23
Tabla 2	<i>Elementos fundamentales de la estructura del modelo hidrológico en HEC-HMS</i>	41
Tabla 3	<i>Tabla de Parámetros básicos de la Cuenca Agregada.</i>	60
Tabla 4	<i>Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la cuenca agregada.</i>	64
Tabla 5	<i>Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca Herradura.</i>	65
Tabla 6	<i>Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca Urama.</i>	66
Tabla 7	<i>Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca a.</i>	67
Tabla 8	<i>Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca b.</i>	68
Tabla 9	<i>Tiempo de Rezago Estimado mediante los Métodos de Hidrograma Unitario Sintético de Snyder y SCS Triangular.</i>	69
Tabla 10	<i>Tiempo de Rezago Estimado mediante el método de Hidrograma Unitario Sintético SCS Triangular para subcuencas.</i>	69
Tabla 11	<i>Parámetros de la ecuación IDF para la estación Cañasgordas según el tiempo de retorno (Tr).</i>	72
Tabla 12	<i>Relación entre la intensidad y la profundidad de la lluvia (D = 459,94 min) para distintos tiempos de retorno (Tr).</i>	72
Tabla 13	<i>Intensidad y profundidad de lluvia según el tiempo de retorno (Tr) en las cuencas analizadas.</i>	73
Tabla 14	<i>Comparación de la profundidad de lluvia para diferentes tiempos de retorno (Tr), con y sin la aplicación del FRA.</i>	76
Tabla 15	<i>Profundidad de la lluvia (mm) para diferentes tiempos de retorno (Tr) en la cuenca agregada y subcuencas con FRA aplicado.</i>	77
Tabla 16	<i>Valores del Parámetro K estimados para las subcuencas semidistribuidas.</i>	83
Tabla 18	<i>Caudal pico estimado mediante los métodos de Snyder y SCS para distintos períodos de retorno.</i>	88
Tabla 19	<i>Comparación del Caudal Pico Estimado mediante el Método SCS en la Cuenca Agregada y semidistribuida.</i>	90

Lista de Gráficos

Gráfica 1	<i>Tiempos de concentración horas y minutos de la cuenca agregada.</i>	65
Gráfica 2	<i>Curvas IDF intensidad–duración para la estación climatológica de Cañasgordas.</i>	71
Gráfica 3	<i>Hietogramas de tormenta para diferentes periodos de retorno.</i>	87
Gráfica 4	<i>Comparación de Hidrogramas Simulados con Métodos SCS y Snyder para Períodos de Retorno de 2, 3 y 5 años.</i>	91
Gráfica 5	<i>Comparación de Hidrogramas Simulados con Métodos SCS y Snyder para Períodos de Retorno de 10, 25, 50 y 100 años.</i>	93
Gráfica 6	<i>Tránsito y Atenuación de Hidrogramas en el Punto de Confluencia “Junction-2”</i>	96
Gráfica 7	<i>Tránsito y Atenuación de Hidrogramas en el Punto de Confluencia “Junction-3”</i>	98
Gráfica 8	<i>Tránsito y Atenuación de Hidrogramas en el Punto de Confluencia “Junction-3”</i>	100

Lista de ilustraciones

Ilustración 1	<i>Localización de la Zona Rio Sucio.</i>	56
Ilustración 2	<i>Localización de subcuencas en la cuenca agregada Rio Sucio.</i>	57
Ilustración 3	<i>Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del río Sucio.</i>	59
Ilustración 4	<i>Mapa de asociaciones de suelo y tipos hidrológicos en la cuenca Agregada.</i>	61
Ilustración 5	<i>Mapas de coberturas IDEAM y coberturas reclasificadas según el CN de la cuenca agregada.</i>	62
Ilustración 6	<i>Mapas de Curva Numero de CNII y CNIII en la cuenca agregada.</i>	63
Ilustración 7	<i>Representación esquemática de la cuenca y determinación del umbral de formación de canal (S₁).</i>	79
Ilustración 8	<i>Delimitación de la cuenca del río Sucio y subdivisión en subcuencas representativas modelo HEC-HMS.</i>	85

1 Resumen

El presente trabajo de grado tuvo como propósito estimar los caudales máximos en la cuenca del río Sucio, ubicada en la región de Urabá (Antioquia), mediante la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS. El estudio se planteó como un aporte técnico para la gestión del riesgo por inundaciones y la planificación del recurso hídrico en una zona caracterizada por su importancia socioeconómica y vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

La investigación se fundamentó en la implementación de un modelo hidrológico semidistribuido, con representación de la cuenca tanto en un esquema agregado como en otro semidistribuido por subcuencas, con el fin de contrastar la respuesta hidrológica en distintos niveles de detalle espacial. El proceso metodológico se estructuró en tres fases: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento. En la primera, se realizó la delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca y sus subcuencas, apoyada en un Modelo Digital de Elevación, mapas de suelos y coberturas, y herramientas SIG. Posteriormente, se configuró y calibró el modelo HEC-HMS a partir de parámetros físicos, series históricas de precipitación y caudales, y eventos de diseño construidos con curvas IDF y Diagrama de Huff. Finalmente, se efectuó la propagación de caudales mediante el método de Muskingum-Cunge y se analizaron los resultados comparativos entre los esquemas de modelación.

Los resultados evidenciaron que la simulación de lluvias de distintos períodos de retorno permitió estimar caudales máximos coherentes con el régimen hidrológico observado en la estación de control (Dabeiba). Asimismo, el enfoque semidistribuido

mostró mayor capacidad para identificar variabilidad espacial en la generación de escorrentía y para determinar las contribuciones diferenciales de cada subcuenca al caudal pico del río Sucio. Estos hallazgos resultan fundamentales para identificar zonas críticas con mayor susceptibilidad a inundaciones.

En conclusión, el trabajo demostró la utilidad de combinar información geoespacial, registros hidrometeorológicos y modelos semidistribuidos para estimar caudales extremos en cuencas de alta complejidad fisiográfica. Los insumos obtenidos fortalecen la gestión de amenazas hidrológicas, la planificación territorial y la implementación de medidas de mitigación orientadas a reducir la vulnerabilidad de la región de Urabá frente a eventos de inundación.

2 Abstract

The present research aimed to estimate the maximum discharges in the Sucio River basin, located in the Urabá region (Antioquia), through the application of the HEC-HMS hydrological model. The study was conceived as a technical contribution to flood risk management and water resource planning in an area of high socioeconomic importance and marked vulnerability to extreme hydrometeorological events.

The research was based on the implementation of a semi-distributed hydrological model, representing the basin in both aggregated and disaggregated schemes in order to compare the hydrological response at different spatial scales. The methodological process was divided into three main phases: pre-processing, processing, and post-processing. In the first phase, the basin and its main sub-basins were delimited and morphometrically characterized using a Digital Elevation Model (DEM), soil and land cover maps, and GIS tools. Subsequently, the HEC-HMS model was configured and calibrated based on physical parameters, historical precipitation and discharge records, and design events constructed using IDF curves and Huff hyetographs. Finally, flow routing was performed using the Muskingum-Cunge method, and comparative analyses were carried out between both modeling schemes.

The results demonstrated that rainfall simulations for various return periods produced maximum discharges consistent with the observed hydrological regime at the control station (Dabeiba). Moreover, the disaggregated model exhibited greater capacity to identify the spatial variability in runoff generation and to determine the differential

contributions of each sub-basin to the peak discharge of the Sucio River. These findings are fundamental for identifying critical areas with higher flood susceptibility.

In conclusion, the study demonstrated the effectiveness of combining geospatial data, hydrometeorological records, and semi-distributed modeling approaches to estimate extreme flows in physiographically complex basins. The results obtained provide valuable inputs for hydrological hazard management, territorial planning, and the implementation of mitigation measures aimed at reducing the vulnerability of the Urabá region to flood events.

3 Palabras clave

1. Modelo Hidrológico: Herramienta matemática y computacional que permite simular y predecir procesos hidrológicos como la precipitación, la escorrentía y la infiltración en una cuenca hidrográfica. Estos modelos son esenciales para la gestión del recurso hídrico, la prevención de riesgos y el diseño de infraestructuras hidráulicas.

2. HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System): Software desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, diseñado para representar y simular procesos hidrológicos en cuencas agregadas y subcuencas. Permite la calibración de parámetros, la integración de datos históricos y la ejecución de escenarios de lluvia y escorrentía.

3. Curva Número (CN): Método hidrológico propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) para estimar la escorrentía directa producida por una tormenta. El CN es un parámetro adimensional que depende de las características del suelo, la cobertura vegetal y el uso del terreno, y que determina la proporción de lluvia que se convierte en escorrentía.

4. Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia): Relaciones matemáticas que describen la intensidad de la precipitación en función de su duración y de la probabilidad de ocurrencia (período de retorno). Constituyen un insumo fundamental en el diseño hidrológico y en la simulación de tormentas de diseño en modelos hidrológicos.

5. Tiempo de Concentración (T_c): Parámetro que indica el tiempo requerido para que una gota de agua, caída en el punto más alejado de una cuenca, alcance la salida de esta.

Es clave en la estimación de caudales máximos y en la construcción de hidrogramas unitarios, pues controla la velocidad de respuesta de la cuenca frente a eventos de lluvia.

4 Introducción

El estudio y la gestión de los recursos hídricos constituyen un desafío creciente en un contexto de variabilidad climática, presión antrópica y demanda de infraestructuras resilientes. En este escenario, los modelos hidrológicos se consolidan como herramientas fundamentales, ya que permiten simular y predecir la respuesta de una cuenca frente a diferentes escenarios de precipitación y uso del suelo. Su aplicación resulta especialmente relevante en regiones con alta pluviosidad y limitada disponibilidad de información hidrometeorológica, donde las incertidumbres asociadas a la estimación de caudales extremos pueden comprometer tanto la seguridad de la población como la planificación territorial.

Entre los modelos disponibles, el Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, se ha convertido en una herramienta de amplia difusión por su flexibilidad, precisión y capacidad de integración con datos espaciales provenientes de sistemas de información geográfica (SIG). Su enfoque semidistribuido, basado en la representación de cuencas agregadas y su semidistribuido en subcuencas, cauces y embalses, permite capturar la heterogeneidad espacial de los procesos hidrológicos sin llegar a la complejidad de un modelo completamente distribuido. Esto lo hace especialmente útil en cuencas de tamaño medio y grande, donde la variabilidad en suelos, pendientes y coberturas vegetales influye de manera decisiva en la generación de escorrentía.

El presente trabajo de grado se centra en la aplicación del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Sucio, ubicada en el Urabá antioqueño, una región caracterizada por altas

precipitaciones, topografía montañosa y transformaciones aceleradas de la cobertura vegetal asociadas a la expansión agroindustrial y urbana. Estas condiciones han incrementado la ocurrencia de eventos extremos como crecientes súbitas e inundaciones, que ponen en riesgo a comunidades e infraestructuras estratégicas. Ante este panorama, se propone una estimación de caudales máximos en la cuenca mediante un esquema comparativo entre modelación agregada y semidistribuido en subcuencas, con el fin de evaluar las diferencias en la representación de los procesos hidrológicos y aportar insumos técnicos para la gestión del riesgo hídrico.

La investigación se apoya en el uso de Modelos Digitales de Elevación (MDE), series históricas de precipitación, curvas IDF, Diagrama de Huff y métodos de propagación de caudales como Muskingum-Cunge. Asimismo, incorpora parámetros fundamentales de la hidrología aplicada, como el número de curva (CN), el tiempo de concentración (T_c), el hidrograma unitario sintético y factores de reducción de área. De esta manera, se busca generar un análisis robusto y contextualizado que contribuya al conocimiento de la dinámica hidrológica en la región, fortalezca la planificación territorial y proporcione bases técnicas para la implementación de medidas de adaptación frente a fenómenos extremos.

5 Justificación

La cuenca del río Sucio, localizada en la región del Urabá antioqueño, constituye un territorio de alta importancia ambiental y socioeconómica, caracterizado por una elevada pluviosidad, topografía montañosa y un paisaje en transformación debido a la expansión agroindustrial y urbana (Restrepo y Kjerfve, 2000; Armenteras et al., 2006). Estas condiciones hacen que la cuenca presente una alta vulnerabilidad ante eventos hidrológicos extremos, como crecientes súbitas e inundaciones, cuya frecuencia e intensidad han aumentado en los últimos años (Valle, 2021).

La estimación precisa de caudales máximos constituye un elemento esencial para la gestión del riesgo hídrico, el diseño de obras hidráulicas y la planificación territorial (Ponce, 1989; Chow et al., 1994). Sin embargo, la limitada disponibilidad y continuidad de registros hidrometeorológicos en muchas regiones de Colombia, incluida Urabá, restringe la aplicación de métodos empíricos tradicionales (Arroyo Quinto, 2023). Frente a este desafío, los modelos hidrológicos ofrecen una alternativa robusta, al permitir simular el comportamiento del agua en una cuenca bajo condiciones controladas, integrando información topográfica, edáfica y climática.

Entre los modelos más empleados se encuentra el HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, ampliamente validado en la simulación de procesos de precipitación-escorrentía en cuencas naturales y urbanas (Hydrologic Engineering Center (US), y Water Resources Support Center (US), 1981; Feldman, 1994). Su estructura modular y su enfoque semidistribuido permiten representar la

variabilidad espacial de los procesos hidrológicos, lo cual resulta clave para cuencas de tamaño medio como la del río Sucio.

La presente investigación adopta un enfoque de modelación semidistribuida, en el cual la cuenca se subdivide en unidades homogéneas o subcuencas representativas. Esta decisión se sustenta en el criterio del Umbral de Área de Formación de Canal (S_1) propuesto por (Moussa, 2003), quien establece que la red de drenaje alcanza una configuración estable cuando el número de fuentes (N) y el área de contribución (S) cumplen una relación fractal que define el punto de transición entre flujos dispersos y canales definidos. Este umbral permite determinar subdivisiones hidrológicamente coherentes, evitando particiones arbitrarias y mejorando la representatividad espacial del modelo.

La subdivisión de la cuenca del río Sucio en las subcuencas Urama y La Herradura responde, por tanto, a un criterio hidrológico objetivo y geomorfológicamente sustentado. Dicha estructura permite identificar el aporte individual de cada subcuenca al caudal total, evaluar los procesos de propagación y atenuación de los hidrogramas y generar una visión integral del comportamiento del sistema hidrológico.

De esta manera, el trabajo aporta insumos técnicos para la gestión del riesgo por inundaciones, la planificación del uso del suelo y la gestión del recurso hídrico en una región estratégica del noroccidente colombiano. Adicionalmente, fortalece la capacidad de análisis hidrológico mediante la integración de herramientas SIG y modelos numéricos, contribuyendo a la generación de conocimiento aplicable a la gestión sostenible del agua en territorios con información limitada.

En síntesis, la justificación de este estudio se basa en la necesidad de comprender, modelar y predecir la respuesta hidrológica del río Sucio ante eventos extremos, a través del uso del modelo HEC-HMS y de criterios de discretización espacial científicamente sustentados, como el propuesto por (Moussa, 2003). Esto permitirá contar con una base técnica sólida para la toma de decisiones informadas, la reducción del riesgo y la planificación hídrica en la región del Urabá antioqueño.

6 Marco teórico y estado del arte

Los modelos hidrológicos son herramientas esenciales para el estudio y la gestión de los recursos hídricos, ya que permiten simular y predecir el comportamiento de los procesos que ocurren en una cuenca. Gracias a ellos es posible analizar fenómenos como la precipitación, la escorrentía superficial, la infiltración y el flujo subsuperficial. Estos modelos suelen clasificarse en tres categorías principales: lumped (concentrados), distribuidos y semidistribuidos, cada uno con un nivel distinto de detalle y complejidad. En general, los modelos hidrológicos ofrecen una aproximación cuantitativa al movimiento y almacenamiento del agua, lo que favorece la comprensión de la dinámica del ciclo hidrológico.

La creciente necesidad de administrar los recursos hídricos de manera sostenible y eficiente ha impulsado el desarrollo de modelos cada vez más avanzados. Estas herramientas no solo permiten predecir eventos extremos —como inundaciones o sequías—, sino que también son clave para la planificación de infraestructuras hidráulicas y para la gestión integral de cuencas hidrográficas. En este contexto, los modelos semidistribuidos han cobrado especial relevancia, ya que logran un equilibrio entre la precisión en la representación espacial y la simplicidad en los cálculos computacionales.

Dentro de este grupo se encuentra el Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. HEC-HMS permite la simulación de procesos hidrológicos en cuencas agregadas y su posterior subdivisión en subcuencas, cauces, embalses y uniones. La incorporación de cuencas agregadas ofrece una visión global del sistema hídrico,

mientras que la semidistribuido en subcuencas posibilita un análisis más detallado de la contribución de cada sector al caudal total. Cada elemento puede ser modelado de forma independiente, lo que facilita el estudio del aporte hidrológico en distintas escalas espaciales.

El software cuenta con múltiples métodos para estimar la escorrentía, como el Número de Curva (CN) del SCS, el método de pérdidas de Green-Ampt o el balance de masas. Para transformar la lluvia en escorrentía se pueden aplicar enfoques como el hidrograma unitario sintético o el modelo de reservorio. Asimismo, HEC-HMS permite integrar eventos históricos, realizar análisis de escenarios y ejecutar calibraciones automáticas, aumentando la confiabilidad de los resultados.

Los modelos semidistribuidos, al dividir una cuenca en subcuencas u otras unidades homogéneas en términos de suelo, cobertura vegetal, pendiente o parámetros hidrológicos, permiten capturar la variabilidad espacial sin necesidad de llegar al nivel de detalle de un modelo distribuido completo. En este sentido, el uso de cuencas agregadas y subcuencas en HEC-HMS resulta especialmente útil para cuencas de tamaño medio o grande, donde la heterogeneidad espacial influye en la generación de escorrentía, pero un modelo distribuido resultaría demasiado complejo o costoso.

La incorporación de datos espaciales mediante sistemas de información geográfica (SIG) complementa este enfoque, ya que posibilita representar con mayor precisión variables críticas como la topografía, el uso del suelo o la red hidrográfica. En conjunto, la modelación de cuencas agregadas y subcuencas en HEC-HMS optimiza la evaluación

del balance hídrico y la simulación de procesos hidrológicos, constituyendo una herramienta versátil y robusta para la gestión y planificación de los recursos hídricos.

6.1 Modelo Digital de Elevación (MDE)

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) corresponde a una representación digital en tres dimensiones del relieve terrestre, en la que se registran las variaciones de altura con respecto al nivel medio del mar (msnm). Generalmente se construye a partir de una malla regular en formato ráster, compuesta por celdas o píxeles, cada uno con un valor numérico que indica la altitud del terreno en ese punto. Esta organización matricial permite describir de manera precisa la topografía, identificar formas del relieve y reconocer tanto estructuras naturales como modificaciones de origen humano.

Desde que surgieron en la década de 1950, los MDE han experimentado un notable desarrollo tecnológico, consolidándose como una herramienta indispensable en ámbitos como la ingeniería, la geografía, la planificación territorial y la gestión ambiental. Su utilidad se ha visto incrementada con la incorporación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y programas especializados que hacen posible analizarlos, modelarlos y representarlos en entornos bidimensionales y tridimensionales.

Los MDE se utilizan ampliamente en el estudio de la morfología del terreno, en la caracterización de coberturas vegetales y en la detección de cambios asociados a la actividad antrópica. Además, constituyen una base cartográfica fundamental para la generación de productos derivados, entre los que destacan los mapas de delimitación de cuencas hidrográficas, los análisis de fragilidad paisajística, las evaluaciones de impacto

ambiental y la creación de escenarios virtuales en 3D para la simulación de procesos naturales o proyectos de infraestructura.

