

Evaluación de amenazas hidrológicas por crecidas mediante modelación hidrológica en la zona de captación de agua potable en la subcuenca del río de Oro en Piedecuesta – Santander.

Javier Eduardo Marulanda López

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Director

John Jairo Márquez Molina

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico – mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a:

*A Dios, por su presencia constante, por darme fuerza en los momentos difíciles y por ser mi guía
a lo largo de este camino.*

*A mis padres, Marina y Javier, por su amor incondicional, su apoyo firme y su compañía sincera
en cada etapa de mi vida.*

*A mis hermanas, Daniela y Eliana, por estar siempre ahí, con palabras de aliento, paciencia y
respaldo.*

A quienes creyeron en mí, incluso cuando yo dudaba.

*A la Universidad Industrial de Santander, por haber sido el escenario de este proceso de
crecimiento académico y personal.*

Javier Eduardo Marulanda López

Agradecimientos

Especial gratitud a la Universidad Industrial de Santander por brindarme una formación de calidad y por ser el escenario donde consolidé mi desarrollo profesional y personal.

Al programa de Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental y al cuerpo docente que lo conforma, por su compromiso con la excelencia académica y por transmitirme conocimientos que aplicare con orgullo y responsabilidad.

Al profesor John Jairo Márquez Molina, director del proyecto, por su orientación, exigencia académica y constante disposición para guiarme con criterio profesionales de calidad y compromiso en cada etapa del trabajo.

A los profesionales y compañeros que de manera directa o indirecta, contribuyeron con su experiencia, retroalimentación o apoyo durante este proceso.

Tabla de Contenido

Introducción	14
1 Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 Marco Conceptual.....	18
2.1 Eventos hidrometeorológicos extremos	18
2.2 Cuenca hidrográfica	18
2.3 Caracterización morfométrica	18
2.4 Parámetros hidrológicos	19
2.5 Distribuciones y análisis estadístico.....	20
2.6 Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)	20
2.7 Modelo lluvia escorrentía.....	21
2.8 Análisis de sensibilidad	21
2.9 Identificación de datos anómalos	22
3 Marco Contextual	22
3.1 Descripción del área de estudio.....	22
3.2 Características climáticas	23

EVALUACIÓN DE AMENAZAS HIDROLÓGICAS RIO DE ORO	5
3.3 Suelos y cobertura vegetal.....	24
3.4 Aspectos hidrológicos	25
3.5 Marco institucional.....	26
3.6 Marco Legal	27
4 Estado del arte	28
5 Metodología.....	30
5.1 Caracterización morfométrica e hidrológica	31
5.1.1 Delimitación de la Cuenca Hidrográfica.....	31
5.1.2 Geometría o tamaño de la cuenca	33
5.1.3 Relieve de la cuenca.....	34
5.1.4 Forma de cuenca.....	34
5.1.5 Características de la red de drenaje	36
5.1.6 Curva hipsométrica	37
5.1.7 Parámetros hidrológicos.....	38
5.2 Procesamiento de datos hidrometeorológicos y construcción de curvas IDF.	44
5.2.1 Recopilación de Datos de Precipitación y Caudales	44
5.3 Análisis de datos hidrológicos y estructuración de datos.....	46
5.3.1 Identificación de Datos Anómalos:	46
5.4 Cálculo de hietogramas e hidrogramas para diferentes periodos de retorno.....	48

EVALUACIÓN DE AMENAZAS HIDROLÓGICAS RIO DE ORO	6
5.5 Identificación de las series para las tormentas de diseño	48
5.6 Tratamiento de Datos Faltantes de Precipitación y Caudal.....	50
5.7 Verificación de coherencia de datos completados	50
5.8 Generación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	51
5.9 Hietograma de la tormenta de diseño – <i>Metodología Huff</i>	52
5.10 Modelo hidrológico, lluvia-escorrentía en HEC-HMS	54
5.10.1 Análisis de sensibilidad.....	55
5.10.2 Configuración del modelo lluvia-escorrentía en HEC-HMS	55
5.10.3 Calibración del modelo hidrológico:.....	58
5.10.4 Validación del modelo	59
5.11 Simulación hidrológica y análisis del cambio en el uso del suelo	60
6 Resultados y discusiones	61
6.1 Caracterización morfométrica e hidrológica de la subcuenca del río de Oro	61
6.1.1 Parámetros morfométricos	61
6.1.2 Curva hipsométrica	64
6.1.3 Parámetros hidrológicos	66
6.2 Análisis de frecuencia de precipitaciones mediante distribuciones de Gumbel y Log-Pearson III.....	69
6.3 Identificación y análisis de tormentas específicas.....	72
6.3.1 Selección de eventos críticos.....	74

EVALUACIÓN DE AMENAZAS HIDROLÓGICAS RIO DE ORO	7
6.3.2 Completado de datos faltantes de las series de tiempo de Tormentas ..	74
6.3.3 Verificación de coherencia de los datos completados Tormentas.....	75
6.4 Curva Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF)	80
6.5 Hietograma de la tormenta de diseño – Metodología Huff	82
6.6 Modelación lluvia–escorrentía en HEC-HMS	83
6.6.1 Configuración del modelo.....	84
6.6.2 Análisis de sensibilidad.....	87
6.6.3 Calibración y validación del modelo.....	88
6.7 Simulación con lluvias sintéticas para diferentes períodos de retorno.....	91
6.7.1 Caudales simulados en la cuenca completa.....	91
6.7.2 Análisis hidrológico en la bocatoma	92
7 Conclusiones.....	94
8 Recomendaciones	97
9 Referencias Bibliográficas.....	99

Lista de Tablas

Tabla 1 Normatividad Colombia	27
Tabla 2 Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad	40
Tabla 3. Estado de información de estaciones (precipitaciones y caudales).	45
Tabla 4. Coeficientes regionales para el cálculo de curvas IDF	52
Tabla 5. Parámetros morfométricos de la cuenca del río de Oro.....	62
Tabla 6. CN ponderado de la cuenca	67
Tabla 7. Número de Curva (CN) ponderado por subcuenca.....	68
Tabla 8. Parámetros hidrológicos de la subcuenca del río de Oro.....	68
Tabla 9 Datos de precipitaciones máxima de 24 horas por año.....	69
Tabla 10 Distribución Log Pearson Tipo III.....	70
Tabla 11 Distribución Gumbel.....	70
Tabla 12. Fechas de los eventos hidrológicos extremos seleccionados.....	73
Tabla 13 Tormentas de la estación Llano grande	73
Tabla 14 Tormentas de la estación Piedecuesta.....	74
Tabla 15 Tormentas seleccionadas con coincidencia de datos de caudal y precipitación	74
Tabla 16 Datos completados de caudales de la Estación PALOGORDO	75
Tabla 17 Datos completados de precipitaciones de la Estación Llano Grande	75
Tabla 18 Datos completados de precipitaciones de la Estación Piedecuesta.....	75

EVALUACIÓN DE AMENAZAS HIDROLÓGICAS RIO DE ORO	9
Tabla 19. Verificación estadística antes y después del llenado de datos faltantes	80
Tabla 20. Parámetros iniciales por subcuenca para la configuración del modelo	86
Tabla 21. Parámetros iniciales insertados en HEC-HMS	86
Tabla 22 Reach Muskingum.....	87
Tabla 23. Coeficientes de sensibilidad total (δ).....	87
Tabla 24. Parámetros calibrados.	88
Tabla 25 Parámetros hidráulicos para los reaches en HEC-HMS	89
Tabla 26 Indicadores de desempeño del modelo hidrológico por tormenta	91
Tabla 27. Caudales pico (m^3/s) simulados en la cuenca completa para los tres escenarios .	92
Tabla 28 Caudales pico (m^3/s) en la bocatoma según CN de cada escenario.....	93

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Zona de Estudio	23
Figura 2. Mapa de cobertura de suelos y usos de suelo	25
Figura 3 Diagrama de flujo metodológico	31
Figura 4 Delimitación de la subcuenca del río de Oro y red de drenaje.	33
Figura 5 Número de orden de corriente	37
Figura 6. Localización de estaciones Hidrometeorológicas en la cuenca del río Oro Alto. .	45
Figura 7. Red de drenaje de la subcuenca del rio de Oro	64
Figura 8 Curva hipsométrica de la subcuenca del río de Oro.	65
Figura 9 Distribución de Precipitaciones Máximos Anuales LLANO GRANDE	71
Figura 10 Distribución de para Precipitaciones Máximos Anuales LLANO GRANDE.....	71
Figura 11 Distribución de Precipitaciones Máximos Anuales PIEDECUESTA.....	72
Figura 12 Distribución de Precipitaciones Máximos Anuales PIEDECUESTA.....	72
Figura 13 Verificación de datos de precipitación de la tormenta 1 – Llano Grande	76
Figura 14 Verificación gráfica de precipitación de la tormenta 1 – Piedecuesta.....	77
Figura 15 Verificación gráfica del caudal de la tormenta 1 – Piedecuesta.....	77
Figura 16 Verificación de datos de precipitación de la tormenta 2 – Llano Grande	78
Figura 17 Verificación gráfica de precipitación de la tormenta 2 – Piedecuesta.....	78
Figura 18 Verificación gráfica del caudal de la tormenta 2 – Piedecuesta.....	78

EVALUACIÓN DE AMENAZAS HIDROLÓGICAS RIO DE ORO	11
Figura 19 Curva IDF Estación llano grande	81
Figura 20 Curva IDF Estación Piedecuesta	81
Figura 21 Hietograma y precipitación acumulada – Estación Piedecuesta	82
Figura 22 Hietograma y precipitación acumulada – Estación Llano Grande	83
Figura 23 División de la cuenca en subcuencas para el modelo hidrológico	84
Figura 24 Polígonos de Thiessen	85
Figura 25 Hidrograma comparativo entre el caudal simulado y observado	89
Figura 26 Hidrograma comparativo entre el caudal simulado y observado	90

Resumen

Título: Evaluación de amenazas hidrológicas por crecidas mediante modelación hidrológica en la zona de captación de agua potable en la subcuenca del río de Oro en Piedecuesta – Santander.*

Autores: Javier Eduardo Marulanda López**

Palabras clave: HEC-HMS, modelación hidrológica, curvas IDF, eventos extremos, análisis de sensibilidad, lluvia-caudal, simulación hidrológica.

Descripción:

Este estudio evaluó las amenazas hidrológicas por crecidas en la subcuenca del río de Oro, ubicada en Piedecuesta (Santander), mediante modelación lluvia–escorrentía con el software HEC-HMS, con el propósito de analizar diferentes escenarios de lluvia y las condiciones que podrían generar eventos extremos en la zona de captación. La metodología se desarrolló en tres fases: (1) caracterización morfométrica e hidrológica mediante QGIS, que determinó una cuenca alargada ($K_f = 0,28$; $K_c = 2,10$), asimétrica ($I_{AS} \approx 45 \%$), con pendiente media alta ($37,6 \%$) y un Número de Curva (CN) entre 59 en condición seca y 91 en condición húmeda; (2) recopilación, validación y depuración de datos hidrometeorológicos, aplicando las pruebas de Rosner y Grubbs, construcción de curvas intensidad–duración–frecuencia (IDF) —destacándose en Piedecuesta una intensidad de 5 mm/h en 10 minutos para un período de retorno de 100 años— y generación de hietogramas sintéticos mediante el método Huff (Q1); y (3) modelación hidrológica en HEC-HMS, que incluyó configuración, calibración ($NSE = 0,676$; $PBIAS = 7,91 \%$) y validación ($NSE = 0$; $PBIAS = -40,20 \%$), así como análisis de sensibilidad de parámetros.

El análisis de sensibilidad evidenció que el Número de Curva (CN) y el tiempo de concentración (T_c) fueron los parámetros de mayor influencia en la generación del caudal pico, ambos con sensibilidad negativa, lo que indica que variaciones pequeñas en estos parámetros modifican significativamente la magnitud y la temporalidad del hidrograma. Las simulaciones con lluvias sintéticas mostraron un incremento progresivo del caudal pico para períodos de retorno crecientes, alcanzando valores máximos de $17,7 \text{ m}^3/\text{s}$ en condiciones saturadas (CN III, TR = 100 años), lo que evidencia una alta susceptibilidad de la cuenca a crecidas rápidas.

Los resultados permiten concluir que la subcuenca del río de Oro presenta condiciones geomorfológicas y de suelo que favorecen respuestas hidrológicas rápidas ante eventos intensos de lluvia, representando un riesgo significativo para la bocatoma de la PTAP La Colina. Se recomienda fortalecer el monitoreo e incorporar escenarios de cambio climático y gestión del riesgo para proteger la bocatoma de la PTAP La Colina.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director John Jairo Márquez Molina

ABSTRACT

Title: Assessment of Hydrological Flood Hazards through Hydrological Modeling in the Potable Water Intake Area of the Río de Oro Sub-basin, Piedecuesta – Santander.*²

Authors: Javier Eduardo Marulanda Lopez**

Keywords: HEC-HMS, hydrological modeling, IDF curves, extreme events, sensitivity analysis, rainfall-runoff, hydrological simulation.

Description:

This study assessed the hydrological flood hazards in the Río de Oro sub-basin, located in Piedecuesta (Santander, Colombia), through rainfall–runoff modeling using the HEC-HMS software, with the purpose of analyzing rainfall scenarios capable of generating extreme events in the potable water intake area. The methodology was structured in three phases: (1) morphometric and hydrological characterization using QGIS, which revealed an elongated basin ($K_f = 0.28$; $K_c = 2.10$), asymmetric geometry ($IAS \approx 45\%$), steep average slope (37.6%), and Curve Number (CN) ranging from 59 under dry antecedent conditions to 91 under wet conditions; (2) compilation, validation, and quality control of hydrometeorological data, including the application of Rosner and Grubbs tests, construction of intensity–duration–frequency (IDF) curves—highlighting a 5 mm/h intensity at 10 minutes for a 100-year return period—and generation of synthetic hyetographs using the Huff method (Q1); and (3) hydrological modeling in HEC-HMS, including configuration, calibration ($NSE = 0.676$; $PBIAS = 7.91\%$), validation ($NSE = 0$; $PBIAS = -40.20\%$), sensitivity analysis.

Sensitivity analysis indicated that the Curve Number (CN) and time of concentration (T_c) were the most influential parameters affecting peak discharge, both exhibiting negative sensitivity, implying that small parameter variations substantially alter hydrograph magnitude and timing. Simulations with synthetic storms showed progressively higher peak flows for increasing return periods, reaching up to 17.7 m³/s under saturated conditions (CN III, 100-year return period), evidencing the basin’s high susceptibility to rapid flood responses.

The results demonstrate that the Río de Oro sub-basin possesses geomorphological and soil characteristics conducive to rapid hydrological responses during intense rainfall events, posing a significant risk to the intake infrastructure of the La Colina Water Treatment Plant.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico – mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director John Jairo Márquez Molina

Introducción

En los últimos años, los eventos hidrometeorológicos extremos han incrementado significativamente en frecuencia e intensidad, impulsados por los efectos del cambio climático y la variabilidad climática natural. Estos fenómenos, entre los que se destacan las crecidas súbitas e inundaciones, constituyen una amenaza creciente para los sistemas naturales y humanos, afectando infraestructuras, medios de vida y la seguridad hídrica de las comunidades (ASP Colombia, 2023). Los procesos hidrológicos presentan alteraciones en la distribución temporal y espacial de las precipitaciones, modificando la escorrentía superficial y la infiltración, lo que intensifica tanto las crecientes como las sequías. Estas condiciones extremas generan impactos socioeconómicos y ambientales de gran magnitud, como la pérdida de vidas y bienes, la degradación de los ecosistemas, la escasez de alimentos, energía y agua potable, así como la propagación de enfermedades. En este contexto, la estimación hidrológica e hidráulica de las crecientes se convierte en un componente esencial para la planificación y el desarrollo urbano sostenible, el diseño y operación de obras hidráulicas, y la gestión integral del riesgo de desastres (Ruiz Vera, 2015).

El municipio de Piedecuesta, en el departamento de Santander (Colombia), ha enfrentado múltiples emergencias naturales en los últimos años, entre ellas deslizamientos, avenidas torrenciales y fallas en el sistema de abastecimiento de agua potable. Las inundaciones de 2020 (Semana, 2022), la afectación de la bocatoma de la planta La Colina en 2022 (Vanguardia, 2024) y el desbordamiento de la quebrada Sevilla en junio de 2024 (Caracol Radio, 2024) evidencian la creciente vulnerabilidad del sistema hídrico local y la necesidad urgente de implementar estrategias de adaptación y gestión del riesgo. Ante este panorama, es importante generar herramientas técnicas que permitan anticipar y mitigar los efectos de eventos extremos; en este

contexto, la modelación hidrológica mediante el uso del software HEC-HMS permite simular la respuesta de la cuenca ante distintos escenarios de precipitación y estimar la magnitud de los caudales generados, contribuyendo con información clave para la toma de decisiones fundamentadas en evidencia científica. En consecuencia, este trabajo tuvo como objetivo evaluar las amenazas hidrológicas por crecientes mediante la modelación hidrológica en la zona de captación de agua potable de la subcuenca del río de Oro, en Piedecuesta.

La subcuenca del río de Oro, localizada en la zona alta de Piedecuesta, abastece a la Planta de Tratamiento de Agua Potable La Colina. Esta cuenca hidrográfica presenta características topográficas abruptas, suelos inestables y una cobertura vegetal en transformación, factores que incrementan su vulnerabilidad a eventos hidrológicos extremos.

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar las amenazas hidrológicas por crecidas mediante la modelación hidrológica en la zona de captación de agua potable de la subcuenca del río de Oro, en Piedecuesta. Para ello, se realizó una caracterización morfométrica e hidrológica del territorio, se analizaron y estructuraron datos hidrometeorológicos, se generaron curvas de intensidad–duración–frecuencia (IDF) y se implementó un modelo lluvia–escorrentía en el software HEC-HMS, el cual fue calibrado y validado con eventos reales.

La metodología del estudio se estructuró en tres fases: (i) la caracterización morfométrica e hidrológica de la cuenca mediante SIG (QGIS) y el complemento ArcGeek Calculator; (ii) la recopilación y procesamiento de datos hidrometeorológicos de estaciones del IDEAM, junto con la construcción de curvas IDF a partir de ajustes estadísticos, y (iii) la modelación en HEC-HMS, validada mediante tormentas reales y utilizada para la simulación de escenarios críticos. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de parámetros clave en la confiabilidad del modelo.

El estudio se delimitó a la zona alta de la subcuenca del río de Oro, enfocándose en el análisis hidrológico de amenazas por crecientes. Para ello, se empleó información comprendida entre los años 2004 y 2024, orientada a la simulación de caudales máximos asociados a eventos extremos de precipitación. El proyecto no abordó componentes hidráulicos, como el modelado de flujo en cauces o la evaluación estructural de obras físicas, sino que se centró en el análisis hidrológico como herramienta técnica para la planificación territorial y la gestión del riesgo en la zona de abastecimiento.

El presente estudio está alineado con los principios del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres y con los compromisos del Acuerdo de París, al igual que con la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia (UNGRD, 2015), al promover estrategias de adaptación fundamentadas en evidencia técnica. Asimismo, contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 13 (acción por el clima).

Finalmente, la propuesta aportó conocimiento técnico sobre el comportamiento hidrológico de una cuenca prioritaria.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar las amenazas hidrológicas por crecidas mediante la modelación hidrológica en la zona de captación de agua potable de la subcuenca del río de Oro en Piedecuesta, Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar los parámetros morfométricos e hidrológicos de la zona alta de la subcuenca del río de Oro.

Generar curvas IDF a partir de datos pluviométricos disponibles para la determinación de lluvias de diseño, como insumo en la implementación y calibración de un modelo hidrológico lluvia-caudal en HEC-HMS.

Analizar los caudales simulados en HEC-HMS para diferentes escenarios de lluvia, evaluando las condiciones que podrían generar eventos extremos en la zona de captación de agua potable.

2 Marco Conceptual

El marco conceptual para el estudio de los eventos hidrometeorológicos extremos y su influencia en la cuenca hidrográfica incluye aspectos como el contexto climático, la caracterización morfométrica y modelación hidrológica.

2.1 Eventos hidrometeorológicos extremos

Los eventos hidrometeorológicos extremos, como lluvias intensas, inundaciones y sequías prolongadas, han aumentado en frecuencia e intensidad en las últimas décadas, asociados al cambio climático y a la variabilidad climática natural. En zonas montañosas como la subcuenca del río de Oro, las precipitaciones torrenciales pueden saturar rápidamente los suelos inestables, provocando escorrentía intensa, desbordamientos y deslizamientos de tierra. Por su parte, las sequías afectan la disponibilidad hídrica y degradan los ecosistemas, lo que repercute directamente en la seguridad hídrica de la región.

2.2 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una zona del territorio definida por la forma del relieve, donde el agua de la lluvia se concentra y fluye hacia un mismo río principal por medio de quebradas y corrientes que la alimentan (Chow, Maidment y Mays, 1988). Este sistema natural incluye el río principal, sus afluentes y los cuerpos de agua superficiales, los cuales están limitados por las partes más altas del terreno que marcan el borde de la cuenca.

2.3 Caracterización morfométrica

La caracterización morfométrica analiza las propiedades geométricas y topográficas de una cuenca para comprender cómo influyen el relieve y la red de drenaje en su respuesta hidrológica

ante eventos de lluvia. Este análisis permite establecer relaciones entre los parámetros físicos del terreno y el comportamiento de la escorrentía (Del Águila y Mejía, 2021).

La geometría de la cuenca define su extensión y disposición espacial, condicionando la concentración del flujo y el volumen escurrido. Parámetros como el área, la longitud, el perímetro y el ancho promedio permiten representar su forma horizontal y su capacidad de almacenamiento (Meshram et al., 2017).

El relieve influye directamente sobre el flujo superficial y la velocidad del escurrimiento. Pendientes elevadas generan respuestas rápidas, mientras que relieves suaves favorecen la infiltración y el almacenamiento temporal (Shekar & Mathew, 2023). La forma de la cuenca, expresada mediante índices como el de Gravelius o de alargamiento, determina la rapidez con que se concentra la escorrentía y el tiempo de llegada del caudal pico (Keller & Pinter, 2002).

Asimismo, la red de drenaje constituye el sistema natural que conduce el agua hacia el cauce principal. Su grado de ramificación y densidad de drenaje reflejan la capacidad del terreno para evacuar o infiltrar el agua, siendo indicadores clave de su respuesta hidrológica (Horton, 1945; Strahler, 1964). Finalmente, la curva hipsométrica complementa la interpretación del relieve al mostrar la relación entre el área acumulada y la altitud, lo que permite inferir el grado de disección y la madurez geomorfológica de la cuenca (Shekar & Mathew, 2023).

2.4 Parámetros hidrológicos

Los parámetros hidrológicos utilizados para describir la respuesta de la cuenca ante eventos de lluvia son el tiempo de concentración (T_c) que indica la duración que tarda el flujo en alcanzar la salida desde el punto más distante, siendo clave en la formación del caudal pico (Chow, Maidment y Mays, 1988). El número de curvas (CN) refleja la capacidad de infiltración del terreno

según el uso del suelo, tipo de suelo y condición hidrológica (USDA-SCS, 1986), y se relaciona directamente con la capacidad de retención potencial (S). El coeficiente de almacenamiento de Clark representa la atenuación del flujo dentro de la cuenca (McCuen, 2005).