Una de sus funcionalidades más relevantes es la capacidad de derivar automáticamente la red de drenaje de un territorio. Mediante este proceso es posible identificar el cauce principal de un río, ubicar sus afluentes y delimitar subcuencas. Esta información resulta esencial en la planificación y gestión de los recursos hídricos, la prevención de riesgos asociados a inundaciones o deslizamientos y en el diseño de estrategias de manejo integral del territorio.

6.2 Pendiente del canal principal

La pendiente del cauce principal (S) se expresa como la relación entre la diferencia altimétrica del río y su longitud total. Dicha diferencia de elevación, representada como H_c , corresponde al desnivel existente entre la cota más alta (CM) y la cota más baja (Cm) a lo largo del perfil longitudinal del cauce. Matemáticamente, se define como:

$$S = \frac{H_c}{L} = \frac{CM - Cm}{L}$$

Donde:

S = pendiente del canal (adimensional),

CM = cota máxima del cauce,

Cm = cota mínima del cauce,

L = longitud del río.

Este parámetro describe el gradiente hidráulico y resulta fundamental en el análisis del flujo en canales naturales o artificiales, ya que el desplazamiento del agua en estos sistemas está gobernado por la acción de la gravedad.

6.3 Curva Numero (CN)

El método del Número de Curva (Curve Number, CN) es una de las técnicas hidrológicas más empleadas para estimar la escorrentía directa producida por eventos de precipitación de corta duración, generalmente en intervalos de 24 horas. Se trata de una herramienta ampliamente utilizada en la planificación y diseño de obras hidráulicas, así como en la evaluación de impactos hidrológicos en cuencas y áreas de drenaje.

El CN es un parámetro adimensional que varía entre 0 y 100 y refleja la capacidad del suelo y de la cobertura superficial para infiltrar agua o generar escorrentía. Valores bajos de CN corresponden a terrenos con alta capacidad de infiltración y, por ende, baja generación de escorrentía; mientras que valores altos indican condiciones de baja infiltración y, en consecuencia, mayor escurrimiento superficial.

- CN = 1: prácticamente toda el agua se infiltra, generando escorrentía nula.
- CN = 100: toda la precipitación se convierte en escorrentía, sin infiltración.

En la práctica, los valores del CN para condiciones reales de cuencas, considerando suelos y coberturas, suelen encontrarse en un rango de 40 a 98.

La relación entre el CN, la infiltración y la escorrentía puede resumirse de la siguiente manera:

$$\text{CN}\uparrow \Rightarrow \text{Escorrentía}\uparrow, \text{Infiltración}\downarrow$$

Esto significa que, a mayor valor de CN, mayor será la escorrentía generada por un evento de lluvia, debido a la reducción en la capacidad del terreno para absorber agua.

6.4 Curvas IDF

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) constituyen una herramienta fundamental en hidrología, ya que describen de forma gráfica o matemática la relación entre la intensidad de la precipitación (mm/h), el tiempo de duración del evento (en minutos u horas) y su frecuencia o período de retorno (expresado en años).

La formulación general de una curva IDF puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{C1}{(D + X0)^{C2}}$$

Donde:

- I = intensidad de lluvia (mm/h),
- D = duración del evento (min),
- C1, X0, C2 = parámetros empíricos derivados del ajuste estadístico de series históricas de precipitación.

Estas curvas se emplean principalmente para el diseño hidrológico, ya que permiten caracterizar tormentas de diferentes magnitudes y probabilidades de ocurrencia. A partir de ellas se pueden generar hietogramas de diseño, que representan la distribución temporal de la lluvia y sirven como insumo en modelos de simulación hidrológica, facilitando la evaluación del impacto de eventos extremos sobre cuencas y sistemas hidráulicos.

6.5 Tiempo de concentración (Tc)

El tiempo de concentración (Tc) se define como el intervalo requerido para que una gota de agua que cae en el punto más alejado de una cuenca hidrográfica llegue hasta su

salida. Este parámetro es fundamental en el diseño de obras de drenaje y en la estimación de caudales pico durante eventos de precipitación intensa.

El valor de T_c está influenciado por diferentes características físicas de la cuenca, tales como la longitud del cauce principal (L_c), la pendiente media del cauce (S) y el área de drenaje (A).

Para su determinación se han propuesto múltiples métodos, tanto empíricos como teóricos. Cada fórmula ha sido desarrollada considerando condiciones específicas de cuencas, por lo que los resultados pueden variar entre métodos y deben seleccionarse de acuerdo con las características particulares del área de estudio.

Tabla 1

Fórmulas para estimar los tiempos de concentración.

Nombre	Ecuación
Kirpich	$T_c = 0,0663 * L^{0,77} * A^{-0,1} * S^{-0,2}$
Ven te Chow	$T_c = 0,1602 * L^{0,64} * S^{-0,32}$
Dooge	$T_c = 0,365 * A^{0,41} * S^{-0,17}$
Johnstone	$T_c = 0,4623 * L^{0,5} * S^{-0,25}$
Corps of Engineers	$T_c = 0,191 * L^{0,76} * S^{-0,19}$
Pasini	$T_c = 0,108 * A^{0,333} * L^{0,333} * S^{-0,5}$
Picking	$T_c = 0,0883 * L^{0,667} * S^{-0,333}$
Temez	$T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$
Bransby Williams	$T_c = 0,605 * \frac{L}{(100S)^{0,2} A^{0,1}}$
Epsey	$T_c = 6,89 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,36}$
Haktanir and Sezen	$T_c = 0,7473 * L^{0,841}$

Nota. Son las fórmulas empíricas, su resultado de las ecuaciones es la mediana para el

T_c . Elaboración propia.

6.6 Hidrograma Unitario Sintético triangular SCS

El Hidrograma Unitario Sintético (HUS) triangular es una simplificación que representa la respuesta hidrológica de una cuenca mediante un triángulo isósceles, el cual se ajusta a la forma general que adquiere el hidrograma real cuando ocurre una lluvia intensa y de corta duración. Esta aproximación facilita la determinación tanto del caudal pico como de la duración de la escorrentía de manera práctica y rápida.

Un parámetro clave en este método es el tiempo de rezago (TLS), definido como el intervalo comprendido entre el centro de masa de la lluvia efectiva y la ocurrencia del caudal máximo en el hidrograma. En el esquema del HUS triangular propuesto por el Soil Conservation Service (SCS), dicho tiempo se estima en función del tiempo de concentración (T_c) de la cuenca, mediante la expresión:

$$T_{LS} = 0,6 * T_c$$

Donde:

TLS = tiempo de rezago (min),

T_c = tiempo de concentración (min).

Este valor corresponde a un coeficiente empírico obtenido a partir del análisis de múltiples cuencas rurales en Estados Unidos, y ha sido adoptado como referencia estándar dentro del método SCS para la construcción de hidrogramas unitarios sintéticos.

6.7 Hidrograma Unitario Sintético de Snyder

Este método permite la estimación del hidrograma unitario a partir de parámetros físicos de la cuenca, tales como el área de drenaje, la pendiente media, la longitud del cauce principal y la distancia desde la salida hasta el centroide de la cuenca. Una de sus

principales fortalezas radica en el uso de coeficientes empíricos calibrados regionalmente, lo que posibilita su ajuste a distintas condiciones fisiográficas y climáticas.

Para la construcción del hidrograma en este estudio, se consideraron los valores $C_t = 1,5$ y $C_p = 0,8$ como coeficientes de calibración. El tiempo de rezago (TLS) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_{LS} = 0,75 * C_t * (L * L_c)^{0,3}$$

Donde:

- T_{LS} = tiempo de rezago (h),
- C_t = coeficiente empírico (adimensional),
- L = longitud del cauce principal (km),
- L_c = longitud medida hasta el centroide de la cuenca (km).

Este enfoque combina variables geomorfológicas con coeficientes de ajuste, ofreciendo una representación más realista del comportamiento hidrológico de la cuenca en la generación de su hidrograma unitario.

6.8 Diagramas de Huff

El Diagrama de Huff constituye un método empírico empleado para describir la distribución temporal de la precipitación en tormentas de diseño. Este aspecto resulta clave en la modelación hidrológica, ya que la manera en que la lluvia se reparte a lo largo del tiempo influye directamente en el caudal de escorrentía generado en una cuenca.

Este enfoque fue desarrollado por Frank A. (Huff, 1967) tras el análisis de numerosos eventos de tormenta registrados en Illinois, EE. UU. A partir de sus observaciones, se

clasificaron las tormentas en cuatro tipos, según el momento en que ocurre la mayor fracción de la precipitación acumulada:

- Primer cuartil: el máximo de intensidad ocurre al inicio del evento.
- Segundo cuartil: la intensidad más alta se presenta en el segundo cuarto del tiempo total.
- Tercer cuartil: el pico de lluvia se concentra en la mitad posterior del evento.
- Cuarto cuartil: la mayor intensidad se produce hacia el final de la tormenta.

Cada curva de Huff representa la precipitación acumulada (en % del total) en función del tiempo transcurrido (en % del evento), proporcionando una base empírica para generar Diagramas sintéticos que simulen distintos escenarios de tormenta.

De acuerdo con los estudios de Huff, las tormentas del primer cuartil suelen tener duraciones menores a 6 horas; las del segundo cuartil, entre 6 y 12 horas; las del tercer cuartil, de 12 a 24 horas; y las del cuarto cuartil, más de 24 horas (Huff, 1967). Para el presente caso, se emplea la distribución correspondiente al segundo cuartil para la cuenca agregada, para las cuencas punto a y Urama corresponde al primer cuartil, para las cuencas punto b y Herradura corresponde al segundo cuartil.

6.9 Factor de Reducción de Área

En la modelación hidrológica, uno de los retos más relevantes es convertir los registros de precipitación puntual —como los obtenidos en pluviómetros— en valores representativos de la precipitación media sobre toda una cuenca hidrográfica. Para realizar esta transformación se emplea el Factor de Reducción de Área (FRA), el cual

ajusta la lluvia puntual considerando la variabilidad espacial de la precipitación en superficies extensas.

El FRA es un coeficiente adimensional con valor menor o igual a 1, que se aplica como factor de corrección a los registros de lluvia de punto. Su uso se justifica en el hecho de que la máxima intensidad de precipitación observada en un sitio específico no puede asumirse uniforme en toda la cuenca.

La magnitud del FRA está condicionada principalmente por:

- Área de la cuenca (A), expresada en km²,
- Duración del evento (d), en horas,
- Factores climáticos o regionales, en ciertos casos.

Este ajuste resulta indispensable para obtener estimaciones realistas de la lluvia promedio en una cuenca y, por ende, de los caudales generados en los modelos hidrológicos.

Expresión empírica del FRA

(Koutsoyiannis & Xanthopoulos, 2017) desarrollaron una formulación empírica para el Factor de Reducción de Área (FRA), a partir del análisis de tormentas registradas en superficies comprendidas entre 1 y 30.000 km² y con duraciones que oscilaron entre 1 minuto y 25 días. La expresión se plantea de la siguiente manera:

$$\varphi = \max\left(0,25.1 - \frac{0,048 * A^{0,36-0,01*ln*A}}{d^{0,35}}\right)$$

Donde:

φ = factor de reducción de área (adimensional),

A = área de la cuenca (km²),

d = duración del evento (h),

\ln = logaritmo natural.

Esta ecuación incorpora la no linealidad de la relación entre el área y la reducción de la intensidad media de la precipitación, ofreciendo una representación más realista del comportamiento espacial de la lluvia. Además, el uso de la función $\max()$ establece un límite inferior de $\varphi = 0,25$, evitando que el FRA adopte valores demasiado bajos y reduciendo el riesgo de subestimaciones en los cálculos hidrológicos.

6.10 Tránsito de hidrogramas

El tránsito de hidrogramas (también denominado routing hidráulico o hidrológico) constituye una de las etapas fundamentales del análisis hidrológico, pues permite determinar cómo se transforma la forma de un hidrograma —que representa la variación temporal del caudal en un punto de una cuenca— a medida que este se desplaza aguas abajo a lo largo de un cauce o a través de un embalse (Chow et al., 1994). En términos generales, el tránsito busca establecer la relación entre el hidrograma de entrada y el hidrograma de salida, considerando los efectos del almacenamiento y del retardo en el flujo.

Cuando una avenida o pulso de escorrentía recorre un tramo de río, no toda el agua que ingresa sale inmediatamente. Parte de ella se almacena temporalmente en el cauce, en las llanuras de inundación o en los depósitos naturales, generando una amortiguación del pico de caudal (atenuación) y un desplazamiento temporal del máximo (retardo) (USAL, 2015). De esta manera, el tránsito de hidrogramas describe cómo los procesos físicos de

almacenamiento y descarga modifican la forma y la magnitud del flujo conforme el agua avanza.

En la práctica, el tránsito de hidrogramas se utiliza para predecir el comportamiento del caudal en puntos no aforados, estimar tiempos de concentración, analizar la capacidad hidráulica de los cauces y estructuras (puentes, vertederos, presas), y diseñar obras de control de inundaciones. Asimismo, su aplicación es esencial en modelos hidrológicos como HEC-HMS, que requieren estimar cómo la esorrentía generada por una subcuenca se propaga hacia las secciones de control o puntos de salida (USACE, 2020).

Existen dos enfoques principales para el tránsito de hidrogramas:

1. El tránsito hidráulico, que se basa en las ecuaciones de Saint-Venant y considera explícitamente la conservación de la masa y la cantidad de movimiento, siendo más preciso, pero también más complejo y demandante en términos computacionales.
2. El tránsito hidrológico, que simplifica el proceso considerando únicamente la ecuación de continuidad y una relación empírica entre el caudal y el almacenamiento (Linsley et al., 1975). Dentro de este grupo se encuentran métodos ampliamente utilizados como el de Muskingum, Muskingum-Cunge y Lag & Route, entre otros.

El tránsito hidrológico, en particular, resulta de gran utilidad en la modelación de cuencas donde no se dispone de información detallada de geometría de cauces o condiciones hidráulicas, pero sí se cuenta con datos hidrométricos o cartográficos suficientes para calibrar parámetros de almacenamiento y retardo. Este tipo de enfoque es especialmente adecuado en regiones tropicales como el Urabá antioqueño, donde la

variabilidad climática y la limitada red de afluentes dificultan la aplicación de modelos puramente hidráulicos.

En resumen, el tránsito de hidrogramas permite traducir la dinámica física de la propagación del flujo en una representación matemática y temporal del caudal, siendo una herramienta esencial en la hidrología aplicada, el diseño de infraestructura hidráulica y la gestión de riesgos por inundaciones. Su correcta comprensión y parametrización constituyen la base para interpretar la respuesta hidrológica de una cuenca ante distintos escenarios de precipitación o manejo del territorio.

6.11 Modelo Hidrológico Agregado

El modelo hidrológico agregado (también denominado modelo concentrado o lumped model) constituye uno de los enfoques más tradicionales dentro de la modelación hidrológica. En este tipo de modelos, la cuenca hidrográfica se representa como una unidad única e indivisible, en la cual se asume que las propiedades físicas y los procesos hidrológicos son espacialmente homogéneos. Esto implica que variables como la precipitación, la infiltración, la escorrentía y el almacenamiento se consideran uniformes en toda el área de estudio, y su variación temporal se describe mediante funciones globales o promedios espaciales.

Según Chow et al. (1994) el modelo agregado simplifica la complejidad espacial de una cuenca al concentrar sus características morfométricas (área, pendiente media, longitud del cauce, cobertura del suelo, entre otras) en parámetros únicos representativos. Esta simplificación permite obtener una visión general del comportamiento hidrológico del sistema, facilitando la estimación de caudales medios, máximos o de diseño,

especialmente en escenarios donde la información espacial detallada es limitada o inexistente.

Aplicaciones y Ventajas

El modelo agregado es ampliamente utilizado en la hidrología aplicada para la simulación de eventos de tormenta, el diseño de infraestructuras hidráulicas (presas, drenajes, vertederos) y la planificación del recurso hídrico. Su principal ventaja radica en la simplicidad computacional y en los requerimientos mínimos de información, lo que lo convierte en una herramienta útil para cuencas con datos hidrometeorológicos escasos o con baja resolución espacial (Beven, 2012).

Asimismo, el modelo agregado permite realizar calibraciones rápidas y obtener resultados aproximados del régimen hidrológico de una cuenca, constituyendo un punto de partida para estudios más detallados. En el contexto del software HEC-HMS, esta aproximación corresponde a la configuración inicial del modelo, en la cual se representa a la cuenca del río Sucio como un único sistema integral, evaluando su comportamiento general ante distintos escenarios de lluvia de diseño.

Limitaciones y Transición hacia Modelos Semidistribuidos

Pese a sus ventajas operativas, los modelos agregados presentan limitaciones inherentes a su simplificación. Al asumir homogeneidad espacial, no representan adecuadamente la variabilidad de la precipitación, los tipos de suelo o las coberturas vegetales dentro de la cuenca. Como consecuencia, pueden subestimar o sobreestimar los caudales pico y los tiempos de respuesta del sistema (Singh y Woolhiser, 2002).

Por esta razón, la aplicación del modelo agregado suele considerarse una etapa preliminar dentro de la modelación hidrológica. Los resultados obtenidos sirven como referencia para la calibración y validación de modelos de mayor detalle, como los modelos semidistribuidos, que subdividen la cuenca en unidades homogéneas o subcuencas elementales (Moussa, 2003).

En este proyecto, el modelo agregado del río Sucio permitió caracterizar el comportamiento hidrológico general de la cuenca antes de proceder a su semidistribuido en las subcuencas Herradura y Urama, asegurando la coherencia entre la escala espacial de modelación y la respuesta hidrológica observada.

6.12 Modelo Hidrológico Distribuido

El modelo hidrológico distribuido representa el nivel más avanzado y detallado en la modelación de los procesos hidrológicos dentro de una cuenca. A diferencia de los modelos agregados o semidistribuidos, este enfoque considera explícitamente la variabilidad espacial y temporal de las características físicas, topográficas y meteorológicas de la cuenca, permitiendo una simulación más realista de la dinámica del ciclo hidrológico (Singh y Woolhiser, 2002; Beven, 2012).

En un modelo distribuido, la cuenca hidrográfica se divide en una malla o rejilla compuesta por celdas elementales (generalmente de tamaño uniforme), donde cada celda se trata como una unidad independiente en la cual se resuelven las ecuaciones de balance hídrico y de flujo. Las propiedades del suelo, la pendiente, el uso del suelo, la rugosidad y las condiciones meteorológicas pueden variar de una celda a otra, lo que permite capturar

la heterogeneidad espacial que caracteriza a los sistemas hidrológicos naturales (Refsgaard y Storm, 1995).

Ventajas y Aplicaciones

El modelo distribuido proporciona una representación físicamente basada del sistema hidrológico, lo que permite analizar con precisión el impacto de cambios en el uso del suelo, la deforestación, la urbanización o el cambio climático sobre la respuesta de una cuenca (Abbott et al., 1986).

Su principal fortaleza radica en la capacidad de identificar zonas críticas de generación de escorrentía y evaluar los procesos hidrológicos con alta resolución espacial y temporal.

Estos modelos son especialmente útiles para:

- Simular inundaciones y flujos extremos en tiempo real.
- Evaluar la recarga de acuíferos y el flujo subterráneo.
- Analizar la respuesta hidrológica ante escenarios de cambio climático.
- Desarrollar planes de ordenamiento territorial y gestión del recurso hídrico

basados en evidencia espacial.

Limitaciones y Consideraciones Prácticas

A pesar de sus ventajas, los modelos distribuidos presentan limitaciones relacionadas con su alta demanda de datos, complejidad computacional y necesidad de calibración intensiva. Requieren información espacial detallada —como modelos digitales de elevación de alta resolución, mapas de suelo, cobertura vegetal, parámetros hidráulicos y

meteorológicos distribuidos—, así como una capacidad significativa de procesamiento y almacenamiento (Beven, 2012).