2.5 Distribuciones y análisis estadístico

En el análisis de eventos hidrometeorológicos extremos, la selección de distribuciones estadísticas apropiadas sirve para estimar la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones intensas asociadas a diferentes períodos de retorno.

La distribución de Gumbel se utiliza comúnmente para modelar eventos extremos como las precipitaciones máximas anuales. Esta distribución ha sido ampliamente empleada debido a su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento de los valores máximos observados en registros históricos, especialmente cuando se requiere evaluar eventos de gran magnitud en horizontes temporales amplios. Por su parte, la distribución Log-Pearson tipo III resulta útil para modelar series hidrológicas que presentan asimetría positiva, como es frecuente en registros de lluvia extrema o caudal pico. Esta distribución incorpora el coeficiente de asimetría y permite una representación más ajustada de la variabilidad inherente a los eventos intensos y de corta duración. (Acosta Castellanos & Sierra Aponte, 2013).

2.6 Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF)

La Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) es una herramienta de la hidrología para el análisis de precipitaciones y la planificación de infraestructuras hídricas. Esta curva establece la relación entre la intensidad de la lluvia, la duración del evento de precipitación y la frecuencia con la que se espera que ocurran diferentes eventos de lluvia en un periodo determinado. Al analizar datos históricos de precipitaciones, se pueden crear curvas IDF que ayudan a

determinar el diseño adecuado de estructuras como alcantarillas, embalses y sistemas de drenaje. Las curvas IDF son importantes para la gestión del riesgo de inundaciones y la planificación de adaptación del cambio climático, ya que proporcionan información sobre cómo se espera que varíen las intensidades de lluvia bajo diferentes condiciones (Ochoa–Tocachi et al., 2018).

2.7 Modelo lluvia escorrentía

El modelo lluvia–escorrentía es una herramienta importante para la modelación hidrológica, ya que permite simular cómo las precipitaciones se convierten en escorrentía superficial a través de diversos procesos hidrológicos. Este modelo se basa en la comprensión del balance hídrico dentro de una cuenca, considerando factores como la intensidad y duración de las lluvias, la capacidad de infiltración del suelo y las características del terreno (Chow, Maidment & Mays, 1988). La elección del modelo depende del objetivo del estudio, la disponibilidad de datos y los requisitos de precisión en las predicciones (Ochoa–Tocachi et al., 2018).

2.8 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una técnica utilizada en la modelación hidrológica para evaluar cómo las variaciones en los parámetros de entrada y las condiciones iniciales afectan los resultados del modelo. Esta metodología ayuda a comprender la robustez y la confiabilidad de las predicciones del modelo, así como a identificar los parámetros que tienen un mayor impacto sobre las salidas (Saltelli et al., 2008). Existen diferentes métodos de análisis de sensibilidad, entre los cuales se destacan el Análisis de Sensibilidad Regional (RSA) y los enfoques globales, que permiten evaluar la influencia de los parámetros en determinados escenarios.

Existen diferentes métodos de análisis de sensibilidad, entre los cuales se destacan el Análisis de Sensibilidad Regional (RSA) y el método basado en la Distribución de Salida (PAWN),

que permiten evaluar la influencia de los parámetros en determinados escenarios. El análisis de sensibilidad no solo ayuda a optimizar la calibración del modelo, sino que también se convierte en una herramienta de control de calidad. Permite identificar si un modelo produce resultados que se alinean con las expectativas teóricas (Pianosi & Wagener, 2016).

2.9 Identificación de datos anómalos

La identificación de datos anómalos o valores atípicos en series hidrológicas es un proceso fundamental para garantizar la calidad y confiabilidad de los análisis estadísticos y de los modelos hidrológicos. Los valores atípicos pueden originarse por errores de medición, fallas en los instrumentos o por la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, y su presencia puede distorsionar la estimación de parámetros y la interpretación de resultados. Entre las herramientas más utilizadas para su detección se encuentran las pruebas de tipo paramétrico, como la prueba de Rosner, que permiten identificar valores extremos bajo el supuesto de normalidad de los datos. Cuando este supuesto no se cumple, se recomienda el uso de métodos no paramétricos, como el filtro de Tukey o el método de Hampel, los cuales han demostrado ser eficaces para la detección de valores atípicos en datos hidrológicos sin asumir una distribución específica (Hussain, 2020).

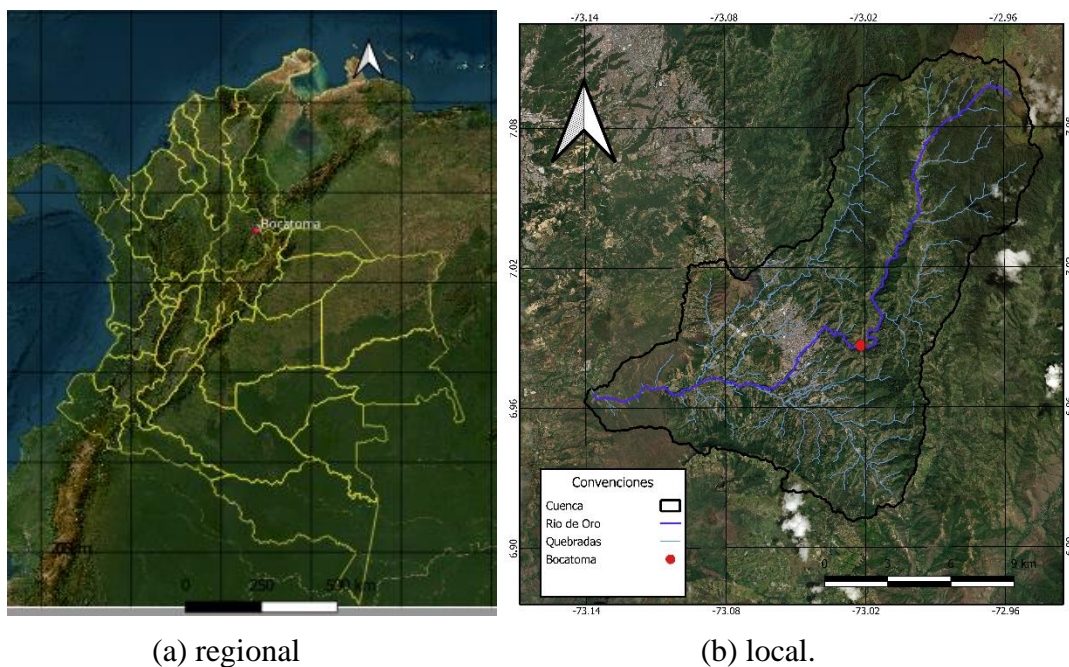
3 Marco Contextual

3.1 Descripción del área de estudio

La subcuenca del río de Oro Alto, ubicada en el departamento de Santander, Colombia, forma parte del sistema hídrico que abastece de agua a zonas urbanas y rurales del municipio de Piedecuesta; por su relevancia en el manejo del recurso hídrico y por presentar terrenos de pendientes pronunciadas, constituye un área sensible a fenómenos como inundaciones y deslizamientos. El área de estudio se encuentra entre las coordenadas $6^{\circ}55'$ y $7^{\circ}05'$ de latitud norte

y $73^{\circ}00'$ y $73^{\circ}10'$ de longitud oeste, abarcando zonas de la parte alta del municipio, donde predominan coberturas naturales y usos agrícolas dispersos; su cauce principal fluye en sentido oriente–occidente hasta confluir con el río Lebrija, dentro de la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). En esta subcuenca se localizan la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) La Colina y su bocatoma, encargadas de captar y tratar el agua que abastece al acueducto de Piedecuesta; la bocatoma se sitúa aproximadamente un kilómetro aguas arriba de la planta, en la parte alta de la subcuenca, en una ubicación estratégica para la captación (Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P., 2022).

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Zona de Estudio



Nota. Ubicación de la subcuenca del río de Oro Alto y de la bocatoma de la PTAP La Colina.

3.2 Características climáticas

La zona de estudio se encuentra en una región de transición climática que abarca climas cálidos y fríos. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1987), la parte baja del municipio de Piedecuesta tiene un clima cálido y húmedo, con temperaturas entre 24°C y 28°C

y precipitaciones anuales superiores a 3000 mm. En contraste, las zonas altas presentan un clima frío de páramo, con temperaturas entre 5 °C y 12 °C y precipitaciones anuales entre 500 mm y 1000 mm.

El fenómeno de La Niña afectó la región en los periodos 2010-2011 y 2020-2022, incrementando las lluvias torrenciales y los deslizamientos. Por su parte, los episodios de El Niño, como los años 2015-2016 y 2018-2019, provocaron sequías que impactaron negativamente en la disponibilidad de agua (Giraldo-Osorio, González-Pérez & Poveda, 2022).

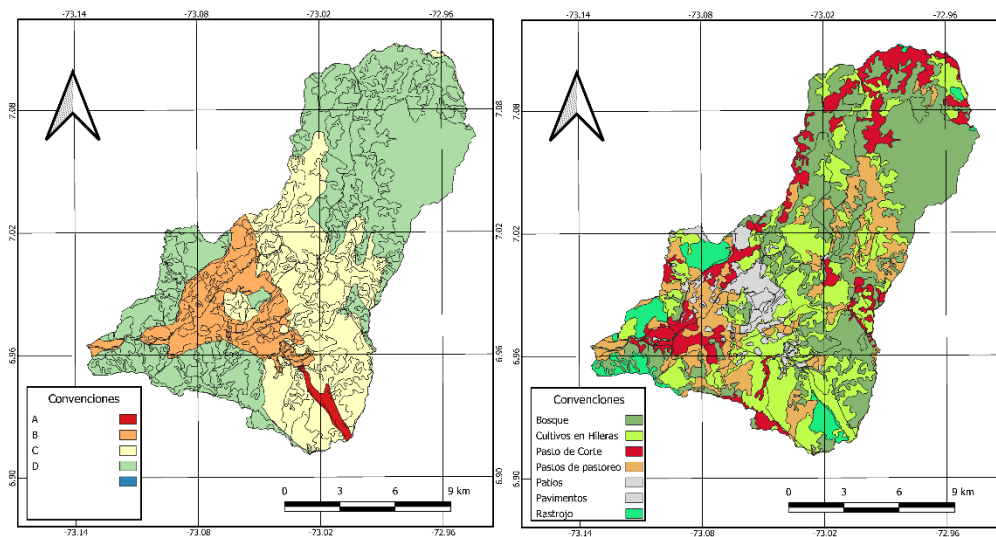
3.3 Suelos y cobertura vegetal

La subcuenca del río de Oro Alto presenta una variedad de suelos y coberturas que influyen en su comportamiento hidrológico y en los procesos de esorrentía superficial.

Según los mapas de suelos del IGAC (Figura 2), predominan unidades edáficas derivadas de rocas ígneas y metamórficas, con texturas medias a finas y capacidad de infiltración variable. En las zonas altas los suelos son poco profundos y de baja permeabilidad, mientras que en las partes bajas se observan depósitos aluviales más profundos y con mayor retención de humedad. Estas condiciones, junto con las fuertes pendientes, favorecen la erosión y limitan el uso agrícola (IGAC, 2016).

La cobertura del suelo, de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover (CLC) adaptada por el IGAC, se determinó a partir de imágenes satelitales y verificaciones de campo. Este producto cartográfico, elaborado a una escala de 1:100.000, permite identificar los cambios de uso y cobertura de la tierra en todo el territorio nacional (IGAC, 2018).

Figura 2. Mapa de cobertura de suelos y usos de suelo



Nota. Cobertura de suelos y usos del suelo en la subcuenca del río de Oro Alto tomado de los mapas del IGAG.

La subcuenca del río de Oro Alto presenta una matriz de cobertura dominada por bosques y vegetación secundaria en las zonas altas, mientras que en los sectores medio y bajo predominan usos agropecuarios, áreas de pastos y superficies antrópicas dispersas. Esta configuración espacial del uso del suelo incide en los procesos de infiltración, generación de escorrentía y estabilidad de laderas, condicionando la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de lluvia intensa.

3.4 Aspectos hidrológicos

La subcuenca del río de Oro Alto pertenece al sistema hidrográfico del río Lebrija, afluente del río Magdalena. Su red de drenaje presenta un patrón dendrítico con cauces de primer y segundo orden que confluyen hacia el eje principal en dirección oriente–occidente (Urrea, 2019). El río de Oro constituye el cauce principal, alimentado por varias quebradas secundarias que descienden desde las laderas norte y sur.

El régimen hidrológico de la subcuenca está determinado por el comportamiento bimodal de las precipitaciones, con máximos en los periodos abril–mayo y septiembre–octubre, y mínimos en enero–febrero y julio–agosto. Esta distribución estacional está asociada al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre el territorio colombiano, característica de las regiones andinas (Urrea, 2019).

3.5 Marco institucional

La gestión del riesgo por eventos hidrometeorológicos extremos se enmarca en un sistema multinivel que articula lineamientos internacionales, políticas nacionales y acciones locales orientadas a la reducción de la vulnerabilidad y al fortalecimiento de la resiliencia territorial. En este contexto, la planificación y la toma de decisiones se sustentan en marcos normativos e internacionales que orientan la gestión integral del riesgo de desastres.

A nivel internacional, la gestión del riesgo por eventos hidrometeorológicos extremos está alineada con el Acuerdo de París y el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, que promueven la reducción de la vulnerabilidad de las comunidades ante desastres naturales y el fortalecimiento de capacidades para la adaptación al cambio climático (ONU, 2015).

A nivel nacional, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el IDEAM son responsables de la planificación y el monitoreo de riesgos climáticos y geológicos. Estos organismos proporcionan directrices y datos relevantes para la gestión del riesgo en Colombia, apoyando la formulación de políticas públicas y la implementación de estrategias de prevención y mitigación (UNGRD, 2015).

A nivel local, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y la Alcaldía de Piedecuesta juegan un papel clave en la implementación

de medidas de adaptación y mitigación frente a eventos hidrometeorológicos extremos. Además, la Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P. gestiona el recurso hídrico en el municipio, asegurando el suministro de agua potable y la operación de la infraestructura asociada a la captación y tratamiento (Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P., 2022).

3.6 Marco Legal

La Tabla 1 resume el marco normativo aplicable en Colombia para el ordenamiento y aprovechamiento del recurso hídrico.

Tabla 1 Normatividad Colombia

Norma	Descripción
Decreto Ley 2811 de 1974	Código Nacional de Recursos Naturales. Establece principios para la protección y aprovechamiento del agua y los recursos renovables.
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio de Ambiente y el SINA. Reconoce el agua como recurso estratégico y promueve su gestión integral y sostenible.
Decreto 1076 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente. Regula el manejo de cuencas hidrográficas, uso del agua y zonas de captación para abastecimiento.
Ley 1523 de 2012	Define la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD) e integra el análisis de amenazas hidrológicas en el ordenamiento territorial.
Resolución 865 de 2004	Establece criterios técnicos para la evaluación del recurso hídrico superficial y subterráneo en procesos de planificación ambiental.
Manual de Drenaje para Carreteras – INVIAS (2009)	Establece criterios técnicos para el análisis hidrológico y el diseño hidráulico, incluyendo metodologías para la estimación de curvas intensidad–duración–frecuencia (IDF) en Colombia.

4 Estado del arte

La gestión de riesgos y desastres en Colombia se ha fundamentado en investigaciones que exploran los eventos hidrometeorológicos extremos a través de diversas disciplinas. Estas investigaciones han permitido desarrollar herramientas avanzadas de modelación hidrológica y sistemas de información geográfica (SIG) aplicables a la evaluación y mitigación de riesgos.

En esta perspectiva, en el ámbito internacional, estudios como el desarrollado por Del Águila y Mejía (2021) en las cuencas altoandinas de los ríos Anya y Mchique, en Perú, emplearon herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para evaluar parámetros morfométricos asociados a la forma, el relieve y el drenaje. Los resultados revelaron patrones de drenaje dendrítico y subdendrítico, con baja densidad de drenaje, lo que sugiere altas tasas de infiltración y una menor susceptibilidad a inundaciones repentinas.

De manera complementaria, Rey-Valencia y Zambrano (2016) analizaron la cuenca urbana San Luis-Palgrande, en la ciudad de Manizales, y evidenciaron que los procesos de urbanización acelerada han incrementado significativamente los volúmenes de escorrentía superficial y, en consecuencia, el riesgo de inundaciones. Este estudio refuerza la importancia de considerar los cambios en el uso y la cobertura del suelo dentro de la modelación hidrológica.

Otro aporte relevante proviene de Ramírez López y Velasco Mateus (2019) analizó la cuenca del río El Hato en Cundinamarca mediante la comparación de tres modelos de pérdida por infiltración en HEC-HMS, destacando la importancia de la elección del modelo para la planificación hídrica. Los autores resaltaron que la selección adecuada del modelo de pérdidas influye directamente en la precisión de los caudales simulados y, por tanto, en la calidad de la planificación hídrica.

En relación, Suárez-Aguilar, Sepúlveda-Delgado, Patarroyo-Mesa y Canaria-Camargo (2020) desarrollaron un modelo matemático para estimar curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) de lluvias extremas en Tunja, empleando la distribución de Gumbel para el ajuste de máximos anuales. Su enfoque permitió generar curvas regionales de diseño aplicables en obras hidráulicas y sistemas de drenaje urbano, evidenciando que los métodos estadísticos clásicos continúan siendo herramientas válidas y eficaces en contextos con información pluviométrica limitada.

Uno de los aspectos relevantes en la investigación hidrológica es la modelación hidrológica, la cual permite simular el comportamiento de los cuerpos de agua bajo diferentes condiciones meteorológicas. Herramientas como el HEC-HMS han sido ampliamente utilizadas para evaluar la respuesta hidrológica de las cuencas y apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo de inundaciones.

En esta línea recientemente, estudios como el de *Rainfall–runoff modeling based on HEC-HMS model* (2024) (Modelación lluvia–escorrentía basada en HEC-HMS) han validado la aplicabilidad del modelo en procesos de simulación hidrológica, particularmente en sistemas de alerta temprana ante inundaciones. Este estudio demostró la capacidad del modelo para representar de forma adecuada la respuesta hidrológica de una cuenca mediante la calibración y validación de eventos extremos, reafirmando su utilidad en escenarios de planificación del riesgo hídrico.

En el contexto colombiano, Holman Yesid (2016) desarrollaron un estudio sobre la incertidumbre en la modelación hidrológica de la subcuenca del río de Oro Alto, aplicando el modelo HEC-HMS para la simulación de caudales y la evaluación de parámetros hidrológicos. Los autores destacaron que la calibración y validación de los parámetros son procesos para garantizar la confiabilidad de las simulaciones.

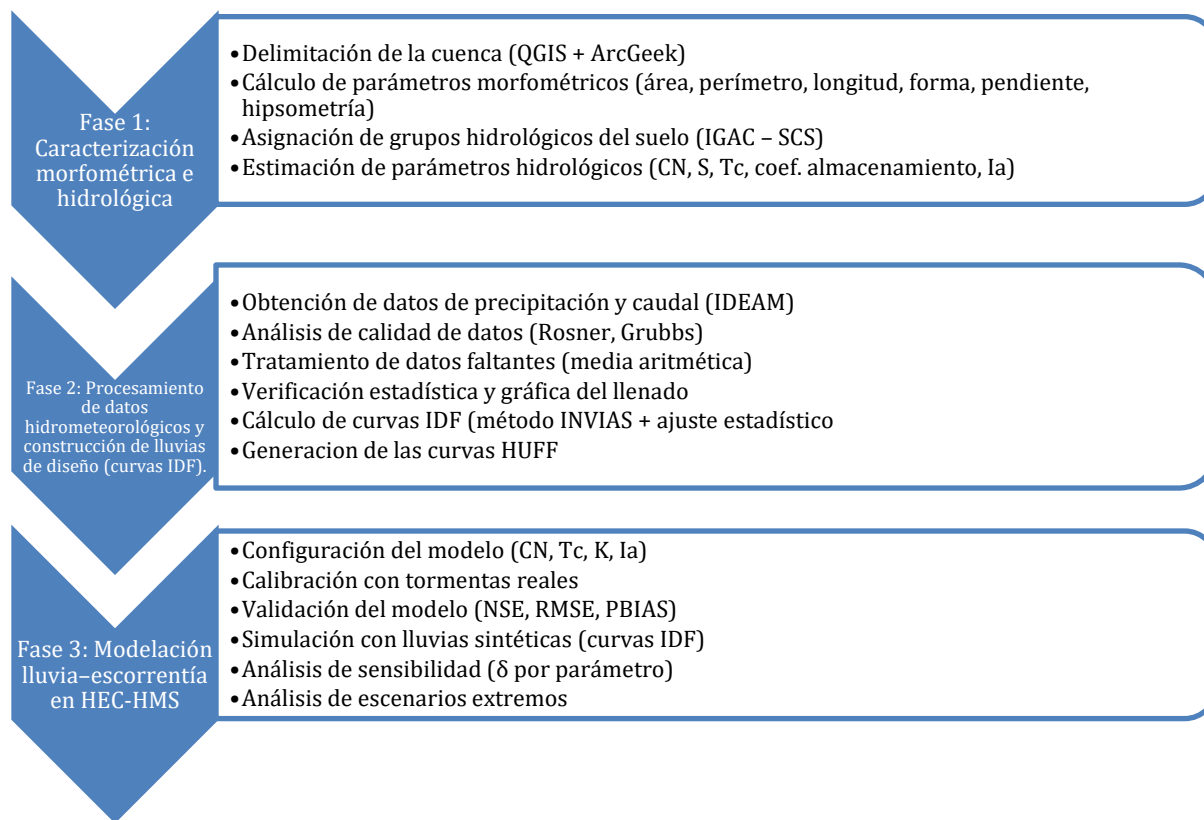
Adicionalmente, Blanco-Chávez (2023) analizó la microcuenca del cauce 31 de diciembre, en Managua (Nicaragua), proyectando los cambios en el hidrograma de crecida asociados a la modificación del uso del suelo entre 2018 y 2040. Los resultados mostraron un incremento del 9 % en la precipitación efectiva y del 30 % en los caudales máximos, evidenciando un aumento del riesgo de inundaciones en las zonas bajas de la microcuenca. Este tipo de estudios resulta especialmente relevante para cuencas andinas como la del río de Oro Alto, donde la expansión urbana y los cambios de cobertura pueden generar impactos hidrológicos similares.

En síntesis, la modelación hidrológica y el análisis morfométrico son herramientas clave para la gestión del riesgo hídrico. El modelo HEC-HMS ha demostrado su eficacia en la simulación de eventos extremos, mientras que el análisis morfométrico permite comprender la respuesta física de las cuencas. Estos enfoques sustentan el presente estudio aplicado a la subcuenca del río de Oro Alto.

5 Metodología

En el desarrollo metodológico se realizó una caracterización de la subcuenca del Río de Oro y se implementó un modelo de simulación lluvia-escorrentía en HEC-HMS. La metodología se dividió en tres fases: primero, se realizó una caracterización morfométrica para obtención de los parámetros básicos de la cuenca; luego, se realizó una caracterización hidrológica, donde se establecieron los patrones de precipitación y caudal; finalmente, se implementó numéricamente el modelo en HEC-HMS. A continuación, en la figura 1, se presenta una descripción general de cada fase.