Además, su precisión depende en gran medida de la calidad y densidad de los datos de entrada, lo cual puede ser un desafío en regiones donde la red hidrometeorológica es escasa o discontinua, como ocurre en amplias zonas de Colombia (Arroyo Quinto, 2023).

Por estas razones, la modelación distribuida suele emplearse en cuencas piloto o en estudios de detalle, mientras que los modelos semidistribuidos, como el HEC-HMS, constituyen una alternativa más eficiente para la representación espacial de cuencas de tamaño medio o grande, equilibrando precisión y simplicidad.

Relevancia dentro del Estudio

En el presente trabajo, el concepto de modelo distribuido sirve como referente teórico que fundamenta la subdivisión de la cuenca del río Sucio en unidades hidrológicamente homogéneas. Aunque el modelo aplicado (HEC-HMS) no es completamente distribuido, incorpora principios derivados de esta concepción al representar las subcuencas Herradura y Urama como entidades independientes con parámetros físicos específicos.

De este modo, se garantiza una aproximación más realista a la dinámica espacial del escurrimiento y a la generación de caudales máximos en el sistema fluvial.

6.13 Fundamento Teórico de la Subdivisión de la Cuenca

6.13.1 Criterios Hidrológicos para la Representación Espacial de una Cuenca

La representación hidrológica de una cuenca depende de su estructura espacial y de la escala a la que se modelen los procesos de escorrentía y concentración de flujo. Según (Moussa, 2003), la respuesta hidrológica de una cuenca está íntimamente ligada a sus

propiedades morfométricas (área, pendiente, longitud de cauce, forma y jerarquía de drenaje), las cuales determinan la manera en que el flujo se genera y se propaga a lo largo del sistema.

El autor plantea que las cuencas no pueden ser consideradas entidades homogéneas, ya que su comportamiento hidrológico responde a la distribución espacial de los aportes y a la conectividad de las subáreas contribuyentes. En este contexto, la subdivisión de una cuenca en unidades elementales o subcuencas se justifica cuando existe una variación significativa en las características morfométricas y fisiográficas que afectan la distribución de la escorrentía y los tiempos de concentración.

6.13.2 Justificación Teórica según Moussa (2003)

De acuerdo con (Moussa, 2003), la identificación de áreas umbral o “threshold areas (S_1)” permite determinar el tamaño óptimo de subdivisión en un modelo hidrológico distribuido. Este umbral corresponde al punto en que las propiedades geomorfológicas de la red de drenaje dejan de comportarse de manera fractal, indicando que la agregación o subdivisión adicional ya no aporta mejoras significativas en la representación hidrológica.

En términos prácticos, cuando el área de una subcuenca supera el umbral S_1 , se pierde capacidad de representar correctamente la variabilidad espacial de los procesos de escurrimiento. Por el contrario, al dividir una cuenca en unidades cuyas áreas se encuentren por debajo de este umbral, se logra una mejor aproximación de los procesos de generación de caudal y propagación del flujo.

Por tanto, la subdivisión de la cuenca del río Sucio en las subcuencas Herradura y Urama responde a esta base teórica: se busca que cada subcuenca conserve homogeneidad interna en términos de pendiente, cobertura del suelo y red de drenaje, garantizando que el modelo HEC-HMS capture de manera adecuada las diferencias espaciales en la respuesta hidrológica.

6.13.3 Aplicación del Criterio de Moussa en la Cuenca del Río Sucio

En la presente investigación, la delimitación de las subcuencas Herradura y Urama se realizó con base en la variabilidad topográfica y en la estructura jerárquica de la red de drenaje. Estos sectores mostraron comportamientos hidrológicos diferenciados que justifican su tratamiento independiente dentro del modelo semidistribuido.

El criterio de Moussa (2003) fue aplicado conceptualmente al evaluar la proporción entre el área total de la cuenca (S_0) y las áreas de las subcuencas (S_1 Herradura y S_1 Urama), asegurando que el cociente S_1/S_0 se mantuviera dentro del rango teórico recomendado (0.07–0.17) para representar cuencas con estructura geomorfológica compleja. Este rango garantiza un equilibrio entre el nivel de detalle espacial y la eficiencia computacional del modelo, evitando tanto la sobre-segmentación como la pérdida de información espacial relevante.

6.13.4 Implicaciones en la Modelación Hidrológica con HEC-HMS

La adopción del criterio de subdivisión propuesto por Moussa (2003) fortalece la validez conceptual del modelo semidistribuido empleado en HEC-HMS. Al dividir la cuenca del río Sucio en dos subcuencas con propiedades morfométricas contrastantes, se

optimiza la representación de los tiempos de concentración, la propagación de caudales y la distribución espacial de la lluvia efectiva.

De esta forma, el modelo no solo reproduce con mayor precisión los caudales máximos y los tiempos al pico, sino que también permite identificar zonas críticas de generación de escorrentía, aportando información esencial para la gestión del riesgo por inundaciones y la planificación del recurso hídrico en la región del Urabá antioqueño.

6.14 El Umbral de Área de Formación de Canal (S_1)

En el marco de la modelación hidrológica distribuida, Moussa (2003) introduce el concepto del Umbral de Área de Formación de Canal (S_1) como un criterio objetivo para definir la estructura jerárquica y la subdivisión espacial de una cuenca. Este parámetro surge a partir del análisis geomorfológico de la red de drenaje, mediante la relación entre el área de contribución (S) y el número de subcuencas fuente (N), variables que describen el comportamiento estructural del sistema fluvial.

Definición Conceptual

El S_1 representa el área umbral en la cual la red de drenaje realiza una transición desde un régimen ramificado, con múltiples tributarios activos y flujos dispersos, hacia un sistema de canal principal bien definido. En términos hidrológicos, este valor marca el límite a partir del cual las contribuciones de escorrentía comienzan a integrarse de manera organizada, generando un flujo concentrado que caracteriza la respuesta hidrológica de la cuenca.

De acuerdo con Moussa (2003), para valores de $S < S_1$, la cuenca se comporta bajo un régimen fractal, donde la relación entre el número de subcuencas (N) y el área de

contribución (S) sigue una ley potencial. En este dominio, pequeñas variaciones espaciales generan una alta dispersión en los flujos, lo que indica una respuesta local heterogénea.

Por el contrario, cuando $S \geq S_1$, el sistema entra en un régimen de agregación, donde la estructura de drenaje se estabiliza y el flujo tiende a concentrarse en un cauce dominante, reduciendo la complejidad fractal.

Significado Físico y Aplicación

El S_1 tiene una interpretación física directa: corresponde al área mínima necesaria para la formación de un canal permanente o dominante dentro de la red de drenaje. Este punto de transición delimita la escala a la cual los procesos de escurrimiento superficial dejan de estar controlados por micro topografías locales y comienzan a responder a la organización fluvial principal.

En consecuencia, el S_1 constituye un criterio cuantitativo para definir el tamaño óptimo de las unidades de modelación dentro de una cuenca. Las subcuencas con áreas cercanas o inferiores a S_1 presentan homogeneidad hidrológica interna, mientras que aquellas significativamente mayores pueden enmascarar diferencias locales en la generación de caudal.

Moussa (2003) demuestra que el cociente $s_1 = S_1/S_0$ (donde S_0 es el área total de la cuenca) permite comparar cuencas de diferentes tamaños y evaluar la escala de transición. En su estudio, los valores de s_1 varían típicamente entre 0.07 y 0.17, dependiendo de la complejidad geomorfológica del sistema fluvial. Este rango ha sido

adoptado como referencia para definir subdivisiones representativas en modelos hidrológicos semidistribuidos.

Aplicación al Caso del Río Sucio

Siguiendo este criterio, en la cuenca del río Sucio (Urabá, Antioquia) la subdivisión en las subcuencas Herradura y Urama se realizó con base en la variabilidad morfométrica identificada en el MDE, de manera que cada subcuenca mantuviera un área de contribución próxima al umbral S_1 teórico. De este modo, se asegura que la delimitación respete el punto de transición geomorfológica y que las unidades de modelación representen de forma adecuada los procesos de formación y concentración de caudal dentro del sistema.

Esta aproximación garantiza que el modelo hidrológico HEC-HMS capture las diferencias espaciales en la respuesta de escorrentía, mejorando la estimación de caudales máximos, tiempos al pico y volúmenes de escorrentía, y fortaleciendo la base teórica del esquema semidistribuido aplicado.

6.15 Método de Muskingum-Cunge

El método de Muskingum-Cunge surge como una alternativa que combina la simplicidad del método clásico de Muskingum con la rigurosidad de los enfoques hidráulicos. Su propósito principal es representar el propagado del caudal en cauces naturales mediante la estimación de las constantes K y X , que se definen a partir de parámetros hidráulicos del cauce (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

Las expresiones matemáticas para estos parámetros son:

$$K = \frac{\Delta x}{c}$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{BS_0 c \Delta x} \right)$$

Donde:

- Δx = longitud del tramo de cauce considerado,
- c = celeridad o velocidad media,
- m = coeficiente aproximado de 5/3 para cauces naturales amplios,
- S_0 = pendiente media del cauce (adimensional),
- Q = caudal,
- B = ancho del cauce.

La correcta aplicación del método requiere definir de forma adecuada los intervalos de tiempo (Δt) y de longitud (Δx), dividiendo el tramo del cauce en subtramos. De este modo, el caudal de salida de cada subtramo constituye la entrada del siguiente, asegurando una representación más realista de la propagación del flujo en sistemas fluviales (U.S. Army Corps of Engineers, 1994). Para este caso se utilizó en $X= 0,3$.

6.16 Elementos de red hidrológica en HEC-HMS: Source, Junction, Diversion y Sink

Dentro de la configuración de redes de flujo en HEC-HMS, se emplean varios tipos de elementos para representar entradas, combinaciones, extracciones y salidas de agua en el sistema. Estos elementos permiten construir modelos hidrológicos más flexibles y realistas al reflejar la dinámica espacial de los aportes y la propagación del caudal.

Elementos “Source” (fuente). Estos nodos permiten introducir flujos medidos o estimados en puntos intermedios de la red de drenaje, o representar condiciones de

frontera en la parte superior del sistema (por ejemplo, aporte desde cuencas no modeladas). (Hydrologic Engineering Center, s.f.)

Elementos “Junction” (unión / confluencia). Se utilizan para combinar múltiples flujos entrantes en un solo punto de salida, reflejando la confluencia natural de afluentes o tributarios en un cauce principal. (Hydrologic Engineering Center, s.f.)



Elementos “Diversion” (derivación). Representan puntos en la red donde parte del caudal es desviado (extraído) hacia otro canal, canal de riego o sistema alternativo de descarga. Este componente permite modelar pérdidas de flujo o usos intermedios del agua dentro del sistema hidrográfico. (Hydrologic Engineering Center, s.f.)



Elementos “Sink” (sumidero / salida). Representan los puntos de salida del sistema o cuenca, donde el caudal modelado abandona la red de flujo considerada. En un modelo de cuenca puede haber más de una salida asignada. (Hydrologic Engineering Center, s.f.)

Este conjunto de elementos proporciona a los modeladores la capacidad de simular con mayor realismo la estructura del drenaje en una cuenca: desde los aportes locales hasta las combinaciones de flujos y las derivaciones, hasta el punto final de salida del sistema.

Tabla 2

Elementos fundamentales de la estructura del modelo hidrológico en HEC-HMS

Elementos	Imagen de la herramienta
Source (Fuente)	
Junction (unión / confluencia)	

Diversion (derivación)	
Sink (sumidero / salida)	

Nota. En el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), los elementos del modelo constituyen las entidades básicas que permiten representar el comportamiento hidrológico y la conectividad espacial dentro de una cuenca hidrográfica. Cada elemento cumple una función específica en la simulación del flujo del agua desde su generación hasta su salida.

6.17 Velocidad hidrodinámica en el cálculo del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico

En el ámbito de la hidrología, la estimación de la velocidad media de escurrimiento en una cuenca es un aspecto fundamental para describir la dinámica del flujo superficial y su relación con el tiempo de concentración. Diversos métodos empíricos han sido desarrollados con el objetivo de representar esta variable de manera más realista, considerando las propiedades geomorfológicas de las cuencas.

(Chen, y otros, 2021) proponen un nuevo método para calcular la velocidad hidrodinámica de los parámetros de flujo (v_k) en el contexto del Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH). Esta velocidad se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V_k = 0,8562L^{0,23}S^{0,385}$$

Donde:

L = longitud del cauce principal (m),

S = pendiente media de la cuenca (m/m),

V_k = velocidad hidrodinámica del parámetro de flujo (m/s).

Esta formulación se emplea para calcular la velocidad media del flujo, lo que permite contrastar y evaluar el grado de ajuste y la racionalidad en la modelación hidrológica. A diferencia de enfoques tradicionales, el método considera tanto la longitud del cauce principal como la pendiente media, integrando así los rasgos geomorfológicos de la cuenca en la estimación de la velocidad del flujo (Chen, y otros, 2021).

7 Planteamiento del problema

La cuenca del río Sucio, ubicada en la región de Urabá – Antioquia, se caracteriza por una alta pluviosidad, una topografía montañosa y una cobertura vegetal en constante transformación debido al crecimiento agroindustrial y urbano (Restrepo y Kjerfve, 2000; Armenteras et al., 2006). Estas condiciones generan una alta susceptibilidad a eventos hidrológicos extremos como crecientes súbitas e inundaciones, que han venido aumentando en frecuencia e intensidad en los últimos años (Valle, 2021).

La estimación precisa de caudales máximos resulta crítica para la gestión del riesgo hídrico, el diseño de infraestructura y la planificación territorial (Ponce, 1989; Chow et al., 1994). Sin embargo, muchas regiones de Colombia, incluida Urabá, carecen de registros hidrometeorológicos continuos, confiables y geográficamente distribuidos, lo cual limita la aplicación de métodos tradicionales de cálculo de caudales de diseño (Arroyo Quinto, 2023).

El uso de modelos hidrológicos permite simular el comportamiento del agua en una cuenca en condiciones controladas y reproducibles. Dentro de estos, el modelo HEC-HMS ha demostrado ser una herramienta eficaz para representar fenómenos como la escorrentía, la infiltración y la transformación del flujo en eventos extremos, tanto en cuencas urbanas como rurales (Feldman, 1994; USACE, 2020).

Pese a su amplia aplicabilidad, HEC-HMS requiere datos morfométricos y climáticos detallados, así como una adecuada calibración basada en condiciones locales. Esto representa un desafío en cuencas como la del río Sucio, donde existe una fragmentación

del conocimiento hidrológico y poca caracterización detallada de subcuencas específicas (Singh y Woolhiser, 2002; Beven, 2012).

El análisis a nivel de subcuencas permite captar la variabilidad espacial del comportamiento hidrológico y mejora la precisión en la estimación de caudales máximos al identificar zonas críticas de generación de escorrentía. Por tanto, aplicar esta metodología en la cuenca del río Sucio representa una oportunidad para generar información clave que fortalezca los sistemas de alerta temprana, la planificación de uso del suelo y el diseño de obras hidráulicas resilientes.

En consecuencia, es urgente desarrollar un estudio que, mediante el uso de HEC-HMS, permita estimar los caudales máximos en la cuenca del río Sucio, considerando la respuesta hidrológica diferenciada de dos subcuencas representativas. Esta estimación contribuirá a una gestión más informada y eficiente del recurso hídrico en una región vulnerable al cambio climático y la expansión de la frontera productiva (Viessman y Lewis, 2002).

7.1 Antecedentes del problema

La región de Urabá, en el departamento de Antioquia, ha sido históricamente reconocida por su alta pluviosidad, su relieve montañoso y la gran diversidad de ecosistemas que la componen. No obstante, el incremento sostenido de las actividades agroindustriales, urbanas y de deforestación ha transformado significativamente el paisaje natural, alterando los patrones hidrológicos y aumentando la vulnerabilidad frente a eventos extremos (Restrepo y Kjerfve, 2000; Armenteras et al., 2006). Estos cambios han generado un desequilibrio en los procesos de infiltración, escorrentía y recarga de acuíferos, que repercute directamente en la frecuencia e intensidad de fenómenos como las crecientes súbitas e inundaciones (Valle, 2021).

En los últimos años, múltiples estudios han señalado la importancia de mejorar la comprensión del comportamiento hidrológico de las cuencas del Caribe colombiano, particularmente aquellas con topografía irregular y fuerte gradiente pluviométrico, como la del río Sucio (Vásquez y Tobón, 2016). Sin embargo, la falta de estaciones hidrometeorológicas con registros continuos y espacialmente distribuidos constituye una limitante crítica para el análisis de los procesos hidrológicos en la región (Arroyo Quinto, 2023). La ausencia de información precisa no solo dificulta la calibración de modelos hidrológicos, sino que también restringe la capacidad institucional de prever y gestionar riesgos asociados a inundaciones y deslizamientos (Díaz y Lavado, 2025).

En este contexto, la modelación hidrológica se presenta como una alternativa técnica de gran valor para suplir los vacíos de información y mejorar la planificación hídrica. Los modelos hidrológicos permiten simular el comportamiento del agua bajo distintos

escenarios de lluvia, cobertura vegetal o uso del suelo, brindando una visión integral del ciclo hidrológico (Chow et al, 1994). Entre los modelos más utilizados, el Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, destaca por su versatilidad y capacidad de representar tanto cuencas rurales como urbanas (Feldman, 1994; USACE, 2020). Este modelo incorpora métodos ampliamente validados para el cálculo de pérdidas por infiltración, la transformación de la lluvia en esorrentía y la propagación del flujo, lo que lo convierte en una herramienta esencial para la gestión del riesgo hídrico.

No obstante, la aplicación del modelo HEC-HMS exige la disponibilidad de parámetros morfométricos, topográficos y climáticos detallados, además de procesos de calibración y validación basados en datos locales (Singh y Woolhiser, 2002; Beven, 2012). La falta de dichos insumos puede conducir a errores significativos en la simulación de caudales, especialmente en cuencas tropicales con alta variabilidad espacial y temporal de la precipitación. Por ello, el análisis hidrológico en la cuenca del río Sucio requiere una adaptación metodológica que considere las limitaciones de información y las particularidades fisiográficas de la zona (Restrepo y Kjerfve, 2000).

En los últimos años, diversas investigaciones han demostrado que el análisis a nivel de subcuencas mejora significativamente la precisión de las estimaciones de caudales máximos y facilita la identificación de zonas críticas de generación de esorrentía. Este enfoque semidistribuido, característico de HEC-HMS, permite capturar la heterogeneidad espacial del terreno, diferenciando la respuesta hidrológica según los usos del suelo, la pendiente y las propiedades de los suelos.

Adicionalmente, el uso de herramientas geoespaciales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Modelos Digitales de Elevación (MDE) ha fortalecido la capacidad de los modelos hidrológicos para representar con mayor exactitud las condiciones topográficas y geomorfológicas de las cuencas (Maidment, 1992; Pusineri et al., 2005). La integración entre SIG y HEC-HMS permite no solo delimitar cuencas y subcuencas con precisión, sino también estimar parámetros hidrológicos claves como el tiempo de concentración, la pendiente media del cauce o el número de curva (CN).

En el caso específico del río Sucio, la carencia de estudios detallados sobre su dinámica hidrológica y la fragmentación de la información disponible dificultan la toma de decisiones en materia de gestión del riesgo. Esta situación cobra especial relevancia ante el aumento de eventos extremos asociados al cambio climático y a la variabilidad interanual del régimen de lluvias (Díaz y Lavado, 2025). En este sentido, la implementación de un modelo semidistribuido como HEC-HMS representa una oportunidad para mejorar el entendimiento del comportamiento del caudal en diferentes sectores de la cuenca y fortalecer las estrategias de prevención frente a inundaciones.

Por tanto, el desarrollo del presente trabajo se enmarca en la necesidad de contar con herramientas técnicas y científicas que permitan estimar con mayor precisión los caudales máximos en la cuenca del río Sucio. Este esfuerzo busca contribuir a la gestión sostenible del recurso hídrico, al diseño de infraestructuras hidráulicas seguras y a la formulación de políticas públicas orientadas a reducir la vulnerabilidad frente a desastres naturales (Viessman y Lewis, 2002; Vásquez y Tobón, 2016).

8 Objetivos

8.1 Objetivo General

Contrastar la estimación de los caudales máximos obtenida mediante los esquemas agregado y semidistribuido del modelo hidrológico HEC-HMS aplicados a la cuenca del río Sucio (Antioquia).

8.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la cuenca del río Sucio y sus subcuencas mediante el análisis morfométrico, hidrológico y meteorológico, definiendo los parámetros físicos necesarios para la configuración del modelo HEC-HMS.
- Establecer las condiciones representativas para eventos de lluvia extrema (eventos de diseño), construyendo los hietogramas de diseño necesarios para los distintos periodos de retorno.
- Simular la respuesta hidrológica de la cuenca mediante el modelo HEC-HMS en sus esquemas Agregado y Semidistribuido, utilizando los parámetros definidos y los eventos de diseño.
- Contrastar los caudales máximos obtenidos de las simulaciones en el enfoque agregado frente al semidistribuido, analizando la influencia del detalle espacial.

9 Metodología

La presente investigación se fundamenta en la implementación de un modelo hidrológico semidistribuido en la cuenca del río Sucio (Urabá antioqueño), utilizando el software HEC-HMS. El enfoque metodológico integra la representación de la cuenca tanto en su forma agregada, como en un esquema semidistribuido por subcuencas, con el fin de contrastar la respuesta hidrológica en distintos niveles de detalle espacial.

El proceso metodológico se estructura en tres fases principales: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento, cada una de ellas diseñada para garantizar la consistencia y la confiabilidad del modelo.

- Preparación de datos e insumos

- **Modelo Digital de Elevación (MDE):** Se empleó para delimitar la cuenca y las subcuencas, identificar la red de drenaje y calcular parámetros topográficos como pendientes, longitudes de cauce y áreas de captación.
- **Punto de control hidrológico (Estación Dabeiba):** Se definió como el cierre hidrológico de la cuenca, georreferenciado en el sistema EPSG:32618 - WGS 84 / UTM Zone 18N, lo cual permitió establecer el área de contribución.
- **Mapas temáticos (cobertura y asociaciones de suelo):**
 - Cobertura de suelos: obtenido del IDEAM (2025), para identificar patrones de uso (bosques, cultivos, zonas urbanas).
 - Asociaciones de suelos: cartografía del IGAC, con atributos de textura, capacidad de infiltración y aptitud agrícola, fundamentales para el cálculo del Número de Curva (CN).

- Herramientas SIG: Se empleó QGIS, con complementos de SAGA GIS, para la delimitación de la cuenca, subdivisión en subcuencas y procesamiento de capas raster y vectoriales.

- Configuración y simulación en HEC-HMS

1. Delimitación de cuenca y subcuencas:

- Se generó un modelo hidrológico de la cuenca en su conjunto (agregada).
- Paralelamente, se definió un esquema semidistribuido, subdividiendo la cuenca en subcuencas elementales, con el fin de representar mejor la variabilidad espacial de la precipitación y del escurrimiento.

2. Parámetros hidrológicos principales:

- Tiempo de concentración (T_c): estimado mediante fórmulas empíricas y ajustado según características fisiográficas.
- Tiempos de rezago (TLS): obtenidos con los métodos de HUS triangular SCS y HUS de Snyder.
- Velocidad hidrodinámica (v_k): calculada con la expresión de Chen et al. (2021), integrando la longitud del cauce y la pendiente media.

3. Eventos de precipitación de entrada:

- Se utilizaron curvas IDF obtenidas del IDEAM para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- Se construyeron Diagramas de Huff (segundo cuartil y primer cuartil) para representar la distribución temporal de las lluvias.

- Se aplicó el Factor de Reducción de Área (FRA), con el fin de transformar la lluvia puntual en lluvia media de cuenca.

4. Criterio Geomorfológico para la Subdivisión de la Cuenca del Río Sucio:

- Umbral de Área de Formación de Canal (S) y su Relación con el Número de Fuentes (N)
- Justificación de la Estructura de Subcuencas del Río Sucio

5. Propagación de caudales en cauces:

- Se implementó el método de Muskingum-Cunge, parametrizado en función del caudal, pendiente media y geometría hidráulica de los tramos de río, para las subcuencas semidistribuido.

6. Configuración en HEC-HMS:

- Creación del proyecto y modelo de cuenca (agregada y semidistribuido).
- Definición del modelo meteorológico.
- Configuración del control de simulación.
- Ejecución de las simulaciones.

- Análisis de resultados

- Comparación entre esquemas (agregado vs. semidistribuido): Se evaluaron las diferencias en los caudales pico, tiempos al pico y volúmenes de escorrentía entre los dos enfoques.
- Análisis del régimen hidrológico: Se verificó la coherencia de los resultados frente a la información observada en la estación Dabeiba.

- Impacto del método Muskingum-Cunge: Se analizó la propagación de caudales en los tramos principales y su efecto en el hidrograma de salida.

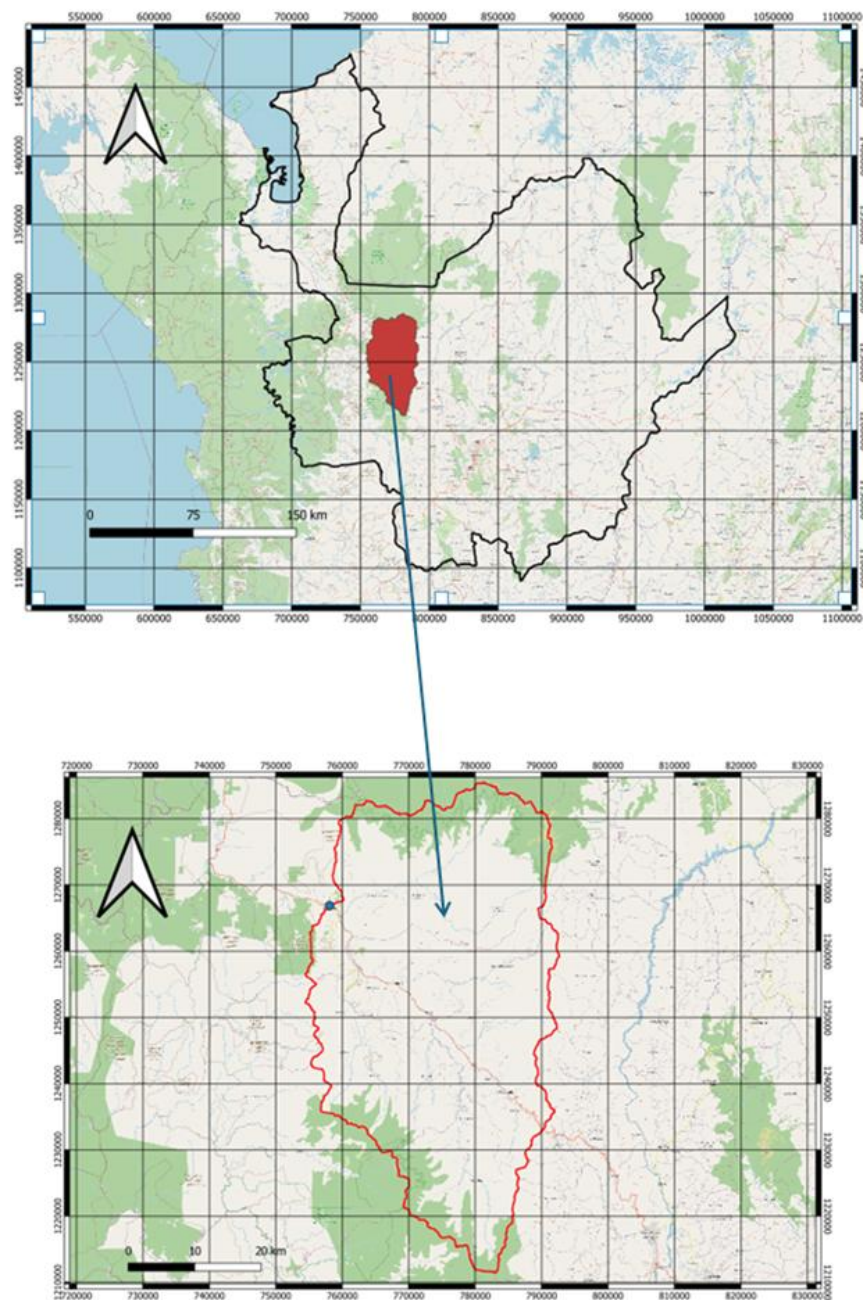
10 Resultados y Discusión

10.1 Localización

La cuenca del río Sucio se sitúa en la región occidental del departamento de Antioquia, Colombia, tal como se muestra en la Ilustración 1. Este sistema hídrico forma parte de la Cordillera Occidental de los Andes colombianos y constituye un afluente del río Atrato. Su área de influencia comprende varios municipios de la zona, entre los cuales se destacan Dabeiba, Frontino, Uramita, Mutatá, Riosucio, Carmen del Darién y Cañasgordas, atravesando territorios de importancia tanto ambiental como socioeconómica.

Ilustración 1

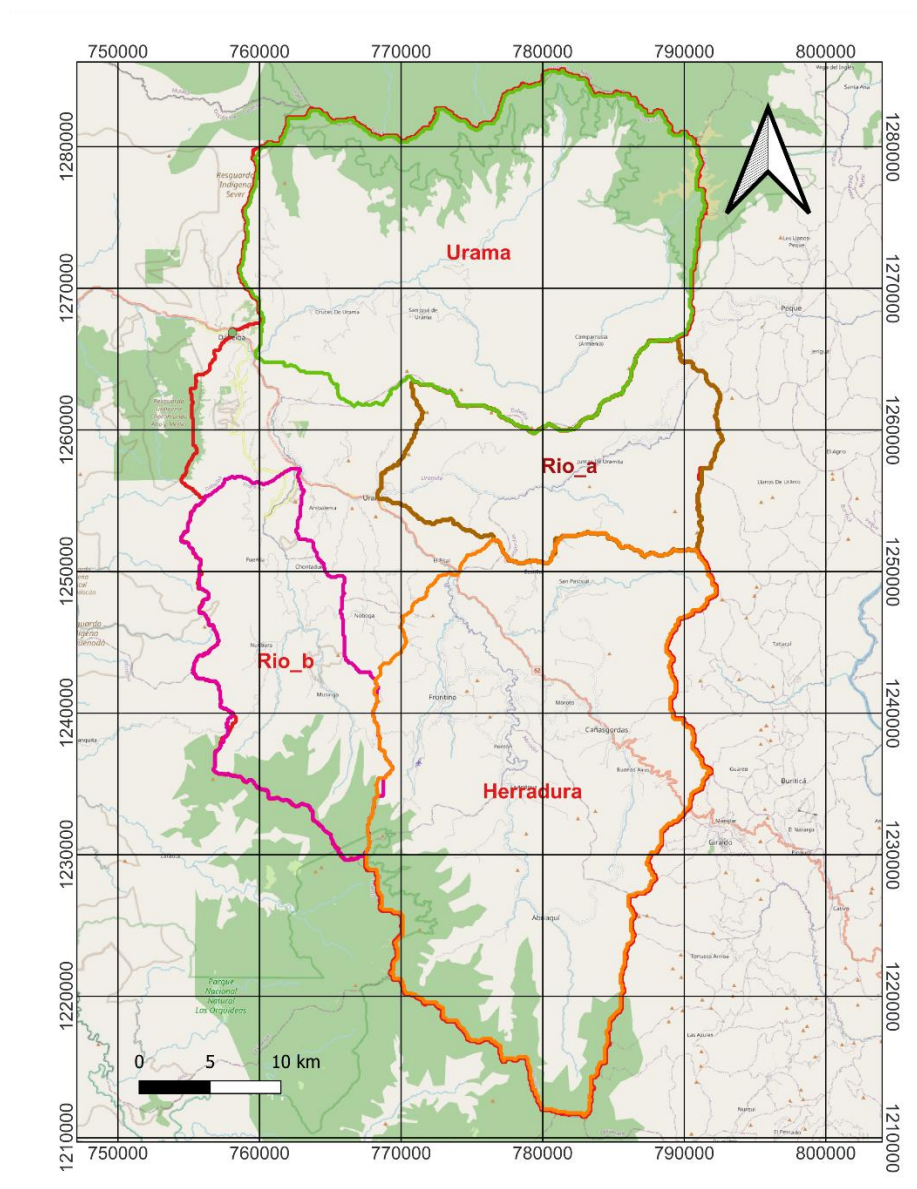
Localización de la Zona Rio Sucio.



Nota. La cuenca de estudio es la marcada con un borde rojo. Elaboración propia.

Ilustración 2

Localización de subcuencas en la cuenca agregada Rio Sucio.



Nota. Ubicación con nombre de las subcuencas dentro de la cuenca Agregada.

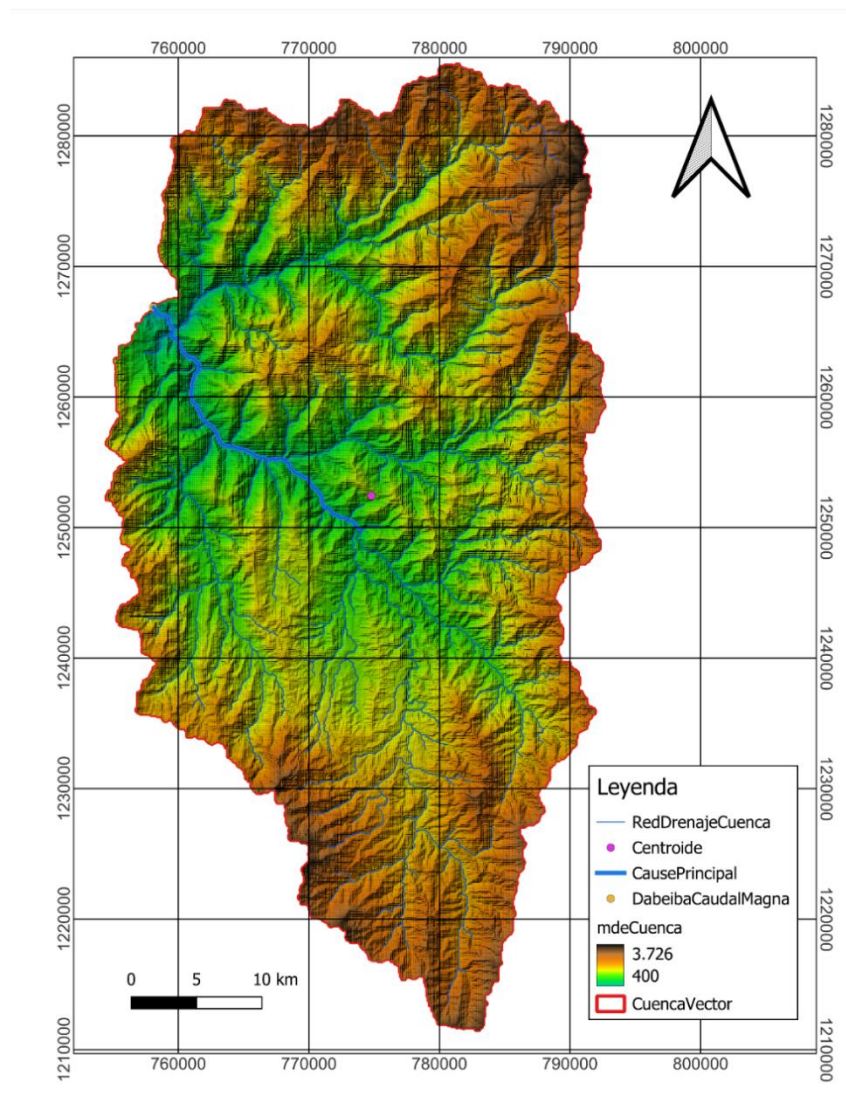
Elaboración propia.

10.2 MDE Delimitado de la cuenca

En la Ilustración 3 se presenta el Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del río Sucio. En la representación cartográfica, los tonos azulados corresponden a las áreas de menor altitud, ubicadas hacia la zona de salida de la cuenca, mientras que los tonos marrones identifican los sectores de mayor elevación. Todas las alturas están expresadas en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Ilustración 3

Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca del río Sucio.



Nota. La barra de color funciona como leyenda altimétrica de la cuenca en msnm.

Elaboración propia.

10.3 Parámetros básicos de la Cuenca Agregada

En la Tabla 3, se pueden ver los parámetros básicos de la cuenca. La caracterización morfométrica de la cuenca se realizó a partir del Modelo Digital de Elevación.

Tabla 3

Tabla de Parámetros básicos de la Cuenca Agregada.

Parámetros		Valor	Unidad
A	Área Cuenca	1966,24	km ²
P	Perímetro	244,93	km
Lc	Longitud cuenca	69,54	km
W	Ancho Cuenca	32,48	km
XCen	Coord. X del centroide	774796,14	m
YCen	Coord. Y del centroide	1252418,35	m
Lcen	Longitud al centroide	22,10	km
Zmin	Cota mínima de la cuenca	400	msnm
ZMax	Cota máxima de la cuenca	3726	msnm
Zm	Elevación media de la cuenca	1822,14	msnm
L	Longitud del cauce	28,92	km
CM	Cota máxima del cauce	804	msnm
Cm	Cota mínima del cauce	400	msnm
Hc	Desnivel asociado al cauce CM-Cm	404	msnm
S	Pendiente media del cauce principal	0,0139696	%
Orientación		Sureste-Noroeste	

Nota. La tabla está compuesta por los parámetros de una cuenca con su valor y

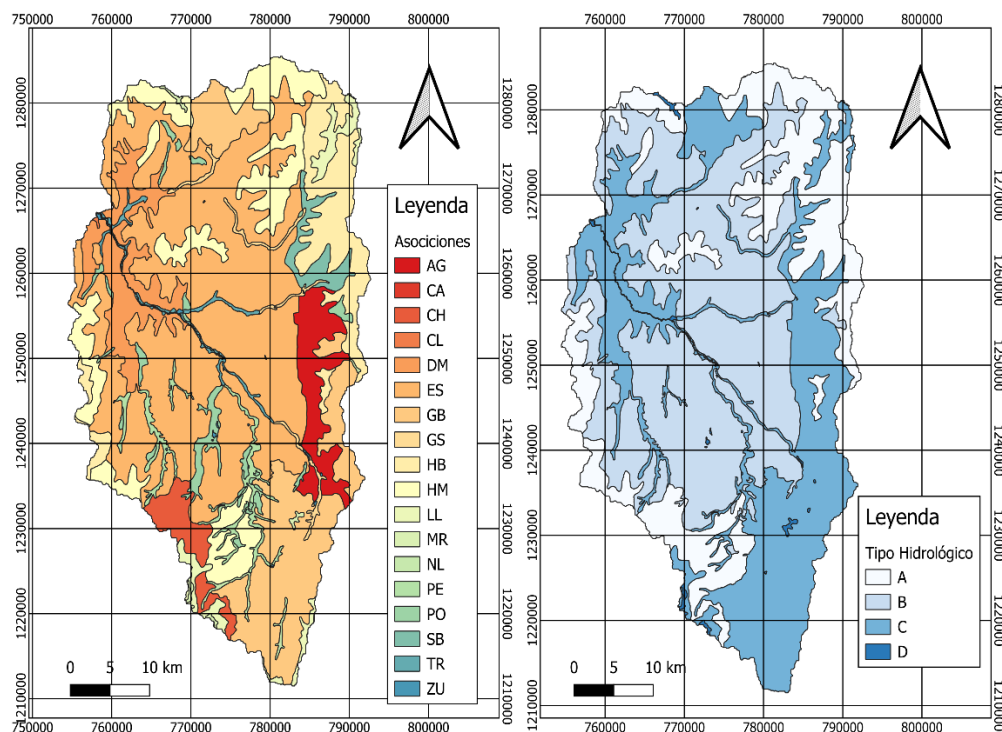
unidades. Elaboración propia.