Figura 3 Diagrama de flujo metodológico



5.1 Caracterización morfométrica e hidrológica

En esta etapa se obtuvieron las propiedades morfométricas más relevantes de la cuenca hidrográfica, con el propósito de obtener los parámetros geomorfológicos necesarios para la modelación hidrológica. Se evaluaron variables como el área total de la cuenca, la longitud y el perímetro del cauce principal, la pendiente promedio, la curva hipsométrica y la densidad de drenaje (Vélez, 2000).

5.1.1 Delimitación de la Cuenca Hidrográfica

En este estudio, se utilizó el programa QGIS (QGIS Development Team, 2024) junto con el complemento ArcGeek Calculator, creado para automatizar el análisis morfométrico y la delimitación de cuencas basándose en Modelos Digitales de Elevación (ArcGeek, 2022). El

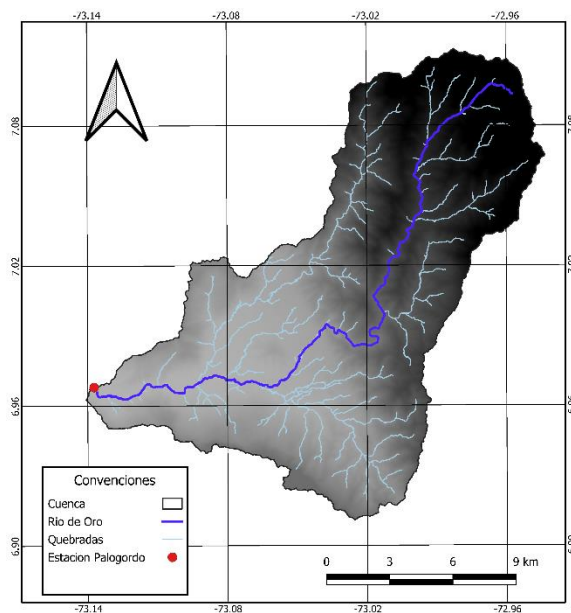
procedimiento se realizó a partir de un Modelo Digital de Elevación, siguiendo una secuencia ordenada que permitió obtener la cuenca asociada al punto de salida del área de estudio.

Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) proveniente del satélite ALOS PALSAR, que ofrece una resolución espacial de 12,5 metros. Este MDE fue seleccionado por su mayor nivel de detalle en áreas con relieve y vegetación. Los datos fueron descargados desde la plataforma ASF Data Search (Vertex), administrada por la NASA Alaska Satellite Facility (Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA, 2023). El punto de interés definido para la delimitación de la cuenca correspondió a la ubicación de la bocatoma de la PTAP La Colina, al representar el sitio de salida hidrológica y el elemento crítico para el análisis de amenazas por crecidas.

Posteriormente, desde la aplicación de QGIS, se cargó el archivo del modelo digital. A continuación, se creó el flujo del DEM a partir del cálculo de dirección y acumulación. Después se definió como punto de salida la estación meteorológica de Palogordo, dado que en este sitio cuenta con registros horarios de caudal del río de Oro. Una vez definido el punto de salida, se ejecutó el complemento ArcGeek Calculator. Este permite calcular automáticamente parámetros como área, pendiente, longitud del cauce principal y además delimita la cuenca utilizando algoritmos hidrológicos (ArcGeek, 2022).

El complemento realizó de forma automática el llenado de depresiones internas, calculó la dirección del flujo y finalmente generó un polígono vectorial que representa el área de drenaje efectiva. Esta capa vectorial corresponde a la delimitación final de la cuenca hidrográfica de estudio, verificada con la cartografía oficial del IGAC (QGIS Development Team, 2024).

Figura 4 Delimitación de la subcuenca del río de Oro y red de drenaje.



Nota: Elaboración propia con base en MDE y análisis SIG en QGIS.

5.1.2 Geometría o tamaño de la cuenca

Para caracterizar la geometría o tamaño de la cuenca se utilizaron herramientas de análisis espacial en QGIS, a partir de las cuales se delimitaron los contornos que definen la forma, extensión y superficie drenada. Se determinó el área de la cuenca mediante la función de cálculo de superficie dentro de los límites definidos, obteniendo así la extensión total que contribuye al flujo hacia el cauce principal. La longitud de la cuenca se midió trazando la línea más extensa del cauce principal, desde su punto más aguas arriba hasta la desembocadura. A su vez, el perímetro se obtuvo aplicando operaciones geométricas al polígono de la cuenca, identificando la longitud total de su borde. Finalmente, con estos tres parámetros se calculó el ancho promedio de la cuenca (W) utilizando la relación entre el área (A) y la longitud (L), expresada mediante la ecuación 1 lo cual permitió integrar y evaluar de forma conjunta la morfometría básica de la unidad hidrográfica en estudio (Vélez Otálvaro, 2000).

$$W = \frac{A}{L} \quad (1)$$

Nota. Tomado de Vélez Otálvaro, 2000.

5.1.3 *Relieve de la cuenca*

El análisis del relieve de la cuenca se llevó a cabo mediante el complemento ArcGeek Calculator en QGIS, a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) que permitió caracterizar topográficamente el área de estudio. La pendiente promedio se obtuvo generando un mapa de pendientes y aplicando estadísticas zonales dentro de los límites de la cuenca para calcular un valor representativo del gradiente del terreno (Tarboton, 1997). El desnivel altitudinal (DA) se estimó identificando la diferencia entre la elevación máxima y mínima del MDE (Strahler, 1952). Por último, se calculó la pendiente del cauce principal a través de una relación directa entre el desnivel del cauce y su longitud, aplicando la ecuación 2, donde ΔH es la diferencia de altitud entre la cabecera y la desembocadura, y L_c la longitud del cauce principal (Lozano-Rivas, 2018).

$$S = \frac{\Delta H}{L_c} \times 100 \quad (2)$$

Nota. Tomado de Lozano-Rivas, William A., 2018

5.1.4 *Forma de cuenca*

Para caracterizar la forma de la cuenca, se calcularon en Excel diversos índices morfométricos que permiten evaluar su geometría y comportamiento hidrológico.

5.1.4.1 Índice de forma de Horton (Kf)

Su cálculo se realizó mediante la ecuación 3, donde A corresponde al área de la cuenca en kilómetros cuadrados y L a la longitud del cauce principal en kilómetros. Este índice permite

interpretar el comportamiento de escurrimiento en función de la forma de la cuenca; un valor cercano a uno indica una forma circular y, por tanto, una respuesta rápida al escurrimiento superficial (Arce, 2015).

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

Nota. Tomado de Arce (2015)

5.1.4.2 Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad (Kc)

Se utilizó la ecuación 4, donde P es el perímetro de la cuenca en kilómetros, es el área en kilómetros cuadrados y π la constante 3.1416. Este valor adimensional permite identificar cuencas más compactas o alargadas, influyendo directamente en el tiempo de concentración y el caudal pico generado (Horton, 1945).

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (4)$$

Nota. Tomado de Horton, (1945)

Los valores del coeficiente de compacidad (Kc) cercanos a 1 indican una cuenca más compacta, con respuesta rápida y mayores caudales pico; mientras que valores superiores a 1 reflejan una cuenca alargada, con escorrentía más lenta y menor caudal (Horton, 1945).

5.1.4.3 Índice de Alargamiento (Ra)

Se aplicó la ecuación 5, siendo A el área de la cuenca en kilómetros cuadrados, L la longitud del cauce principal en kilómetros y π la constante 3.1416. Valores cercanos a 1 reflejan una forma circular, mientras que valores más bajos indican una morfología alargada, lo cual influye en la distribución del escurrimiento en el tiempo (Choquehuanca, 1999).

$$R_a = \frac{2\sqrt{A/\pi}}{L} \quad (5)$$

Nota. Tomado de Choquehuanca (1999).

5.1.4.4 Índice Asimétrico (IAS)

Este parámetro fue empleado para identificar posibles desequilibrios en la distribución espacial del drenaje respecto al cauce principal. Se determinó mediante la ecuación 6, donde (A_d) representa el área de la vertiente derecha del cauce y (A_t) el área total de la cuenca. Un valor cercano al 50 % indica simetría en la cuenca, mientras que desviaciones hacia valores superiores o inferiores pueden evidenciar procesos de deformación estructural o pendientes diferenciadas en el relieve (Keller & Pinter, 2002).

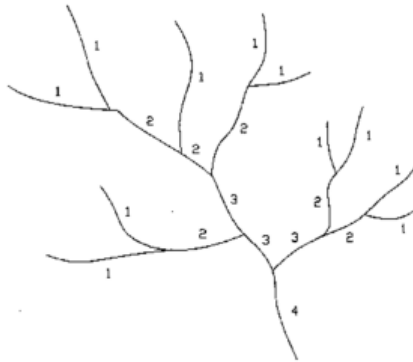
$$IAS = \frac{A_d}{A_t} \times 100\% \quad (6)$$

Nota. Tomado de Keller & Pinter, 2002.

5.1.5 Características de la red de drenaje

La determinación del orden de corriente se llevó a cabo mediante la clasificación de Horton (1945), asignando orden 1 a los cauces ubicados en las zonas más altas (aguas arriba). A medida que se unían dos cauces del mismo orden, el tramo resultante se clasificó con un orden superior. Posteriormente, se identificó el cauce principal como aquel con el orden más alto y, en caso de bifurcaciones con el mismo orden, se seleccionó el tramo correspondiente al área de cuenca más extensa. En la figura 2, se presenta un esquema de la clasificación de orden de corriente.

Figura 5 Número de orden de corriente



Nota. Tomado en Horton, 1945

5.1.5.1 Densidad de drenaje (Dd)

La densidad de drenaje es un indicador que muestra la correlación entre la longitud total de la red drenante (L) y la superficie de la cuenca (A_c). Este coeficiente se calculó mediante la ecuación 7, según la formulación de Strahler (1952).

$$D_d = \frac{L}{A_c} \quad (7)$$

Nota. Tomado de Strahler, 1952. Ecuación 7 Densidad de drenaje

La D_d ofreció una evaluación del nivel de disección del suelo y su eficacia para evacuar el agua precipitada. Valores bajos de densidad de drenaje indican condiciones de alta infiltración, asociadas a suelos permeables, vegetación abundante y pendientes suaves. Por el contrario, valores elevados reflejaron un drenaje más denso y efectivo en términos de escurrimiento superficial, característico de suelos poco permeables, coberturas vegetales reducidas y relieves abruptos.

5.1.6 Curva hipsométrica

La elaboración de las curvas hipsométricas se llevó a cabo en el software QGIS 3.40.4, utilizando el complemento SAGA Next Gen, específicamente el módulo Terrain Analysis –

Morphometry → Hypsometry, que permite analizar la distribución altitudinal de una cuenca a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE). En el algoritmo se definieron intervalos altitudinales regulares de 100 m. El procesamiento generó una tabla con los valores de elevación media, área parcial y área acumulada, la cual fue exportada a formato .csv y posteriormente trabajada en Microsoft Excel, donde se calcularon la altura relativa (h/H) y el área relativa (a/A) según el método propuesto por Strahler (1952). Con estos valores se elaboró la curva hipsométrica, representando la proporción del área acumulada respecto a la altitud total de la cuenca (Schumm, 1956; Pike y Wilson, 1971)

5.1.7 Parámetros hidrológicos

En esta sección se presentan los parámetros hidrológicos empleados para la modelación lluvia–escorrentía, obtenidos a partir de información espacial y criterios estandarizados del método SCS. Estos parámetros permiten representar las condiciones de infiltración y almacenamiento del terreno en la subcuenca analizada.

5.1.7.1 Cálculo del Número de Curva (CN)

La determinación del CN medio de la cuenca se realizó por medio de un proceso geoespacial desarrollado en el software QGIS. El procedimiento seguido fue el siguiente:

1. Se cargaron al entorno de trabajo del software QGIS las siguientes capas geoespaciales, todas en formato vectorial: (i) el mapa de cobertura del suelo, clasificado según la nomenclatura CORINE Land Cover (CLC); (ii) el mapa de usos de suelos Santander; y (iii) la delimitación vectorial de la cuenca hidrográfica. Los mapas se trabajaron a una escala de 1:100.000, garantizando un nivel de detalle adecuado para el análisis hidrológico.