10.4 Mapas de Asociaciones y Tipos Hidrológicos

En la Ilustración 4 se presentan dos mapas complementarios que permiten caracterizar las propiedades físicas del suelo en la cuenca de estudio.

Ilustración 4

Mapa de asociaciones de suelo y tipos hidrológicos en la cuenca Agregada.



Nota. El mapa de la izquierda muestra la distribución espacial de las asociaciones de suelo, mientras que el de la derecha corresponde a la clasificación de los tipos hidrológicos. Elaboración propia.

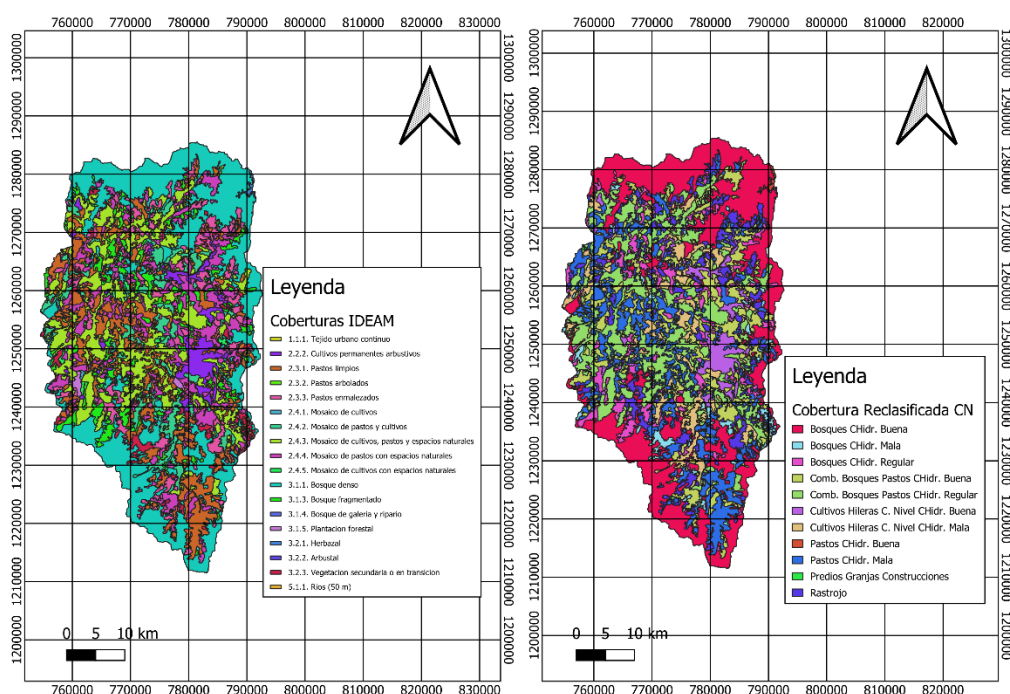
10.5 Mapa de Coberturas y Coberturas Reclasificadas

En la Ilustración 5 se presenta el resultado del proceso de reclasificación de coberturas del suelo. Esta se llevó a cabo mediante una correspondencia temática entre las clases originales del IDEAM y las categorías funcionales establecidas por el método del Número de Curva (CN). Dicha adaptación metodológica facilita la integración de la

información en modelos de análisis espacial y en la evaluación de coberturas a escala regional o nacional.

Ilustración 5

Mapas de coberturas IDEAM y coberturas reclasificadas según el CN de la cuenca agregada.



Nota. El mapa de la izquierda corresponde a la clasificación original del IDEAM, con un mayor nivel de detalle en las categorías de cobertura. El mapa de la derecha muestra las coberturas reorganizadas conforme a los criterios del CN. Elaboración propia.

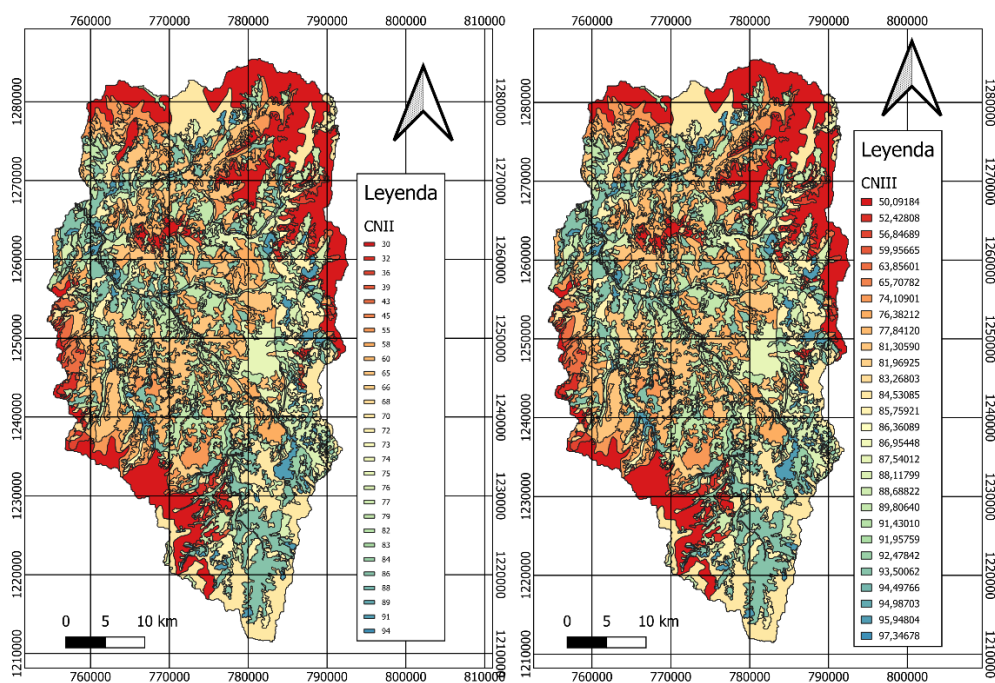
10.6 Mapas de Curva Numero

En la Ilustración 6 se presentan dos mapas comparativos del Número de Curva (CN), un parámetro hidrológico ampliamente empleado para estimar la escorrentía directa a

partir de las características de uso del suelo, la cobertura vegetal y las propiedades del suelo. El mapa de la izquierda corresponde a la distribución espacial del CNII, mientras que el de la derecha representa el CNIII, en el cual se considera un incremento en la escorrentía potencial debido a condiciones de mayor humedad antecedente.

Ilustración 6

Mapas de Curva Numero de CNII y CNIII en la cuenca agregada.



Nota. Los valores altos de CN, mostrados en colores cálidos (rojos y anaranjados), reflejan zonas con baja capacidad de infiltración y, por ende, mayor generación de escorrentía superficial, típicamente asociadas a áreas impermeables o de escasa vegetación. Por el contrario, los valores bajos, representados en tonos fríos (azules y

verdes), corresponden a terrenos con mayor capacidad de infiltración y mayor retención de humedad. Elaboración propia.

10.7 Tiempo de concentración

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la estimación del tiempo de concentración (Tc) mediante diferentes métodos empíricos e hidrológicos, cada uno con fundamentos teóricos y condiciones de aplicación específicas. Estos procedimientos consideran variables como la pendiente media del cauce, la longitud del flujo, las propiedades del suelo, la cobertura del terreno y las características geomorfológicas de la cuenca. Entre los métodos aplicados se encuentran Kirpich, Ven te Chow, Dooge, Johnstone, entre otros.

Al final de la tabla se incluyen los valores de la media y la mediana de los tiempos calculados, lo que proporciona una referencia integrada y facilita la comparación entre las distintas aproximaciones utilizadas.

Tabla 4

Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la cuenca agregada.

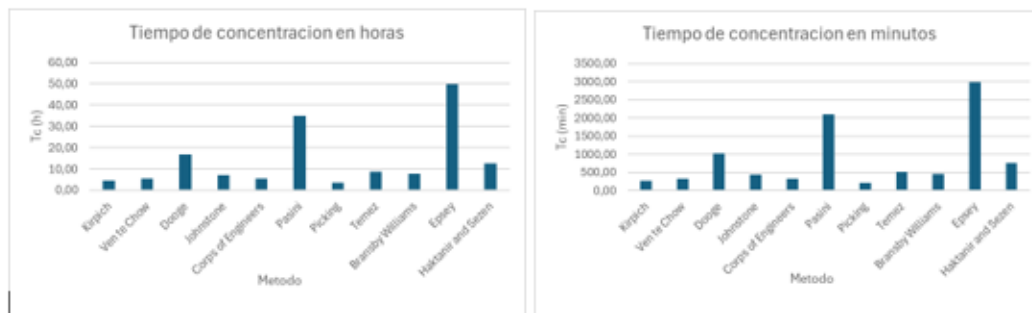
Método	Tc (h)	Tc (min)
Kirpich	4,58	274,72
Ven te Chow	5,41	324,73
Dooge	16,90	1014,27
Johnstone	7,23	433,89
Corps of Engineers	5,55	332,74
Pasini	35,01	2100,60
Picking	3,45	207,20
Temez	8,71	522,63

Bransby Williams	7,67	459,94
Epsey	49,90	2994,12
Haktanir and Sezen	12,66	759,48
Mediana	7,67	459,94
Media	14,28	856,76

Nota. La tabla resume los valores de T_c derivados de la aplicación de métodos empíricos reconocidos en la literatura técnica, lo que permite validar y contrastar los resultados obtenidos.

Gráfica 1

Tiempos de concentración horas y minutos de la cuenca agregada.



Nota. Estas dos gráficas muestran en horas y minutos los tiempos de concentración por métodos. Elaboración propia.

Tabla 5

Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca Herradura.

Metodo	T_c (h)	T_c (min)
Kirpich	4,15	249,24
Ven te Chow	4,99	299,50
Dooge	9,66	579,46

Johnstone	6,79	407,32
Corps of Engineers	5,78	346,58
Pasini	18,51	1110,42
Picking	3,18	190,51
Temez	9,07	544,37
Bransby Williams	9,33	559,70
Epsey	47,68	2860,93
Haktanir and Sezen	15,41	924,35
Mediana	9,07	544,37
Media	12,23	733,85

Nota. La tabla resume los valores de Tc derivados de la aplicación de métodos empíricos reconocidos en la literatura técnica, lo que permite validar y contrastar los resultados obtenidos.

Tabla 6

Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca Urama.

Metodo	Tc (h)	Tc (min)
Kirpich	2,22	133,12
Ven te Chow	2,96	177,83
Dooge	9,14	548,44
Johnstone	4,52	271,06
Corps of Engineers	3,15	188,76
Pasini	13,34	800,18
Picking	1,84	110,66
Temez	4,94	296,48
Bransby Williams	4,25	255,14
Epsey	35,56	2133,83
Haktanir and Sezen	7,96	477,85
Mediana	4,52	271,06

Media	8,17	490,30
--------------	------	--------

Nota. La tabla resume los valores de Tc derivados de la aplicación de métodos empíricos reconocidos en la literatura técnica, lo que permite validar y contrastar los resultados obtenidos.

Tabla 7

Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca a.

Metodo	Tc (h)	Tc (min)
Kirpich	2,72	162,93
Ven te Chow	3,51	210,35
Dooge	5,90	354,20
Johnstone	5,15	309,06
Corps of Engineers	4,54	272,63
Pasini	8,58	514,97
Picking	2,20	131,89
Temez	7,14	428,22
Bransby Williams	7,73	463,94
Epsey	39,09	2345,26
Haktanir and Sezen	14,41	864,60
Mediana	5,90	354,20
Media	9,18	550,73

Nota. La tabla resume los valores de Tc derivados de la aplicación de métodos empíricos reconocidos en la literatura técnica, lo que permite validar y contrastar los resultados obtenidos.

Tabla 8

Estimación del tiempo de concentración mediante diversos métodos hidrológicos de la subcuenca b.

Metodo	Tc (h)	Tc (min)
Kirpich	2,91	174,57
Ven te Chow	3,71	222,77
Dooge	6,56	393,37
Johnstone	5,39	323,23
Corps of Engineers	4,82	289,33
Pasini	9,72	582,95
Picking	2,33	140,01
Temez	7,57	454,44
Bransby Williams	8,15	488,82
Epsey	40,37	2422,18
Haktanir and Sezen	15,24	914,55
Mediana	6,56	393,37
Media	9,71	582,38

Nota. La tabla resume los valores de Tc derivados de la aplicación de métodos empíricos reconocidos en la literatura técnica, lo que permite validar y contrastar los resultados obtenidos.

10.8 Tiempo de rezago del HUS de Snyder y SCS Triangular

En la Tabla 9 se presentan los valores del tiempo de rezago (TLS) estimados mediante dos enfoques de hidrograma unitario sintético: el método de Snyder y el HUS triangular del SCS. Este parámetro se define como el intervalo comprendido entre el centroide del exceso de precipitación y el momento en que se alcanza el caudal máximo en el

hidrograma de escorrentía, constituyéndose en una variable clave para la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca.

Los resultados obtenidos permiten analizar la dinámica temporal del escurrimiento y evaluar la capacidad de la cuenca para responder ante diferentes eventos de precipitación.

Tabla 9

Tiempo de Rezago Estimado mediante los Métodos de Hidrograma Unitario Sintético de Snyder y SCS Triangular.

HUS	Tiempo de Rezago (h)	Tiempo de Rezago (minutos)
Snyder	7,81	468,8
SCS	4,60	275,97

Nota. La tabla muestra los valores calculados de TLS para ambos métodos, proporcionando una base comparativa para su aplicación en modelaciones hidrológicas.

Tabla 10

Tiempo de Rezago Estimado mediante el método de Hidrograma Unitario Sintético SCS Triangular para subcuencas.

HUS (SCS)	Tiempo de Rezago (h)	Tiempo de Rezago (minutos)
Herradura	5,44	326,62
Urama	2,71	162,63
Cuenca a	3,54	212,52
Cuenca b	3,93	236,02

Nota. La tabla muestra los valores calculados de TLS para las subcuencas.

10.9 Velocidad hidrodinámica

La velocidad hidrodinámica (V_k) corresponde a un parámetro fundamental en la modelación hidrológica, ya que describe la rapidez con la que el flujo se desplaza a lo largo del cauce principal de una cuenca. Este valor influye directamente en la

propagación del caudal y en la forma del hidrograma resultante, constituyéndose en una variable esencial para el cálculo del Hidrograma Unitario Instantáneo Geomorfológico (GIUH).

La expresión empírica aplicada, propuesta por Chen et al. (2021), se define como:

$$V_k = 0,8562L^{0,23}S^{0,385}$$

Al sustituir los valores de la longitud del cauce principal ($L= 28920$ m) y de la pendiente media ($S= 0,1397$), se obtiene:

$$V_k = 0,8562 \times (28920)^{0,23} (0,1397)^{0,385}$$

$$V_k = 1,76 \text{ m/s}$$

Este resultado indica que la velocidad de propagación promedio del flujo en la cuenca es de aproximadamente 1,76 m/s, lo cual es consistente con cuencas de pendiente baja a moderada y de extensión considerable. Dicho valor sugiere que el agua tarda un tiempo relativamente corto en concentrarse hacia la salida de la cuenca, aspecto clave para la estimación de tiempos de respuesta y caudales máximos durante eventos de precipitación intensa.

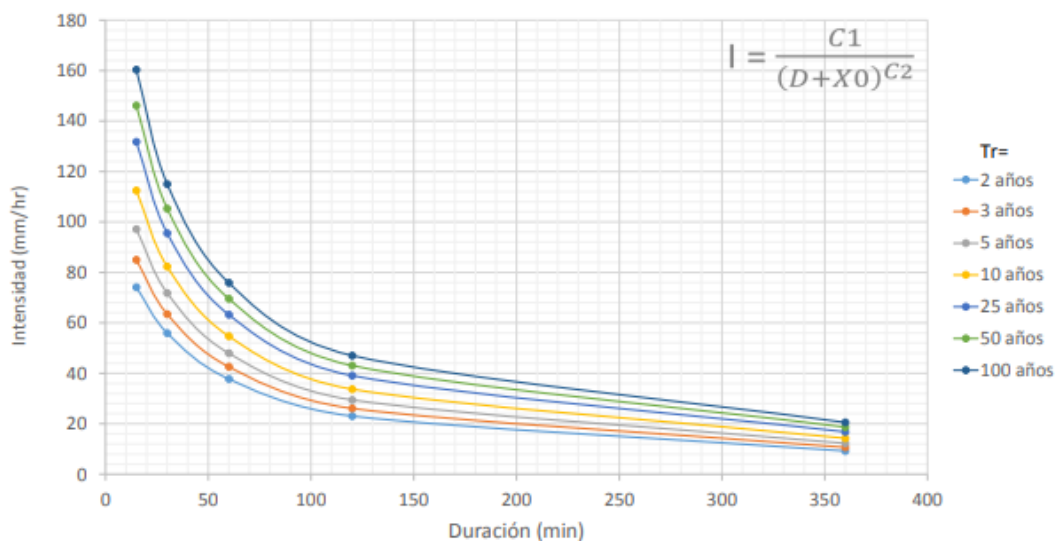
10.10 Curvas IDF

La Gráfica 2 corresponde al ajuste empírico de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) elaboradas a partir de la información suministrada por el IDEAM para la estación climatológica de Cañasgordas. Estas curvas constituyen una herramienta fundamental en la hidrología aplicada, ya que permiten estimar la intensidad de precipitaciones extremas en función de su duración y de la probabilidad de ocurrencia asociada a diferentes tiempos de retorno (Tr).

Las curvas evidencian una tendencia decreciente de la intensidad conforme aumenta la duración del evento, lo cual refleja la naturaleza de los procesos de precipitación. Del mismo modo, se observa que, para un mismo intervalo de duración, la intensidad es mayor a medida que crece el tiempo de retorno, indicando la severidad de eventos menos frecuentes, pero más extremos. La ecuación ajustada ofrece la posibilidad de estimar con precisión la intensidad sin depender únicamente de tablas discretas.

Gráfica 2

Curvas IDF intensidad–duración para la estación climatológica de Cañasgordas.



Nota. La gráfica presenta las curvas ajustadas de intensidad frente a la duración del evento, diferenciadas por los valores de tiempo de retorno (Tr).

Complementariamente, la Tabla 11 recopila los parámetros empíricos (C1, X0 y C2) de la fórmula general de estimación de intensidad para la estación de Cañasgordas. Estos coeficientes fueron obtenidos a partir del ajuste de registros históricos de precipitación y

permiten calcular la intensidad I (mm/h) en función de la duración del evento y del tiempo de retorno correspondiente.

Tabla 11

Parámetros de la ecuación IDF para la estación Cañasgordas según el tiempo de retorno (Tr).

TR (años)	C1	X0	C2
2	2765,827	28,954	0,957
3	2515,367	25,038	0,918
5	2388,599	21,965	0,887
10	2340,487	19,25	0,859
25	2367,751	16,891	0,834
50	2422,206	15,615	0,821
100	2493,519	14,61	0,81

Nota. Los coeficientes C1, X0 y C2 provienen del ajuste estadístico de registros históricos de precipitación realizados por el IDEAM.

La Tabla 12 muestra la comparación entre la intensidad de la lluvia (expresada en mm/h) y la profundidad acumulada (en mm) para una duración constante de 459,94 minutos, considerando distintos tiempos de retorno (Tr). Esta información es de gran relevancia en el diseño hidrológico, pues permite caracterizar la magnitud potencial de eventos extremos y comprender cómo varían sus efectos en función de la frecuencia con la que ocurren.

Tabla 12

Relación entre la intensidad y la profundidad de la lluvia ($D = 459,94$ min) para distintos tiempos de retorno (Tr).

Tr (años)	Intensidad (mm/h)	Profundidad (mm)
2	7,38	56,60

3	861	66,02
5	9,96	76,37
10	11,65	89,40
25	13,82	105,97
50	15,35	117,71
100	16,94	129,90

Nota. Los resultados evidencian que tanto la intensidad como la profundidad acumulada se incrementan con mayores tiempos de retorno, reflejando la mayor severidad de los eventos menos frecuentes. Sin embargo, el aumento de la profundidad es más pronunciado, ya que representa la acumulación total de agua precipitada, mientras que la intensidad corresponde a un promedio horario de la tasa de lluvia durante la duración del evento.

La siguiente tabla presenta los valores de intensidad de lluvia (mm/h) y profundidad acumulada (mm) para distintas cuencas de estudio, incluyendo la cuenca agregada, la cuenca Herradura, la cuenca Urama y dos subcuencas adicionales (a y b). Los resultados fueron estimados en función de diferentes tiempos de retorno (Tr), lo que permite evaluar la variabilidad espacial y la magnitud de los eventos de precipitación extrema en el área de análisis.

Tabla 13

Intensidad y profundidad de lluvia según el tiempo de retorno (Tr) en las cuencas analizadas.

Intensidad (mm/h)					
Tr (años)	Cuenca agregada	Cuenca Herradura	Cuenca Urama	Cuenca a	Cuenca b
2	7,38	6,34	11,78	9,32	8,49
3	861	7,43	13,55	10,79	9,86
5	9,96	8,63	15,49	12,41	11,37

10	11,65	10,14	17,94	14,45	13,26
25	13,82	12,07	21,05	17,04	15,67
50	15,35	13,43	23,26	18,88	17,38
100	16,94	14,84	25,56	20,78	19,15
Profundidad (mm)					
Tr (años)	Cuenca agregada	Cuenca Herradura	Cuenca Urama	Cuenca a	Cuenca b
2	56,60	57,51	53,22	55,03	55,68
3	66,02	67,43	61,20	63,72	64,66
5	76,37	78,33	69,97	73,26	74,52
10	89,40	92,03	81,03	85,28	86,94
25	105,97	109,46	95,10	100,57	102,73
50	117,71	121,81	105,10	111,43	113,93
100	129,91	134,64	115,47	122,69	125,56

Nota. Los resultados muestran que, a medida que aumenta el tiempo de retorno, se incrementan tanto la intensidad como la profundidad de la lluvia en todas las cuencas. Sin embargo, la magnitud de los valores varía entre cuencas, lo que refleja diferencias en las condiciones climáticas y geográficas locales.

- Cuenca Urama presenta consistentemente las mayores intensidades de precipitación, alcanzando hasta 25,56 mm/h para $Tr = 100$ años, lo que sugiere una respuesta más rápida y concentrada frente a eventos extremos.
- Cuenca Herradura y las subcuencas a y b muestran intensidades intermedias, con valores menores que Urama, pero con una acumulación de lluvia (profundidad) muy cercana a la cuenca agregada. Esto indica una distribución más uniforme de la lluvia.
- La cuenca agregada refleja un comportamiento promedio de las subcuencas, con intensidades moderadas y profundidades relativamente altas, lo que la

convierte en un punto de referencia para comparar el comportamiento espacial de la precipitación.

- En cuanto a la profundidad acumulada, la cuenca Herradura tiende a registrar los valores más altos (ej. 134,64 mm para $Tr = 100$ años), superando incluso a la cuenca agregada. Esto implica que, aunque la intensidad no es la mayor, la duración o persistencia de la lluvia es más significativa en esta zona.

En síntesis, Urama concentra las lluvias más intensas, mientras que Herradura recibe los mayores volúmenes acumulados. Estas diferencias deben considerarse al diseñar estrategias de manejo y mitigación de riesgos hidrológicos en la región.

10.11 Factor de Reducción de Área (FRA)

El Factor de Reducción de Área (FRA), denotado con el símbolo φ , corresponde a un coeficiente utilizado para corregir la precipitación puntual cuando esta se extrapola a áreas de gran extensión. Su propósito es reconocer que, a medida que aumenta la superficie de captación, la intensidad promedio de la lluvia disminuye, evitando así sobreestimar el volumen precipitado en estudios hidrológicos aplicados a cuencas de gran tamaño.

La expresión empírica aplicada es:

$$\varphi = \max \left(0,25.1 - \frac{0,048 * 1966,24^{0,36-0,01*ln*1966,24}}{7,67^{0,35}} \right)$$

Al sustituir los valores del área (1966,24 km²) y la duración del evento (7,67 h), se obtiene:

$$\varphi = 0,796964813 \text{ (Adimensional)}$$

Este resultado significa que cerca del 79,70 % de la precipitación puntual puede considerarse representativa para toda la cuenca, mientras que el 20,30 % restante corresponde al ajuste por la variabilidad espacial de la lluvia.

La Tabla 14 presenta un análisis comparativo de la profundidad de la lluvia (mm) para distintos tiempos de retorno (Tr), manteniendo una duración constante de 459,94 minutos. En este caso, se contrastan los valores obtenidos sin aplicar el Factor de Reducción de Área (FRA) frente a aquellos ajustados con dicho factor. Este procedimiento resulta clave para cuantificar cómo la aplicación del FRA modifica la estimación del volumen de lluvia en cuencas de gran extensión.

Tabla 14

Comparación de la profundidad de lluvia para diferentes tiempos de retorno (Tr), con y sin la aplicación del FRA.

Tr (años)	Sin FRA (mm)	Con FRA (mm)
2	56,60	50,80
3	66,02	59,25
5	76,37	68,54
10	89,40	80,24
25	105,96	95,11
50	117,71	105,65
100	129,90	116,59

Nota. La aplicación del FRA reduce de manera consistente los valores de precipitación acumulada, siendo más notoria esta disminución en los eventos de mayor periodo de retorno. Esto confirma que el FRA corrige la tendencia a sobrestimar la lluvia acumulada en áreas extensas, dado que los máximos de precipitación suelen presentarse de forma localizada.

La Tabla 15 presenta la comparación de la profundidad de la lluvia (mm) para diferentes tiempos de retorno (Tr), considerando la aplicación del Factor de Reducción de Área (FRA). Se analizan tanto la cuenca agregada como las subcuencas Herradura, Urama, A y B, lo que permite evaluar cómo varía la magnitud de la precipitación acumulada en función de la escala espacial y la subdivisión hidrológica. Este análisis es clave para identificar diferencias en la estimación del volumen de agua disponible en cada unidad de estudio.

Tabla 15

Profundidad de la lluvia (mm) para diferentes tiempos de retorno (Tr) en la cuenca agregada y subcuencas con FRA aplicado.

profundidad de la lluvia (mm) para diferentes Tr (años) con FRA					
Tr (años)	Cuenca agregada	Cuenca Herradura	Cuenca Urama	Cuenca a	Cuenca b
2	45,11	48,80	43,19	47,04	47,42
3	52,62	57,21	49,66	54,46	55,06
5	60,87	66,46	56,77	62,62	63,46
10	71,25	78,09	65,74	72,89	74,03
25	84,45	92,88	77,16	85,96	87,48
50	93,81	103,36	85,28	95,24	97,03
100	103,53	114,24	93,69	104,86	106,93

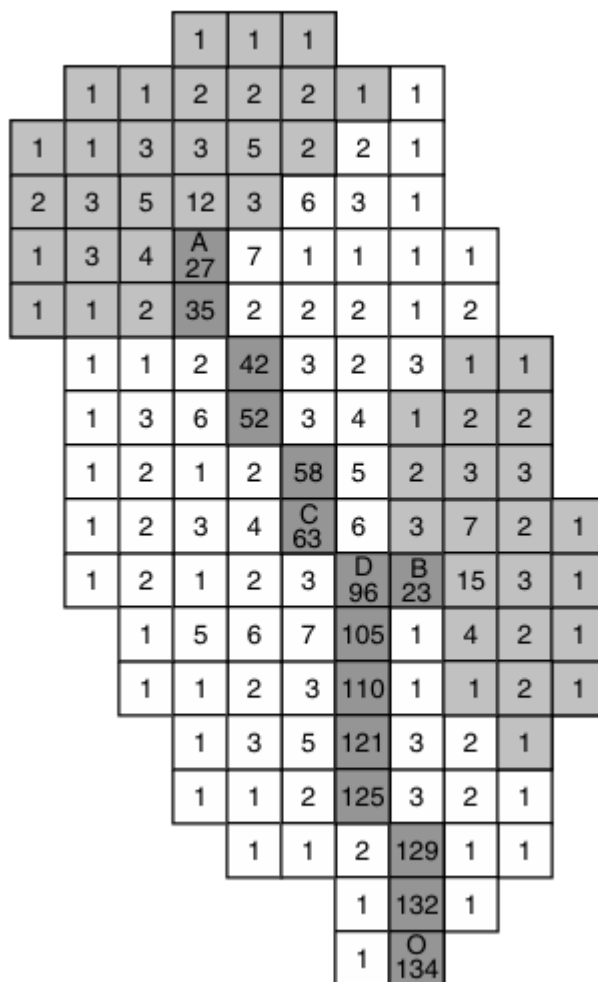
Nota. Los resultados muestran que la cuenca Herradura y las subcuencas tienden a registrar profundidades de lluvia mayores que la cuenca agregada, especialmente en eventos con altos periodos de retorno. Esto refleja cómo la semidistrución espacial permite capturar mejor la variabilidad de la precipitación dentro del sistema, lo cual es relevante para la modelación hidrológica y la gestión del recurso hídrico.

10.12 Umbral de Área de Formación de Canal (S) y su Relación con el Número de Fuentes (N)

El umbral de área de formación de canal (S_1) constituye un criterio geomorfológico fundamental en la modelación hidrológica distribuida, ya que permite identificar el punto de transición entre la red de drenaje difusa y el cauce principal consolidado. Según Moussa (2003), el análisis del área de acumulación de flujo permite determinar el valor crítico del área (S_1) a partir del cual se forma un canal bien definido.

Ilustración 7

Representación esquemática de la cuenca y determinación del umbral de formación de canal (S_i)



Nota. Se ilustra este concepto a través de una cuenca esquemática donde se visualizan las zonas de acumulación (en gris) y los canales formados (en negro). Cada celda representa un píxel del modelo digital de elevación, y los valores indican la cantidad de contribuciones acumuladas aguas arriba. Obtenido de Moussa (2003).

Esta representación permite observar cómo el sistema hidrológico pasa de un comportamiento ramificado y fractal, caracterizado por múltiples fuentes (N) con áreas pequeñas, a un sistema organizado y concentrado, donde predomina un único cauce principal conforme el área de contribución aumenta.

Matemáticamente, esta relación se expresa mediante una ley potencial de tipo:

$$N(S) = a(S)^{-b}$$

Donde:

- $N(S)$ = número de fuentes o unidades de drenaje activas,
- S = área de contribución,
- a y b = coeficientes empíricos que dependen de la morfología y la jerarquía fluvial de la cuenca.

El punto de inflexión que separa ambas zonas define el umbral de área de formación de canal (S_1), parámetro clave para establecer la escala espacial de subdivisión de cuencas en modelos semidistribuidos como HEC-HMS. En el presente estudio, este concepto proporciona la base teórica para la división de la cuenca del río Sucio en las subcuencas Herradura y Urama, asegurando una representación hidrológica coherente con la estructura geomorfológica observada.

10.13 Justificación de la Estructura de Subcuencas del Río Sucio

La definición de la estructura de subcuencas dentro del modelo hidrológico del río Sucio se fundamenta en el criterio geomorfológico propuesto por Moussa (2003), basado en el umbral de área de formación de canal (S_1). Este umbral permite identificar el punto de transición donde la red de drenaje pasa de un régimen disperso, dominado por

múltiples fuentes de escorrentía, a un sistema organizado en el que el flujo se concentra en cauces bien definidos.

En el contexto de la modelación con HEC-HMS, la aplicación del criterio S_1 se traduce en la necesidad de representar de forma explícita aquellas unidades espaciales (subcuencas) que corresponden a sectores hidrológicamente diferenciados dentro del sistema. Según Moussa (2003), este umbral se alcanza cuando el número de fuentes (N) tiende a dos (2), es decir, cuando el sistema presenta dos aportes principales que alimentan el cauce central. En esta condición, la cuenca alcanza una organización hidrológica estable, y las subdivisiones resultantes reflejan adecuadamente la jerarquía natural del drenaje.

Siguiendo este razonamiento, la cuenca del río Sucio (Urabá, Antioquia) fue subdividida en dos unidades representativas: la subcuenca Herradura y la subcuenca Urama, las cuales responden a esta condición teórica. La subcuenca Urama agrupa los aportes del sector norte, caracterizado por una topografía montañosa y una respuesta rápida a la precipitación; mientras que la subcuenca Herradura concentra los flujos del sector sur, donde las pendientes son más suaves y la respuesta hidrológica es más atenuada.

Esta estructura respeta la escala definida por el umbral S_1 , garantizando que cada subcuenca represente una unidad hidrológicamente coherente y que la confluencia de ambas reproduzca el punto de transición geomorfológica identificado por Moussa (2003). De este modo, la configuración del modelo HEC-HMS no es arbitraria, sino que se

encuentra sustentada en un criterio hidrológico objetivo y reproducible, que asegura la validez técnica del proceso de discretización espacial.

En consecuencia, la subdivisión del río Sucio en las subcuencas Herradura y Urama constituye una decisión metodológica justificada tanto desde la teoría hidrológica como desde la perspectiva geomorfológica, fortaleciendo la representatividad del modelo y la confiabilidad de los resultados en la estimación de caudales máximos y tiempos al pico.

10.14 Método de Muskingum-Cunge

El método de Muskingum-Cunge fue implementado en las subcuencas semidistribuidas para representar el tránsito de caudales a lo largo de los tramos fluviales. Este procedimiento se fundamenta en la combinación de caudal de entrada, pendiente media y geometría hidráulica, lo cual permite capturar de manera realista la propagación y atenuación de la onda de crecida.

La formulación requiere dos parámetros fundamentales:

- **K** (tiempo de almacenamiento): depende de la longitud del cauce, la pendiente hidráulica y la velocidad media del flujo.
- **X** (coeficiente de ponderación): representa el peso relativo entre las condiciones de entrada y salida en el tramo fluvial.

En este caso, se adoptó un valor de $X=0,3$, el cual asegura un balance adecuado entre la estabilidad numérica y la representación física de los procesos de propagación. Este valor es consistente con la literatura técnica y con estudios aplicados en cuencas de características similares.

Tabla 16

Valores del Parámetro K estimados para las subcuencas semidistribuidas.

Subcuencas	k
Cuenca Herradura	0,86
Cuenca Urama	0,24
Cuenca a	0,63
Cuenca b	1,02

Nota. El parámetro K corresponde al tiempo de almacenamiento en el modelo de Muskingum-Cunge. Los valores varían en función de la longitud del cauce, la pendiente media y la geometría hidráulica de cada subcuenca, reflejando diferencias en el retardo y la atenuación de los hidrogramas de salida.

10.15 Modelo en el entorno del software HEC-HMS

La figura muestra la delimitación hidrológica de la cuenca del río Sucio, ubicada en la región de Urabá, Antioquia, obtenida mediante el procesamiento del Modelo Digital de Elevación (MDE) en el entorno del software HEC-HMS, apoyado por herramientas de SIG (QGIS y SAGA GIS). La representación se estructura en tres unidades hidrográficas principales: Cuenca Urama (sector norte, color rojo), Cuenca A (zona central, color amarillo), Cuenca B (zona central, color amarillo) y Cuenca La Herradura (sector sur, color azul).

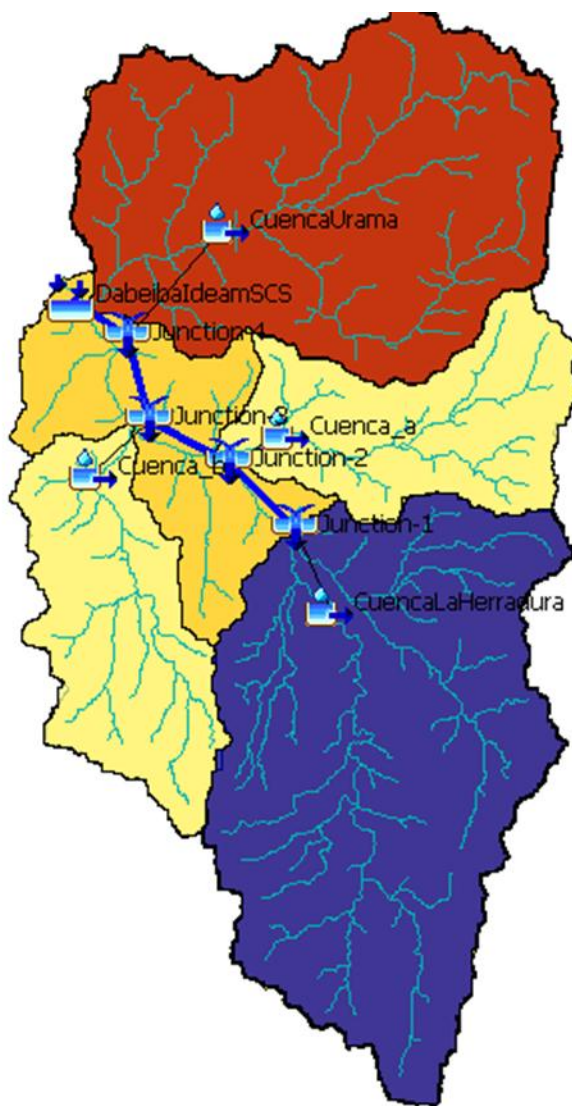
El modelo identifica los principales puntos de confluencia (Junctions) y el punto de control hidrológico correspondiente a la estación Dabeiba IDEAM-SCS, definido como cierre de la cuenca. Esta subdivisión responde al enfoque semidistribuido adoptado en la investigación, permitiendo representar la variabilidad espacial de la precipitación y del

escurrimiento superficial, así como el análisis diferenciado del comportamiento hidrológico de cada subcuenca.

Cada color delimita un área de contribución específica al sistema fluvial del río Sucio, cuyas redes de drenaje internas fueron derivadas automáticamente del MDE a partir de los parámetros de dirección y acumulación de flujo. Esta estructura espacial sirvió de base para la configuración del modelo hidrológico en HEC-HMS, en el cual se calibraron los parámetros de transformación lluvia–escorrentía y propagación de caudales mediante el método Muskingum-Cunge.

Ilustración 8

Delimitación de la cuenca del río Sucio y subdivisión en subcuencas representativas modelo HEC-HMS.