2. Las capas de coberturas y de usos suelos se recortaron al área de la cuenca mediante la herramienta “Recortar capa por máscara”, utilizando como máscara la capa del límite de la cuenca.
3. Con base en la información edáfica disponible, se realizó la clasificación de las unidades de suelo en los grupos hidrológicos A, B, C y D definidos por el Soil Conservation Service (SCS), de acuerdo con sus características textuales (arenosa, franco, arenosa, franco, arcillosa, etc.). Esta asignación se efectuó de forma cualitativa, siguiendo los criterios técnicos del USDA (1986) y los lineamientos de la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), la cual establece el procedimiento oficial para la estimación del número de curva (CN) en Colombia. Los resultados de la clasificación y las características de los suelos se presentan en la Tabla 22.
4. Se ejecutó una intersección espacial entre la capa de uso del suelo y la capa de grupo hidrológico del suelo, generando una nueva capa vectorial con polígonos únicos por combinación de atributos (uso del suelo y grupo hidrológico).
5. A cada polígono resultante de la intersección se le asignó un valor de número de curva (CN) correspondiente a su combinación específica de uso del suelo y grupo hidrológico, bajo condición de humedad media (AMC II). Los valores asignados se basaron en la tabla de referencia elaborada para el estudio, la cual integra las combinaciones de cobertura y grupo hidrológico empleadas en la estimación del CN (ver Tabla 24).
6. Se calculó el área de cada polígono en hectáreas mediante la calculadora de campos de QGIS, agregando el valor como un campo adicional.
7. Posteriormente, los datos se exportaron a una hoja de cálculo de Excel. En dicha hoja se generó un campo adicional para calcular el producto $CN_i * A_i$ para cada polígono. Luego, se realizó la

sumatoria de estos productos y se dividió entre el área total de la cuenca, aplicando la Ecuación 8.

$$CN_{prom} = \frac{\sum(CN_i * A_i)}{\sum A_i} \quad (8)$$

Nota. Tomado de USDA, 1986.

Seguidamente, se determinó la condición de humedad antecedente (AMC) a partir del análisis de la precipitación acumulada durante los cinco días previos al evento de lluvia, siguiendo los lineamientos del Soil Conservation Service. Este procedimiento permitió clasificar el estado de humedad del suelo en tres categorías: seca (AMC I), media (AMC II) y húmeda (AMC III), dependiendo del nivel de saturación antecedente. La Tabla 2 presenta los rangos de precipitación acumulada utilizados para establecer cada condición de humedad.

Tabla 2 Precipitación acumulada para tres niveles de condición de humedad

Condición de humedad antecedente (AMC)	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (mm)
I (Seca)	0,0 – 36 mm
II (Media)	36 – 53 mm
III (Húmeda)	Más de 53 mm

Nota. Tomado por la metodología de USAA-SCS. (1972).

8. A partir del valor obtenido para (AMC II), se calcularon los valores ajustados para condiciones de humedad seca (AMC I) y húmeda (AMC III) mediante las siguientes ecuaciones:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2,281 - 0,01281 * CN_{II}} \quad (9)$$

Nota. Tomado de USDA, 1986.

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{0,43 + 0,0057 * CN_{II}} \quad (10)$$

Nota. Tomado de USDA, 1986.

5.1.7.2 Capacidad Potencial Máxima de Retención (S)

La estimación de S se realizó siguiendo las indicaciones propuestas por el método del Número de Curva (Curve Number, CN) propuesto por el Soil Conservation Service (SCS), según la siguiente fórmula:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (11)$$

Nota. Tomado de USDA, 1986.

Donde:

- S: Capacidad de retención (mm)
- CN: Número de curva

El valor de CN se determinó en función del tipo de uso del suelo, grupo hidrológico del suelo (HSG), y condición hidrológica media, con base en la metodología del USDA (1986). Posteriormente, el valor de S se utilizó como parámetro de entrada en la estimación de escorrentía y la caracterización del comportamiento hidrológico de la cuenca.

5.1.7.3 Cálculo del Tiempo de Concentración (Tc)

Para estimar el tiempo de concentración (Tc) de la cuenca, se utilizó la fórmula empírica de Giandotti, recomendada en estudios hidrológicos aplicados a cuencas andinas. Según Vélez Upegui y Botero Gutiérrez (2011), quienes evaluaron diversas fórmulas empíricas (Kirpich, Témez, Passini, Giandotti, entre otras) en una cuenca andina colombiana, la variabilidad de resultados entre métodos es considerable. No obstante, las ecuaciones que integran parámetros morfométricos, como la de Giandotti, ofrecen estimaciones más coherentes con los valores observados.

Se empleó la formulación propuesta por Vélez y Botero (2011), expresada en la Ecuación (12):

$$T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 * \sqrt{S * L}} \quad (12)$$

Nota. Tomado de Vélez y Botero (2011).

Donde T_c es el tiempo de concentración en horas, A representa el área total de la cuenca en kilómetros cuadrados (km²), L corresponde a la longitud del cauce principal en kilómetros (km), y S es la pendiente del cauce principal expresada en metros por metro (m/m).

5.1.7.4 Coeficiente de Almacenamiento

Representa el tiempo característico que tarda el exceso de precipitación en convertirse en escorrentía directa dentro de la cuenca. Para su estimación inicial se aplicó la relación empírica propuesta por Clark (1945), en la cual el coeficiente de almacenamiento se asume como un tercio del tiempo de concentración. Este valor de partida se selecciona en función de la capacidad de retención y la morfología de la cuenca, y posteriormente se ajusta durante el proceso de calibración del modelo para mejorar la concordancia entre los hidrogramas simulados y los observados.

5.1.7.5 Tiempo de retardo

Para la estimación del tiempo de retardo (T_r) de la cuenca, se utilizó la relación empírica propuesta por el Soil Conservation Service (SCS), la cual ha sido ampliamente validada en estudios hidrológicos de cuencas rurales y urbanas de montaña. Según dicha formulación, el tiempo de retardo corresponde al 60% del tiempo de concentración (T_c), como se expresa en la siguiente ecuación:

$$T_r = 0,6T_c \quad (13)$$

Nota: Tomado de Vélez y Botero (2011)

Esta expresión fue seleccionada por su simplicidad y porque ha demostrado proporcionar estimaciones representativas en estudios aplicados a cuencas con condiciones geomorfológicas similares a las de la cuenca del río de Oro, como lo indican Vélez y Botero (2011). Además, su aplicación resulta coherente con el enfoque utilizado en el modelo hidrológico, al mantener una relación proporcional entre ambos tiempos característicos del escurrimiento superficial.

5.1.7.6 Cálculo de la Abstracción Inicial (Ia)

Para la estimación de la esorrentía directa se empleó el método del Número de Curva (Curve Number, CN) del Soil Conservation Service (SCS), el cual requiere como insumo la abstracción inicial (Ia) ver ecuación 14, entendida como la cantidad de agua retenida por el terreno antes de que inicie la esorrentía superficial. Esta incluye la infiltración inicial, la retención superficial y la intercepción por la vegetación.

De acuerdo con el enfoque propuesto por el SCS (USDA, 1986), la abstracción inicial se calcula como una proporción fija de la capacidad potencial máxima de retención del suelo (S), mediante la siguiente expresión:

$$Ia = 0,2 * S \quad (14)$$

Nota: Tomado de USDA, 1986

Este valor fue integrado en el modelo hidrológico dentro de HEC-HMS para cada evento de tormenta, permitiendo una representación realista del comportamiento inicial del suelo frente a la lluvia. La capacidad de retención S se determinó previamente con base en el valor promedio del número de curva calculado para la cuenca, y su uso es coherente con las recomendaciones metodológicas del USDA (1986) y del Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS (2011).

5.1.7.7 Muskingum

Para la determinación de los parámetros del método de enrutamiento de Muskingum, se adoptaron valores iniciales estándar con base en la literatura técnica. El coeficiente de ponderación (X) se asignó dentro del rango recomendado para cauces naturales, comprendido entre 0,1 y 0,3, de acuerdo con lo propuesto por Chow, Maidment y Mays (1988), Subramanya (2008) y el Manual Técnico del HEC-HMS (USACE, 2000), los cuales indican que dichos valores representan condiciones intermedias de almacenamiento y traslación del flujo.

En ausencia de mediciones directas del tiempo de viaje del flujo en los tramos, el parámetro de almacenamiento (K) se estimó inicialmente mediante la relación con el tiempo de concentración (T_c), de acuerdo con la ecuación propuesta por Yoo, Lee y Lee (2017). Esta aproximación permite considerar el tiempo característico de respuesta hidrológica del tramo como una estimación inicial razonable de K , la cual posteriormente se ajustó durante el proceso de calibración.

$$K = \frac{T_c}{2X} \quad (15)$$

Nota. Tomado de Yoo, Lee y Lee (2017)

5.2 Procesamiento de datos hidrometeorológicos y construcción de curvas IDF.

Para caracterizar la dinámica hidrológica de la subcuenca, se llevó a cabo una recopilación de datos, incluyendo información de precipitación y caudales (ver tabla 3).

5.2.1 Recopilación de Datos de Precipitación y Caudales

Los datos de precipitación se obtuvieron de dos estaciones meteorológicas administradas por el IDEAM, ubicadas dentro o cerca de la subcuenca, ver figura 6. Estos registros permitieron

identificar patrones espaciales y temporales de lluvia, para evaluar la disponibilidad hídrica y la probabilidad de eventos extremos.

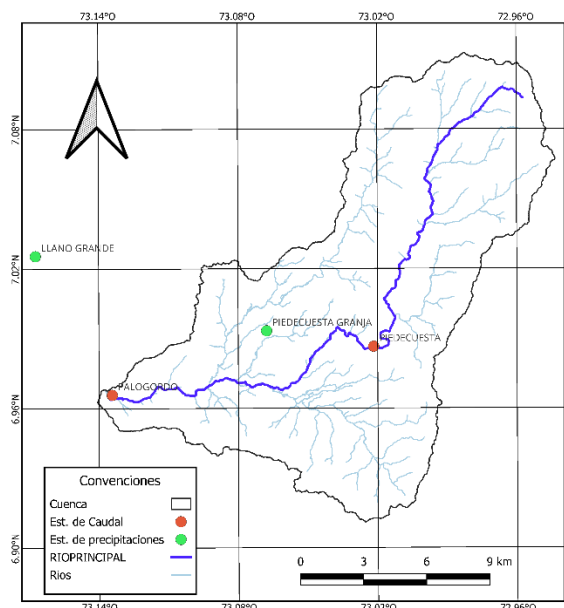
Tabla 3. Estado de información de estaciones (precipitaciones y caudales).

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Categoría	Fecha de instalación	Resolución
23195110	LLANO GRANDE	70,2556	-7,31672	777	Climatológica Ordinaria	15/07/1971	Horario
23190700	PIEDECUESTA GRANJA	69,9333	-7,30678	951	Pluviográfica	15/07/1970	Horario
23190700	PIEDECUESTA	69,9333	-7,30678	951	Limnigráfica	30/09/2018	Máximo diario
23197690	PALOGORDO	69,6916	-7,31305	690	Limnigráfica	01/01/2005	Máximo diario y horario desde el año 2024

Nota. Tomado del catálogo de estaciones del IDEAM

Para el análisis de los caudales, se emplearon datos hidrométricos registrados por el IDEAM en las estaciones PIEDECUESTA y PALOGORDO, seleccionados por su continuidad en los registros y su representatividad dentro de la subcuenca, ver figura 6.

Figura 6. Localización de estaciones Hidrometeorológicas en la cuenca del río Oro Alto.