Nota. La delimitación y subdivisión de la cuenca del río Sucio se realizó bajo el sistema de referencia WGS 84 / UTM Zona 18N (EPSG:32618). Los límites, red de drenaje y puntos de control fueron verificados con cartografía del IGAC y registros hidrológicos del IDEAM (2025), garantizando la consistencia topológica y la precisión

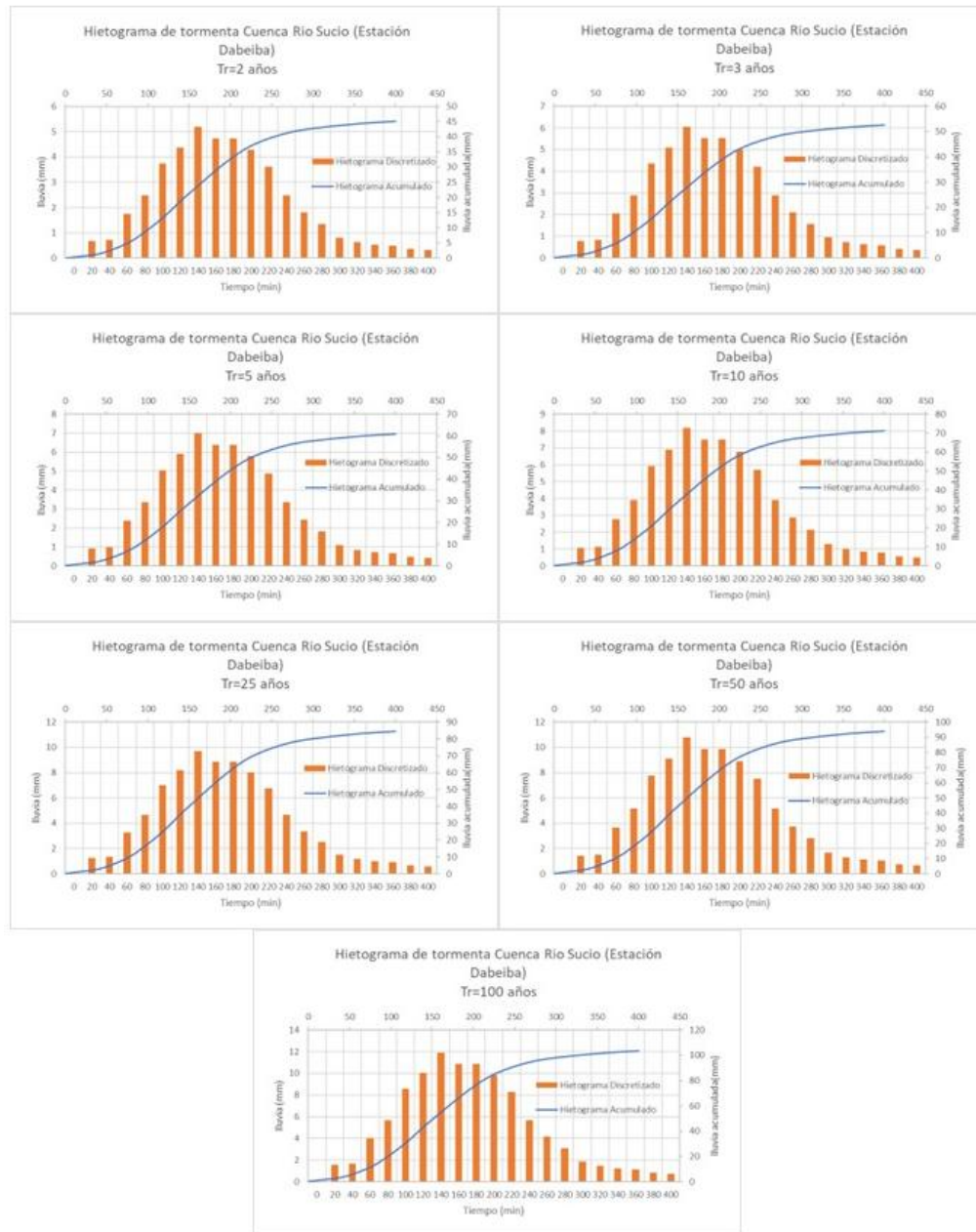
geométrica del modelo espacial utilizado en las simulaciones hidrológicas. Elaboración propia.

10.16 Hietograma de tormenta

La Gráfica 3 muestra los hietogramas sintéticos de tormenta generados para distintos periodos de retorno ($T = 2, 3, 5, 10, 25, 50$ y 100 años) en la cuenca del río Sucio, tomando como referencia la estación climatológica de Dabeiba. Estos hietogramas fueron contruidos a partir del método de Huff, el cual permite caracterizar la distribución temporal de la precipitación en eventos extremos. En la representación gráfica, las barras naranjas corresponden a la intensidad de precipitación (mm/h) en función del tiempo, mientras que la línea azul refleja la precipitación acumulada (mm). Esta información resulta esencial para el diseño hidráulico y la evaluación del riesgo de inundaciones, al evidenciar cómo se concentra la lluvia durante el desarrollo de cada tormenta.

Gráfica 3

Hietogramas de tormenta para diferentes periodos de retorno.



Nota. Se presentan los hietogramas de precipitación total (línea azul) y precipitación efectiva (barras naranjas) para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años en la cuenca del río Sucio. Elaboración propia.

10.17 Caudal Pico HUS de SCS triangular y Snyder

El caudal pico corresponde al valor máximo del caudal generado en respuesta a un evento de precipitación. Como se observa, este parámetro aumenta de manera progresiva a medida que se incrementa el período de retorno (Tr), lo que refleja la mayor severidad de los eventos extremos. En términos metodológicos, el método del SCS tiende a estimar valores de caudal más elevados, debido a su conceptualización triangular que concentra y acentúa el pico del hidrograma. Por su parte, el método de Snyder ofrece resultados más dependientes de las condiciones morfométricas de la cuenca, lo que lo hace más sensible a su configuración física.

Tabla 17

Caudal pico estimado mediante los métodos de Snyder y SCS para distintos periodos de retorno.

Tr (años)	Q Pico Snyder (m ³ /s)	Q Pico SCS (m ³ /s)
2	100,0	142,0
3	199,1	281,7
5	339,3	479,1
10	555,6	783,4
25	885,1	1243,5
50	1149,1	1614,9
100	1445,7	2031,7

Nota. La tabla presenta los valores de caudal pico (Qp) obtenidos con los métodos de hidrograma unitario sintético de Snyder y SCS Triangular, en función de diferentes periodos de retorno. Elaboración propia.

En la Tabla 18 se aprecia que los valores de caudal pico obtenidos mediante el método del SCS Triangular son sistemáticamente superiores a los calculados con el método de Snyder. Esta diferencia se hace más evidente a medida que aumenta el período de retorno (Tr).

- Para $Tr = 2$ años, la diferencia entre ambos métodos es de aproximadamente 41,7 %, mientras que para $Tr = 100$ años alcanza alrededor de 40,5 %.
- En términos absolutos, la brecha entre los dos métodos crece significativamente con el aumento del período de retorno: pasa de 71,9 m³/s ($Tr = 2$ años) a 758,7 m³/s ($Tr = 100$ años).
- Esto refleja que, aunque ambos métodos siguen la misma tendencia creciente, el SCS enfatiza más el caudal máximo, siendo más conservador y, por tanto, recomendable en escenarios de gestión del riesgo hídrico o diseño de obras hidráulicas críticas.

En contraste, el método de Snyder, al estar fuertemente ligado a las características geomorfológicas de la cuenca, tiende a dar valores más moderados, lo que puede ser útil en análisis comparativos o cuando se busca un enfoque menos restrictivo.

La siguiente tabla muestra los valores de caudal pico (Q pico) obtenidos a partir del método del SCS Triangular para distintos periodos de retorno (Tr). Se diferencian los resultados entre la cuenca agregada y la cuenca semidistribuida, lo que permite evaluar el efecto de la subdivisión espacial en la estimación hidrológica.

Tabla 18

Comparación del Caudal Pico Estimado mediante el Método SCS en la Cuenca Agregada y semidistribuida.

Q Pico SCS (m³/s)		
Tr (años)	Cuenca agregada	Cuenca semidistribuida
2	142,0	129,8
3	281,7	218,9
5	479,1	338,4
10	783,4	517,0
25	1243,5	783,3
50	1614,9	996,2
100	2031,7	1237,1

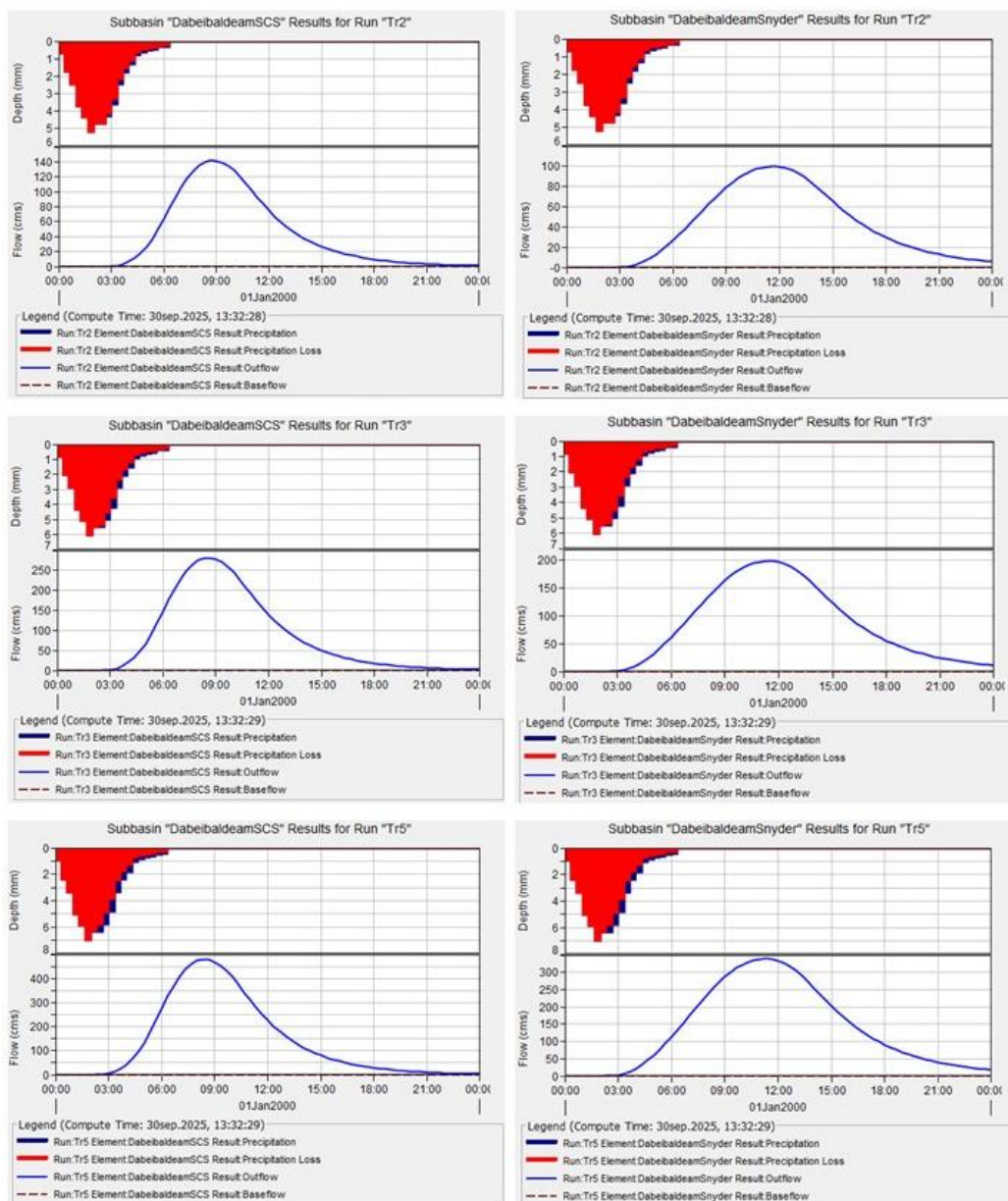
Nota. Se observa que la cuenca agregada arroja valores de caudal pico más altos en todos los periodos de retorno, mientras que la semidistribución en subcuencas reduce significativamente los picos de caudal. Esto evidencia que la representación espacial de la cuenca influye en la estimación de la respuesta hidrológica, siendo la semidistribucion un enfoque más realista al considerar la variabilidad interna del sistema.

10.18 Hidrogramas simulados con Metodos SCS y Snyder con periodos de retorno

En la cuenca del río Sucio se realizaron los cálculos hidrológicos para distintos periodos de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años), empleando un valor de escorrentía correspondiente a CN = 64,61. Para efectos prácticos de la modelación en el software HEC-HMS, se adoptó un tiempo de concentración de 400 minutos, lo que permitió ajustar los parámetros y garantizar la ejecución de las simulaciones.

Gráfica 4

Comparación de Hidrogramas Simulados con Métodos SCS y Snyder para Periodos de Retorno de 2, 3 y 5 años.

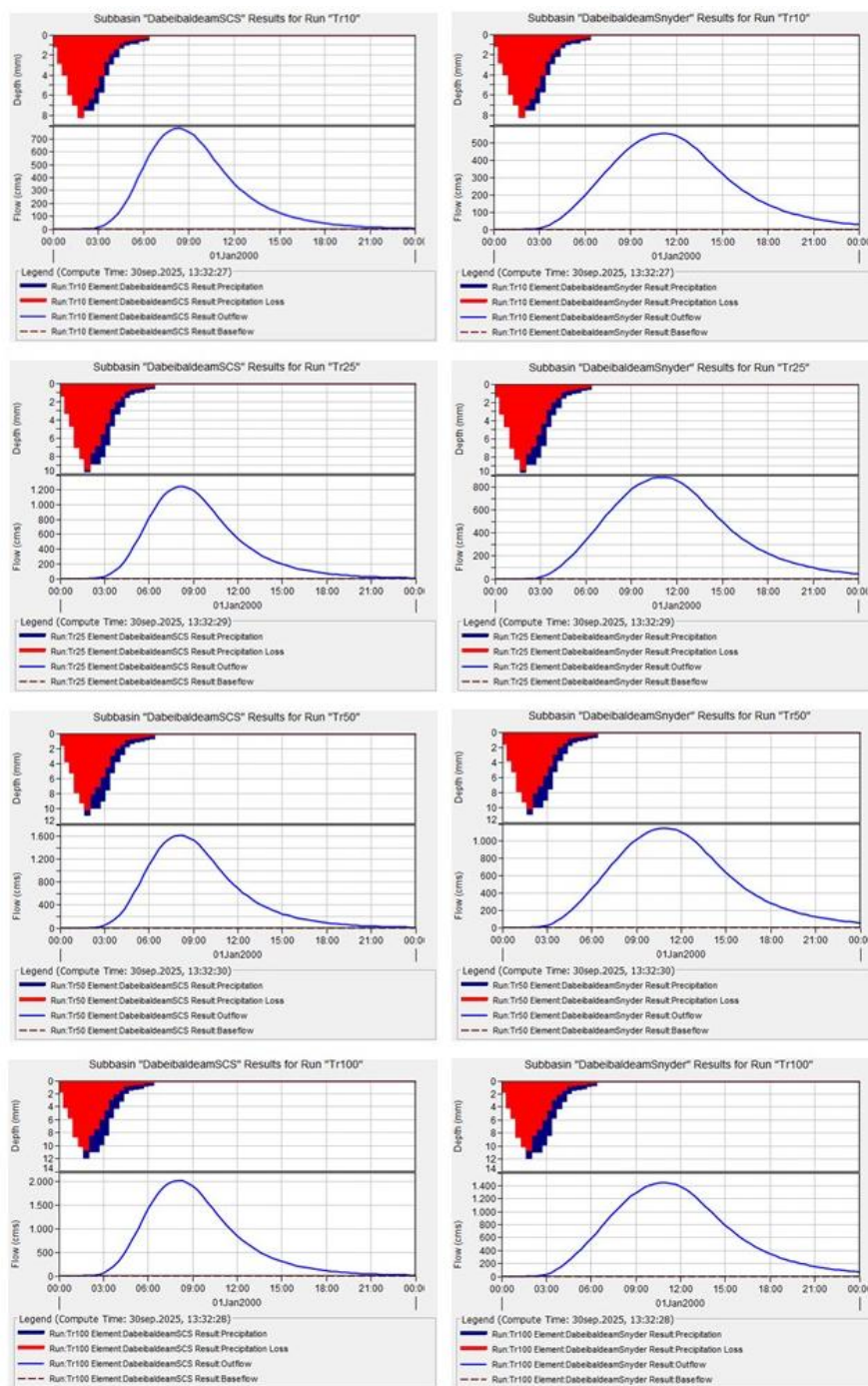


Nota. Se presentan los hietogramas de lluvia efectiva y los hidrogramas generados mediante los métodos SCS (izquierda) y Snyder (derecha) para eventos de 2, 3 y 5 años

de periodo de retorno. Los resultados corresponden a la subcuenca DabeibaIdeam e incluyen la evolución temporal de la precipitación, las pérdidas por infiltración y el caudal de salida. Elaboración propia.

Gráfica 5

Comparación de Hidrogramas Simulados con Métodos SCS y Snyder para Periodos de Retorno de 10, 25, 50 y 100 años.



Nota. Se presentan los hietogramas de lluvia efectiva y los hidrogramas generados mediante los métodos SCS (izquierda) y Snyder (derecha) para eventos de 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno. Los resultados corresponden a la subcuenca DabeibaIdeam e incluyen la evolución temporal de la precipitación, las pérdidas por infiltración y el caudal de salida. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas en la forma y magnitud de los hidrogramas generados por los métodos SCS y Snyder. El método SCS tiende a producir hidrogramas con picos más pronunciados y tiempos de respuesta más rápidos, lo que implica una mayor sensibilidad frente a eventos de lluvia intensa. Esto se debe a su conceptualización triangular, que concentra el caudal en intervalos más cortos.

Por otro lado, el método de Snyder presenta hidrogramas más suavizados y distribuidos en el tiempo, lo que refleja una respuesta hidrológica más atenuada. Este comportamiento está directamente relacionado con la dependencia del método de parámetros geomorfológicos de la cuenca, como la pendiente y la longitud de los cauces principales.

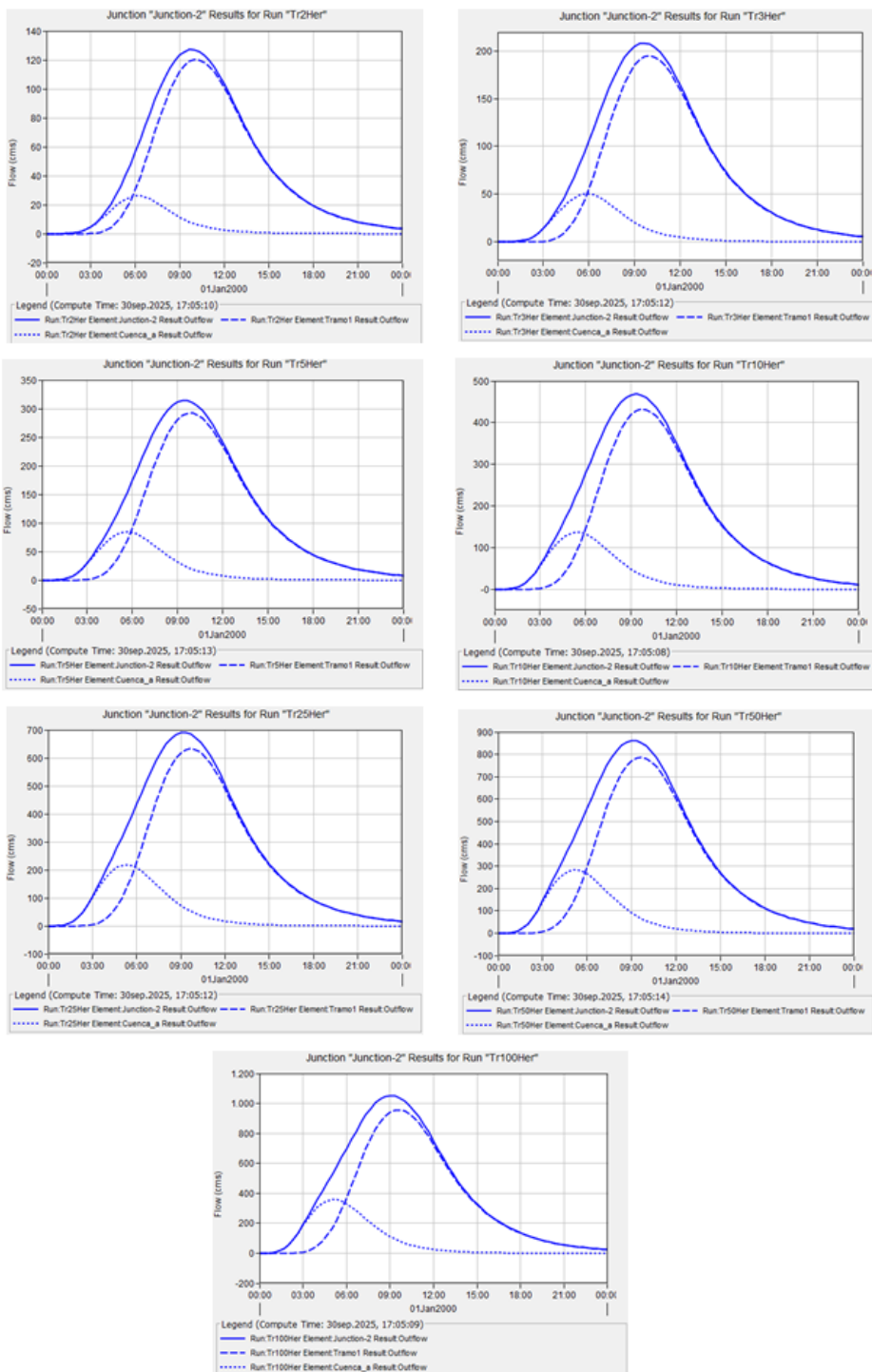
En términos de caudales pico, el método SCS genera valores superiores a los del Snyder, especialmente en periodos de retorno más altos, lo que sugiere un enfoque conservador para el diseño hidráulico y la gestión de riesgos. No obstante, la aplicación conjunta de ambos métodos ofrece una visión complementaria que contribuye a una mejor representación de la dinámica hidrológica de la cuenca del río Sucio.