5.3 Análisis de datos hidrológicos y estructuración de datos

Para la depuración de las series hidrológicas utilizadas, se aplicaron métodos estadísticos para la detección de valores atípicos. El procesamiento se realizó mediante herramientas de Excel. Se utilizaron la prueba de Rosner para múltiples outliers y la prueba de Grubbs para valores extremos individuales. Estas pruebas son aplicadas para identificar y excluir datos anómalos en registros de caudal o precipitación, garantizando la homogeneidad y confiabilidad de las series temporales (Helsel & Hirsch, 2002).

5.3.1 Identificación de Datos Anómalos:

5.3.1.1 Pruebas de Rosner:

La prueba de Rosner es un método estadístico diseñado para la identificación de múltiples valores atípicos dentro de un conjunto de datos. La prueba es válida para tamaños de muestra iguales o superiores a 25 observaciones y asume que los datos provienen de una distribución normal (Gilbert, 1987).

Dado un grupo de observaciones Y_j con $j=1, \dots, N$ donde N es el tamaño total de la muestra, y sospechando la presencia de M valores atípicos, se calcula iterativamente la media y la desviación estándar de las observaciones restantes después de excluir los valores más extremos.

Las ecuaciones utilizadas en este proceso son:

$$\hat{\mu}^{(i)} = \frac{1}{N-i} \sum_{j=1}^{N-i} Y_j \quad (15)$$

Nota. Tomado de Gilbert, 1987.

$$\hat{\sigma}^{(i)} = \sqrt{\frac{1}{N-i} \sum_{j=1}^{N-i} (Y_j - \hat{\mu}^{(i)})^2} \quad (16)$$

Nota. Tomado de Gilbert, 1987.

$Y^{(i)}$ representa la observación más extrema (la más alejada de la media $\hat{\mu}^{(i)}$) en el grupo de observaciones después de que las i observación más extrema han sido removidas de ese grupo. El estadístico para la prueba Rosner se define entonces como:

$$R_{i+1} = \frac{Y^{(i)} - \hat{\mu}^{(i)}}{\hat{\sigma}^{(i)}} \quad (17)$$

Nota. Tomado de Gilbert, 1987.

En donde r_{i+1} es corresponde al estadístico calculado para el siguiente valor potencialmente atípico dentro del conjunto de datos, obtenido a partir de la ecuación (11). A su vez, $\lambda_{i+1}(N, \alpha)$ es el valor crítico asociado a la prueba, el cual depende del número de valores atípicos evaluados, del tamaño total de la muestra N y del nivel de significancia α . Los valores tabulados de $\lambda_{i+1}(N, \alpha)$, se encuentran disponibles en Gilbert (1987, p. 268).

5.3.1.2 Pruebas de Grubbs

Se aplicó la prueba de Grubbs para detección de un único valor atípico por conjunto. Para ello, se ordenaron los valores y se identificó el valor extremo x_n . Y se calculó el estadístico T_n , como:

$$T_n = \frac{(x_n - \bar{x})}{\delta} \quad (18)$$

Nota. Tomado de Grubbs, 1969.

Donde:

x_n es el valor sospechoso de ser atípico,

\bar{x} es la media de la muestra

δ es la desviación estándar

Para identificar valores anómalos, se calculaban los valores de Tn para cada observación utilizando una hoja de cálculo en Excel. Se establecía un nivel de significancia del 5 %, considerando como criterio que Tn no superara un umbral de 2,75.

5.4 Cálculo de hietogramas e hidrogramas para diferentes periodos de retorno

A partir de los registros históricos de precipitación y caudales correspondientes a las estaciones seleccionadas, se calcularon los hietogramas e hidrogramas representativos para eventos con periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Se aplicaron métodos de ajuste estadístico para el análisis de datos extremos, utilizando las herramientas Microsoft Excel y el software libre Hydrognomon. Este procedimiento permitió estimar valores representativos por período de retorno. En cuanto a la precipitación y la construcción de hietogramas, se organizaron las series anuales máximas de precipitación de estaciones climatológicas disponibles en la zona de estudio.

- Se organizaron las series anuales máximas de precipitación de estaciones climatológicas disponibles en la zona de estudio.
- Se aplicaron los modelos probabilísticos de Gumbel y Log-Pearson Tipo III para obtener las precipitaciones asociadas a los períodos de retorno definidos.
- Se construyeron los hietogramas para cada período de retorno.

5.5 Identificación de las series para las tormentas de diseño

Con el fin de complementar el análisis estadístico de eventos extremos mediante modelos probabilísticos, se aplicó una metodología para la identificación y caracterización de tormentas a

partir de series históricas de caudal con resolución horaria. Esta etapa permitió analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca frente a eventos ocurridos.

El procedimiento inició con la selección de la estación hidrometeorológica de referencia Palogordo (Código IDEAM 23127020), ubicada en el municipio de Piedecuesta, departamento de Santander, que cuenta con registros continuos y horarios de caudal y precipitación. Una vez descargada la base de datos, se aplicó un proceso de depuración y validación conforme a lo descrito en etapas anteriores del estudio.

Para la selección de las tormentas de diseño se establecieron los siguientes criterios:

- Aumento sostenido del caudal, evidenciando un incremento continuo y representativo que indicará un evento hidrológico significativo.
- Superación de umbrales definidos con base en los valores límite obtenidos mediante las pruebas estadísticas de detección de datos atípicos (Rosner y Grubbs), con el fin de descartar fluctuaciones menores sin impacto hidrológico real.
- Duración mínima de 24 horas, ajustada a la escala temporal típica de las tormentas de diseño empleadas en modelación hidrológica.
- Intensidad del evento, considerando el valor máximo alcanzado por el caudal durante el periodo, con el objetivo de identificar eventos de alto impacto, incluso si su duración no fue prolongada.

Cada tormenta identificada se organizó en una base de datos que incluyó información como la fecha de inicio y finalización, duración total, número de observaciones válidas y comportamiento temporal del caudal.

5.6 Tratamiento de Datos Faltantes de Precipitación y Caudal

Durante la estructuración de los eventos hidrometeorológicos utilizados para la simulación lluvia–escorrentía, se identificaron registros ausentes en las series horarias de caudal y precipitación. Dado que no se disponía de estaciones cercanas con registros concurrentes para realizar interpolaciones espaciales, se optó por aplicar un método de llenado directo dentro de cada serie (Kougias et al., 2020; Salas, 1993).

La técnica seleccionada fue la media aritmética entre datos horarios adyacentes, una metodología recomendada para series con vacíos puntuales y distribuidos, ya que permite preservar la continuidad, la tendencia local y la coherencia interna de la serie sin introducir sesgos externos. Este método ha sido empleado ampliamente en estudios hidrológicos, especialmente en series de alta resolución temporal, debido a su simplicidad, bajo impacto sobre el volumen total y capacidad para mantener la estructura general del evento (Kougias et al., 2020; Salas, 1993).

5.7 Verificación de coherencia de datos completados

Una vez completado el proceso de estimación de datos faltantes en las series hidrológicas y meteorológicas, se realizó una verificación de coherencia con el objetivo de garantizar que los valores completados mantuvieran la estructura y comportamiento histórico de las series originales.

La verificación de coherencia se abordó desde dos metodologías: el análisis gráfico y el análisis estadístico. Ambos permitieron evaluar la integración de los datos estimados con los registros observados originales, asegurando que no se introdujeran distorsiones significativas en la serie.

5.7.1.1 Comparación gráfica de series originales y completadas

Se elaboraron gráficos de línea y dispersión superpuestos entre las series originales sin datos completados y las series tratadas con datos completados, con el fin de realizar una comparación visual directa. El procedimiento ayuda a la identificación de discontinuidades, cambios bruscos o patrones anómalos que pudieran surgir tras el completado.

Este procedimiento se desarrolló siguiendo la metodología aplicada por Marín Guzmán (2019), quien empleó este enfoque gráfico en sus análisis de series simuladas con el 20 % y el 30 % de datos faltantes, utilizando comparaciones por estación y método de completado.

5.7.1.2 Análisis estadístico de la distribución

Paralelamente, se calcularon estadísticas descriptivas antes y después del completado para evaluar si la estructura estadística de la serie original se había conservado. Las métricas utilizadas incluyeron:

- **Media aritmética:** permitió identificar posibles desplazamientos en el valor central de la serie, facilitando la detección de sesgos introducidos por el proceso de completado (Salas, Delleur, Yevjevich & Lane, 1980).
- **Desviación estándar:** se empleó para analizar la variabilidad natural de los datos y determinar si existieron alteraciones significativas en la dispersión de la serie (Haan, 1977).

5.8 Generación de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Para la construcción de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), se aplicó la metodología establecida en el Manual de Drenaje para Carreteras del Instituto Nacional de Vías

(INVIAS, 2011). Esta metodología permite estimar las intensidades máximas de precipitación en función del período de retorno y la duración del evento, a través de la siguiente ecuación general.

$$i = a * T^b * M^d * \left(\frac{t}{60}\right)^{-c} \quad (19)$$

Nota. Tomado del manual de drenaje para carreteras 2011

Donde i es la intensidad de precipitación (mm/h), T el período de retorno (años), M la precipitación máxima promedio anual en 24 horas (mm), t la duración de la lluvia (minutos), y a , b , c , d son parámetros regionales determinados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

- Se identificó la región hidroclimática correspondiente (Andina) y se aplicaron los siguientes parámetros:

Tabla 4. Coeficientes regionales para el cálculo de curvas IDF

REGIÓN	A	b	c	d
Andina	0,94	0,18	0,66	0,83

Nota. Tomado de la guía metodológica del INVIAS (2011)

- Se aplicó la fórmula para duraciones de 10, 20, 30, 60 y 120 minutos y períodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- Se construyeron las curvas IDF graficando intensidad (mm/h) en el eje Y frente a duración (minutos) en el eje X, para cada período de retorno.

5.9 Hietograma de la tormenta de diseño – Metodología Huff

El método Huff (1967) se empleó para determinar la distribución temporal de la lluvia de diseño a partir de curvas intensidad–duración–frecuencia (IDF). Esta metodología permite representar de forma más realista la variabilidad temporal de las tormentas, ya que se deriva del análisis estadístico de eventos reales de precipitación.

Huff desarrolló curvas de distribución acumulada de precipitación en función del tiempo para diferentes probabilidades (10 %, 50 % y 90 %) y para cuatro cuartiles, los cuales indican el momento en que ocurre el máximo de intensidad dentro de la tormenta. En este estudio se adoptó el primer cuartil con una probabilidad del 50 %, que representa tormentas de pico temprano, típicas de cuencas de respuesta rápida como la del río de Oro Alto (Huff, 1967).

5.9.1.1 Procedimiento aplicado

El procedimiento para construir los hietogramas Huff en este trabajo fue el siguiente:

- Duración de la tormenta (T): Se consideró una duración total de 210 minutos, equivalente a 1.5 veces el tiempo de concentración estimado para la cuenca.
- Intervalo de análisis (Δt): El tiempo total se dividió en intervalos de 10 minutos, con el fin de obtener una resolución temporal adecuada para la modelación hidrológica en HEC-HMS.
- Determinación de intensidades: A partir de las curvas IDF de las estaciones Piedecuesta y Palogordo, se obtuvieron las intensidades medias para una duración de 210 minutos y los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

La precipitación total se calculó mediante la expresión:

$$P_{total} = i \times \frac{T}{60} \quad (20)$$

Nota. Tomado del Huff (1967)

- Distribución temporal ($F(\tau)$): Se empleó la curva de Huff correspondiente al primer cuartil – 50 %, de la cual se extrajeron los valores de porcentaje acumulado de precipitación ($F(\tau)$) en función del porcentaje de tiempo transcurrido ($\tau = t/T$). Estos valores fueron digitalizados y organizados en una tabla con incrementos de 10 minutos.