10.19 Tránsito y Atenuación de Hidrogramas

El análisis del tránsito de hidrogramas constituye una etapa fundamental en la modelación hidrológica, ya que permite evaluar cómo se propaga y transforma la onda de crecida a lo largo del cauce de una cuenca. En la Grafica 6 se ilustran los resultados obtenidos para la subcuenca La Herradura y Cuenca a en el punto de confluencia “Junction-2”, donde se aprecia claramente el fenómeno de atenuación del hidrograma a medida que el flujo avanza aguas abajo.

Gráfica 6

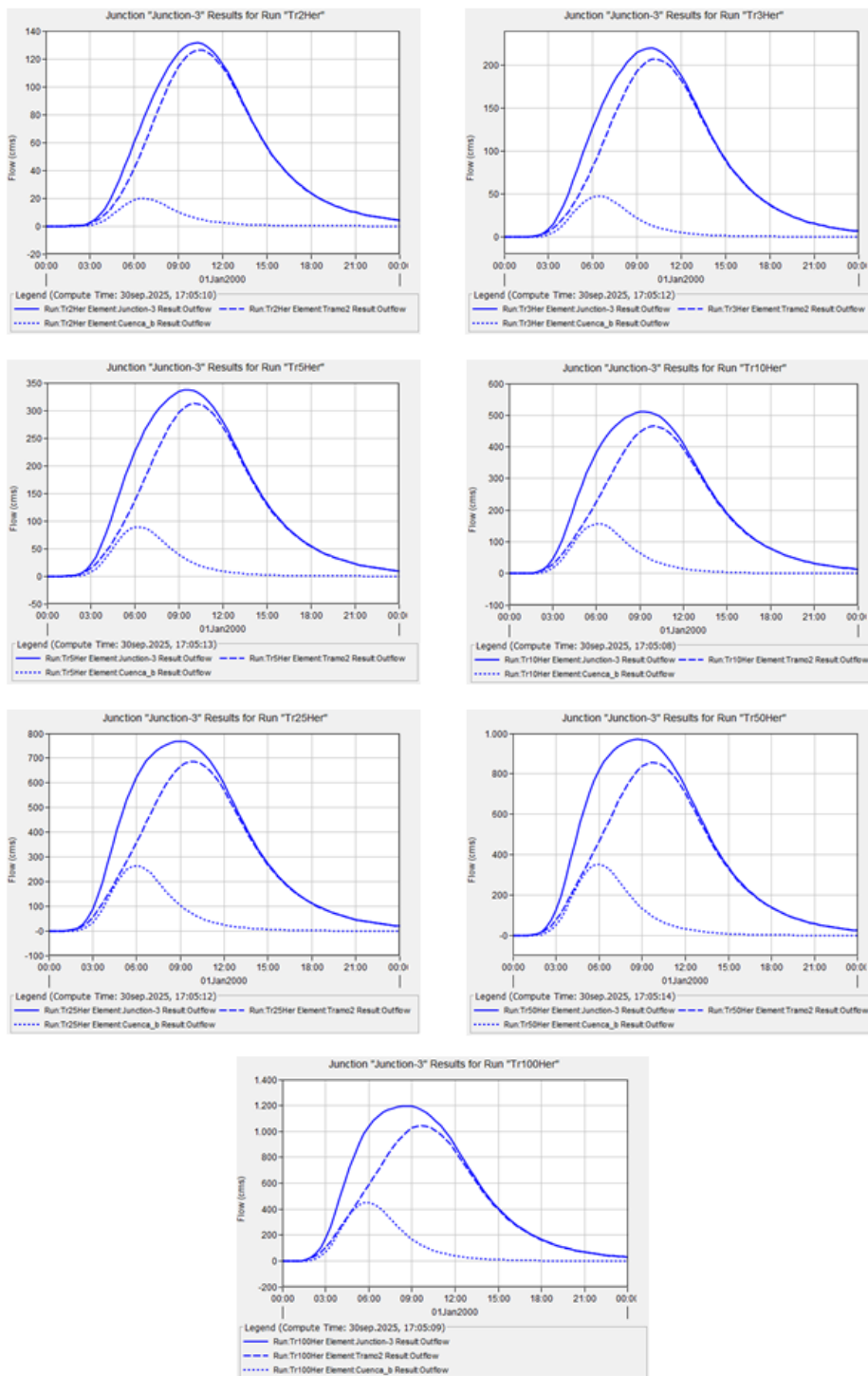
Tránsito y Atenuación de Hidrogramas en el Punto de Confluencia “Junction-2”



Nota: Comparación de los hidrogramas simulados en el punto de control “Junction-2” para diferentes periodos de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años). Las líneas continuas representan el caudal total de salida en el punto de unión, mientras que las líneas punteadas muestran el flujo correspondiente al tramo principal antes de la confluencia. Se observa la variación del caudal máximo y el desplazamiento del tiempo al pico conforme aumenta la magnitud del evento de precipitación. Elaboración propia.

Gráfica 7

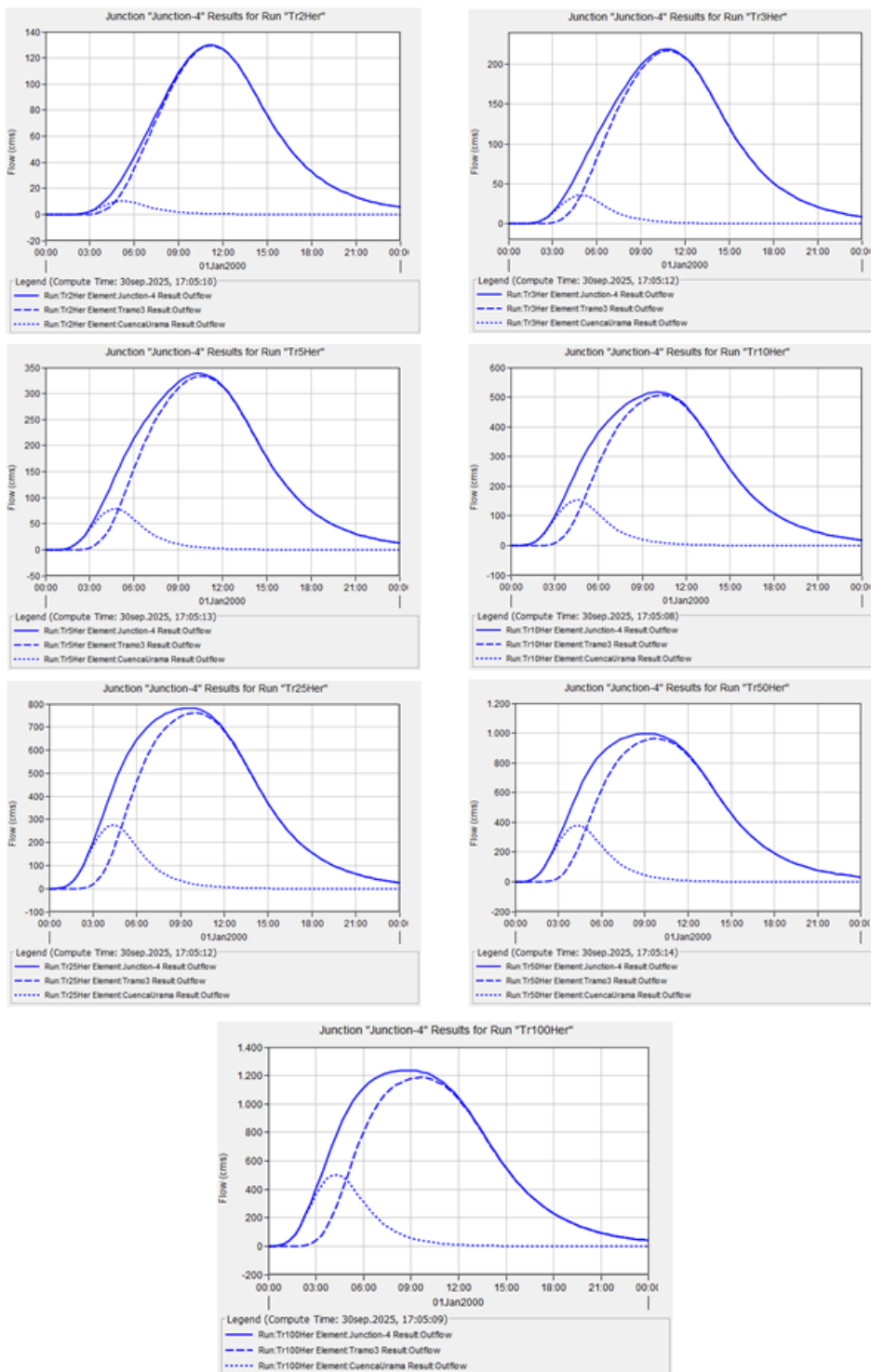
Tránsito y Atenuación de Hidrogramas en el Punto de Confluencia "Junction-3"



Nota: Hidrogramas simulados en el punto de unión “Junction-3” para diferentes periodos de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años) obtenidos mediante el modelo hidrológico HEC-HMS. Las líneas continuas representan el caudal total de salida en el nodo de confluencia, mientras que las líneas punteadas muestran el flujo proveniente del tramo principal y de la subcuenca b. Los resultados reflejan la variación temporal y la magnitud del caudal en función del incremento de la intensidad de la precipitación de diseño. Elaboración propia.

Gráfica 8

Tránsito y Atenuación de Hidrogramas en el Punto de Confluencia "Junction-3"



Nota. Hidrogramas simulados en el punto de unión “Junction-4” para diferentes periodos de retorno (2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años) obtenidos mediante el modelo hidrológico HEC-HMS. Las líneas continuas representan el caudal total de salida en el nodo de confluencia, mientras que las líneas punteadas muestran el flujo proveniente del tramo principal y de la subcuenca Urama. Los resultados reflejan la variación temporal y la magnitud del caudal en función del incremento de la intensidad de la precipitación de diseño. Elaboración propia.

La atenuación se manifiesta mediante una reducción en el caudal pico y un incremento en el tiempo al pico, producto del almacenamiento temporal del agua dentro del cauce y de las pérdidas por infiltración o fricción hidráulica. Este comportamiento es característico de sistemas naturales en los que la pendiente, la rugosidad y la geometría del canal influyen directamente en la disipación de energía del flujo.

A medida que se incrementa el período de retorno —desde 2 hasta 50 años— se observa que los caudales pico aumentan de forma no lineal, mientras que la pendiente descendente del hidrograma se hace más prolongada, indicando un mayor tiempo de recesión. Este efecto refleja la capacidad del cauce para almacenar y liberar gradualmente el volumen de agua, modulando así la magnitud del evento en la salida de la subcuenca.

En términos hidrológicos, este fenómeno evidencia que el tránsito de flujo dentro del modelo HEC-HMS fue adecuadamente representado mediante el método Muskingum-Cunge, el cual considera tanto la propagación como el almacenamiento del flujo. De esta forma, los resultados demuestran que la modelación captura de manera realista la

respuesta hidráulica del sistema fluvial, aportando una base sólida para la estimación de caudales máximos y el análisis de escenarios de riesgo por inundación.

11 Conclusiones

La aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS en la cuenca del río Sucio (Urabá antioqueño) permitió estimar los caudales máximos bajo diferentes escenarios de lluvia de diseño, cumpliendo el objetivo general de generar insumos técnicos relevantes para la gestión del riesgo por inundaciones y la planificación del recurso hídrico en la región.

El proceso metodológico, estructurado en fases de preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento, garantizó la solidez y coherencia del estudio. La delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca, realizada a partir de información cartográfica, topográfica e hidrológica, junto con la integración de datos de cobertura y asociaciones de suelo, proporcionó una base detallada para la representación hidrológica. Asimismo, el uso del MDE, herramientas SIG y la definición del punto de control hidrológico en la estación Dabeiba permitieron consolidar un modelo espacialmente consistente.

La configuración y calibración del modelo HEC-HMS, tanto en su esquema agregado como semidistribuido, evidenció diferencias significativas en la respuesta hidrológica: mientras el enfoque agregado entregó una visión general del comportamiento de la cuenca, el esquema por subcuencas permitió capturar la variabilidad espacial de la precipitación y del escurrimiento, aportando mayor precisión en la identificación de zonas críticas. La simulación de eventos de distintos períodos de retorno, empleando Diagramas de Huff y considerando el factor de reducción de área, permitió estimar con realismo los caudales máximos y los tiempos de concentración, mientras que la propagación de caudales con el método de Muskingum-Cunge reflejó adecuadamente el efecto de los cauces en la atenuación y traslación de las ondas de crecida.

El análisis comparativo de resultados entre los esquemas (agregado vs. semidistribuido) demostró la relevancia de representar la cuenca con mayor nivel de detalle para mejorar la comprensión del régimen hidrológico y la estimación de caudales pico. Estos hallazgos constituyen un aporte valioso para identificar sectores más vulnerables de la cuenca y respaldar decisiones orientadas a la mitigación de amenazas hidrológicas, la planificación del territorio y la gestión sostenible del recurso hídrico.

En síntesis, el estudio no solo cumplió con los objetivos planteados, sino que también puso en evidencia la utilidad de combinar enfoques metodológicos y herramientas hidrológicas modernas para fortalecer la capacidad de respuesta frente al riesgo de inundaciones en cuencas de importancia regional.

12 Conclusiones más importantes.

Estimación de caudales máximos confiables: La implementación del modelo hidrológico HEC-HMS en la cuenca del río Sucio permitió estimar de manera precisa los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, constituyendo un insumo técnico esencial para la gestión del riesgo por inundaciones en la región de Urabá.

Valor del enfoque agregado y semidistribuido: La comparación entre el esquema de cuenca agregada y el semidistribuido en subcuencas mostró diferencias notables en la estimación de caudales pico y tiempos de respuesta. El modelo semidistribuido resultó más adecuado para identificar variabilidad espacial y zonas críticas, lo cual refuerza la importancia de utilizar representaciones detalladas en cuencas con heterogeneidad fisiográfica.

Aportes metodológicos sólidos: El uso de herramientas SIG, junto con la integración de información topográfica, cartográfica, de suelos y de cobertura, garantizó la caracterización morfométrica y la delimitación precisa de la cuenca. Asimismo, la incorporación de curvas IDF, Diagramas de Huff y el factor de reducción de área permitió simular escenarios de precipitación extremos de forma realista.

Importancia de la propagación de caudales: La implementación del método de Muskingum-Cunge evidenció el efecto de la red de drenaje en la atenuación y traslación de ondas de crecida, aspecto clave para comprender la dinámica hidrológica del río Sucio y mejorar las proyecciones de inundación.

Aplicación práctica para la gestión del riesgo: Los resultados obtenidos aportan información concreta para identificar zonas más vulnerables dentro de la cuenca, orientar

la planificación territorial y fortalecer estrategias de prevención y mitigación frente a inundaciones.

Relevancia del estudio para la planificación hídrica: Más allá de cumplir los objetivos planteados, el trabajo demuestra la utilidad de integrar modelos hidrológicos semidistribuidos con información geoespacial actualizada, lo cual constituye una base sólida para el diseño de planes de manejo sostenible del recurso hídrico en cuencas de importancia regional como la del río Sucio.

13 Referencias

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen (SHE): 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1-2), 45–59.
- Armenteras, D., Gast, F., & Villareal, H. (2006). Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation*, 113(2), 245–256.
- Arroyo Quinto, L. M. (2023). *Estudio de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, el viento y la humedad en la región del Urabá antioqueño a través de resultados de WRF*. Universidad de Antioquia.
- Beven, K. (2012). *Rainfall–Runoff Modelling: The Primer*. Wiley-Blackwell.
- Chen, Y., Shi, P., Ji, X., Qu, S., Zhao, L., & Dong, F. (2021). New method to calculate the dynamic factor–flow velocity in Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph. *Scientific Reports*, 9, 3.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Applied Hydrology*. Nueva York, EE. UU.: McGraw-Hill.
- Díaz, N. C., & Lavado, P. R. (2025). *Análisis de eventos de inundación a través de la comparación de modelos hidrológicos semiempíricos y de machine learning*. Universidad de Ingeniería y tecnología .
- Feldman, A. D. (1994). *HEC Models for Urban Hydrologic Analysis*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3(4), 1007–1019.
- Hydrologic Engineering Center (US), & Water Resources Support Center (US). (1981). *HEC-1 flood hydrograph package: Users manual*. US Army Corps of Engineers, Water Resources Support Center.
- Hydrologic Engineering Center, U. A. (s.f.). *Source, Junction, Diversion, and Sink Elements*. Obtenido de HEC-HMS User's Manual (Sección 4.6): <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.6/source-junction-diversion-and-sink-elements>
- Koutsoyiannis, D., & Xanthopoulos, T. (2017). Empirical relationships in hydrologic design. En V. P. (Ed), *Handbook of Applied Hydrology (2.ª edición)* (págs. 74.19–74.20). McGraw-Hill Education.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1982). *Hydrology for Engineers (3 ed.)*. Nueva York, NY: McGraw-Hill.
- Maidment, D. R. (1992). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Education.
- Moussa, R. (2003). On the morphometric properties of basins, scale effects and the hydrological response. *Hydrological Processes*, 17(1), 33–58.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Pusineri, G., Pedraza, R., & Lozeco, C. (2005). Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica. *Primera*

- Reunión de Usuarios de Sistemas de Información Geográfica y Procesadores Digitales*. Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. Obtenido de <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/pusineri.pdf>
- Refsgaard, J. C., & Storm, B. (1995). MIKE SHE. En *Computer Models of Watershed Hydrology* (págs. 809–846). Water Resources Publications.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena River: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, 235(1-2), 137–149.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Water discharge and sediment load from the western slopes of the Colombian Andes with focus on Río San Juan. *Journal of Geology*, 108(1), 17–33.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270–292.
- U.S. Army Corps of Engineers. (1994). *Hydrologic Modeling System HEC-1: Flood Hydrograph Package, User's Manual*. Hydrologic Engineering Center.
- USACE. (2020). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual (Version 4.9)*. Hydrologic Engineering Center.
- USAL, U. d. (2015). *Tránsito de Hidrogramas*. Departamento de Hidrología, Universidad de Salamanca.
- Valle, A. M. (2021). *Modelación del comportamiento hidrológico y de la oferta hídrica superficial total de la microcuenca de la Quebrada Santa Elena, Antioquia, Colombia*. Antioquia, Colombia.
- Vásquez, V. G., & Tobón, C. (2016). *Influencia del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de cuencas de cabecera en los Andes Centrales de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (2002). *Introduction to Hydrology* (5 ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.