- Cálculo de la lluvia acumulada y por intervalo: Se calculó la precipitación acumulada (P_{acum}) multiplicando el porcentaje acumulado $F(\tau)$ por la lluvia total P_{total} .
- Luego se determinó la precipitación incremental (ΔP) entre intervalos sucesivos y la intensidad de lluvia (mm/h) según la relación:

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta t} \times 60 \quad (21)$$

Nota. Tomado del Huff (1967)

- Generación de los gráficos: Con los datos obtenidos, se elaboraron en Excel las siguientes gráficas:
 - Hietograma de intensidad (mm/h) vs. tiempo (min): barras verticales que representan la distribución temporal de la intensidad de lluvia.
 - Curva de precipitación acumulada (mm) vs. tiempo (min): línea continua que muestra el aumento progresivo del volumen precipitado.

5.10 Modelo hidrológico, lluvia-escorrentía en HEC-HMS

La modelación lluvia-escorrentía de la cuenca del río de Oro se realizó mediante el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Este programa permite simular la respuesta hidrológica de una cuenca ante diferentes eventos de precipitación, tanto reales como sintéticos, integrando procesos como la pérdida de agua, la transformación lluvia-escorrentía y la propagación del flujo. La versión utilizada corresponde a la 4.10, conforme al HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual USACE. (2021).

5.10.1 *Análisis de sensibilidad*

El análisis de sensibilidad se implementó para evaluar la influencia de los parámetros hidrológicos calibrados sobre el desempeño del modelo lluvia–escorrentía. Se aplicó el procedimiento propuesto por Montalvo, Abril y Vázquez (2014), basado en la variación controlada de cada parámetro, manteniendo constantes las demás variables del sistema.

Como métrica de desempeño se utilizó exclusivamente el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (**NSE**), el cual fue adoptado como **EF₂T**, representando el ajuste global entre el caudal observado y el simulado. A cada parámetro calibrado se le aplicó una variación porcentual definida ($\Delta\theta_i$), generando un nuevo valor (θ_i), y posteriormente se ejecutó la simulación obteniendo un nuevo valor de NSE (**EF₂T_n**). Con estos valores se calcularon la variación relativa del parámetro y del desempeño, y finalmente el coeficiente de sensibilidad, conforme a las ecuaciones (21), (22) y (23).

$$\Delta(\theta) = \frac{\theta_c - \theta_i}{\theta_c} \quad (21)$$

$$\Delta(\text{Sim}) = \frac{\text{EF}_{2T_i} - \text{EF}_{2T_c}}{\text{EF}_{2T_c}} \quad (22)$$

$$\Delta(C) = \frac{\Delta(\text{Sim})}{\Delta(\theta)} \quad (23)$$

Nota. Tomado Montalvo, abril y Vázquez (2014)

5.10.2 *Configuración del modelo lluvia-escorrentía en HEC-HMS*

La configuración del modelo lluvia–escorrentía en HEC-HMS se estructuró con base en los cuatro componentes del sistema: el modelo de cuenca (*Basin Model*), el modelo meteorológico

(*Meteorologic Model*), las especificaciones de control (*Control Specifications*) y las series temporales de entrada (*Time-Series Data*). A continuación, se describen los parámetros y ajustes definidos en cada componente del modelo.

5.10.2.1 Modelo de Cuenca

El modelo de cuenca (Basin Model) en HEC-HMS fue estructurado a partir de una única cuenca principal, subdividida en cinco subcuencas, delimitadas con base en el análisis topográfico, el modelo digital de elevación (MDE) de 12.5 m de resolución y la red de drenaje natural. Esta subdivisión permitió representar con mayor precisión la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos, especialmente en cuanto a las diferencias de pendiente, cobertura del suelo y uso del suelo entre sectores.

Para cada subcuenca se seleccionaron los métodos más apropiados de acuerdo con las características del terreno y la información disponible:

- **Pérdidas:** Se utilizó el método del Número de Curva (CN) propuesto por el Soil Conservation Service (SCS), bajo la condición de humedad antecedente determinada a partir de la precipitación acumulada en los cinco días previos a cada evento, conforme a los criterios establecidos por el USDA-SCS (1972) y las directrices de la Resolución 365 de 2004 del IDEAM.
- **Transformación lluvia–escorrentía:** Se aplicó el método Clark Unit Hydrograph por su capacidad para representar simultáneamente el almacenamiento y la propagación de la escorrentía en cuencas de tamaño medio. Durante la fase de calibración, se evaluaron diferentes alternativas disponibles en HEC-HMS (SCS, Snyder, Nash y Clark), seleccionándose el modelo de Clark por mostrar un mejor ajuste a los hidrogramas observados y generar una

calibración más estable de los parámetros de tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento (USACE, 2021).

- **Routing (Muskingum):** Este método se empleó para simular la propagación del caudal a lo largo del cauce principal, incorporando los efectos de almacenamiento y atenuación entre secciones sucesivas. En su formulación, el modelo Muskingum utiliza los parámetros de tiempo de tránsito K y de ponderación X . Conforme a lo propuesto por Yoo, Lee y Lee (2017), el parámetro K se estimó a partir del tiempo de concentración, dado que representa adecuadamente el tiempo. Por su parte, el parámetro X se definió mediante un procedimiento iterativo dentro del rango permisible (0–0.5).
- **Modelo Meteorológico**

El modelo meteorológico en HEC-HMS fue configurado mediante la opción Gage Weighting, que permite distribuir espacialmente la precipitación proveniente de las estaciones pluviométricas hacia cada subcuenca del modelo. Para esta distribución se utilizaron polígonos de Thiessen, construidos en un sistema de información geográfica (SIG) a partir de las ubicaciones de las estaciones Piedecuesta y Llano Grande. Con base en esta delimitación, las subcuencas 1, 2, 3 y 4 se asociaron a la estación Piedecuesta, mientras que la subcuenca 5 se vinculó a la estación Llano Grande.

La precipitación fue incorporada mediante la opción Specified Hyetograph, que permite ingresar hietogramas específicos basados en la distribución temporal real de la lluvia. Las series temporales de precipitación se estructuraron con un intervalo de 1 hora, correspondiente a los registros observados durante el evento del 29 de abril de 2024, entre las 00:00 y las 23:00 horas. Estas series fueron elaboradas a partir de los datos de las estaciones de Llano Grande y Piedecuesta, asegurando coherencia temporal con la resolución del modelo.

Asimismo, se integró una serie temporal de caudal observado en la estación Piedecuesta, también con resolución horaria y correspondiente al mismo evento. Esta serie fue utilizada para la calibración y comparación entre los hidrogramas simulados y observados. Todas las series meteorológicas se incorporaron al modelo en unidades métricas, siguiendo las recomendaciones técnicas de USACE (2021) y Feldman (2000).

5.10.2.2 Especificaciones de control

Las especificaciones de control en HEC-HMS definen el período total de simulación y el intervalo temporal de cálculo del modelo. En el presente estudio, se creó un conjunto de control denominado "Control 1", en el que se especificó una simulación para el día 29 de abril de 2024, desde las 00:00 hasta las 23:00 horas, cubriendo un total de 24 horas continuas.

El intervalo de simulación fue definido en 1 hora, en coherencia con la resolución temporal de los datos de precipitación y la escala general de respuesta hidrológica de la cuenca. (USACE, 2021).

5.10.3 Calibración del modelo hidrológico:

La calibración del modelo hidrológico en HEC-HMS se realizó utilizando un evento de tormenta real, para el cual se contó con registros completos de precipitación horaria en estaciones meteorológicas representativas y datos de caudal observado en la estación hidrométrica PALOGORDO. Este evento se seleccionó debido a su magnitud y calidad de los datos, lo que lo hizo adecuado como referencia para el proceso de ajuste del modelo.

Durante la calibración, se ajustaron de manera iterativa los parámetros hidrológicos, incluyendo el Número de Curva (CN) de cada subcuenca, dentro de los rangos definidos por el uso del suelo y los grupos hidrológicos del suelo, siguiendo los lineamientos establecidos en la

Resolución 865 de 2004. Asimismo, se modificó el coeficiente de almacenamiento (R) del método de transformación Clark para mejorar la representación del comportamiento hidrológico durante la fase de recesión del hidrograma. Adicionalmente, se calibraron los parámetros K (tiempo de tránsito) y X (factor de ponderación) del método de ruteo Muskingum, ajustándolos mediante un procedimiento iterativo que permitió optimizar la simulación del tránsito de flujo en el cauce principal.

Para evaluar la calidad del ajuste entre los hidrogramas simulados y los observados, se aplicaron criterios estadísticos comúnmente utilizados en la modelación hidrológica, como el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), de acuerdo con las recomendaciones metodológicas propuestas por Moriasi et al. (2007).

5.10.4 Validación del modelo

La validación del modelo hidrológico se llevó a cabo mediante la comparación entre la simulación obtenida para un evento de tormenta distinto al utilizado durante la fase de calibración, aplicando el mismo esquema de modelación. Este procedimiento permitió evaluar la estabilidad del modelo y su capacidad para reproducir adecuadamente la respuesta hidrológica de la cuenca bajo condiciones independientes a las empleadas en el ajuste de parámetros, siguiendo los lineamientos de validación por eventos contrastados planteados por Moriasi et al. (2007).

Ambos eventos fueron seleccionados por la disponibilidad de registros completos y consistentes de precipitación horaria y caudal observado. En cada caso, se conservaron sin modificación los parámetros calibrados previamente, incluyendo el Número de Curva (CN), el tiempo de concentración (T_c), el coeficiente de almacenamiento (R), la constante de recesión y el

caudal base inicial, conforme a las recomendaciones de la U.S. Army Corps of Engineers (2021) en la validación de modelos configurados con el método SCS y la transformación Clark.

Para la validación, se mantuvieron los mismos indicadores estadísticos aplicados durante la calibración (NSE, PBIAS, RMSE, entre otros), siguiendo los lineamientos propuestos por Moriasi et al. (2007). Esto permitió comparar objetivamente el desempeño del modelo entre ambos eventos y verificar su estabilidad ante condiciones hidrometeorológicas distintas.

5.11 Simulación hidrológica y análisis del cambio en el uso del suelo

Con el modelo hidrológico previamente calibrado y validado, se realizaron simulaciones orientadas a analizar la respuesta de la cuenca ante diferentes tormentas de diseño. Para ello, se utilizaron precipitaciones sintéticas derivadas del método de distribución temporal de lluvias propuesto por Huff (1967), seleccionando el primer cuartil como patrón representativo de eventos con alta concentración inicial de intensidad.

Estos hietogramas fueron incorporados al modelo HEC-HMS bajo las mismas condiciones de control temporal utilizadas durante la calibración, siguiendo las especificaciones metodológicas descritas por el Hydrologic Engineering Center (USACE, 2021). Cada combinación de período de retorno y escenario de uso del suelo fue simulada de manera independiente, permitiendo evaluar los cambios en los hidrogramas de salida asociados a modificaciones en la cobertura y su influencia en los caudales de diseño.

6 Resultados y discusiones

6.1 Caracterización morfométrica e hidrológica de la subcuenca del río de Oro

La caracterización morfométrica e hidrológica de la cuenca alta del río de Oro, cuyo punto de salida corresponde a la estación PALOGORDO, (ver Figura 5). Los parámetros geométricos, de relieve, forma y red de drenaje, se calcularon mediante herramientas de análisis geoespacial aplicadas sobre el modelo digital de elevación. Adicionalmente, se estimaron los parámetros hidrológicos requeridos para la modelación en HEC-HMS: el número de curva (CN), el tiempo de concentración (T_c) y el coeficiente de almacenamiento. A continuación, se presentan los resultados del este análisis:

6.1.1 *Parámetros morfométricos*

La caracterización morfométrica de la cuenca del río de Oro muestra una estructura alargada ($K_f = 0,34$; $K_c = 1,63$), lo que implica una concentración progresiva del flujo, coherente con lo reportado en cuencas andinas de Colombia donde las formas alargadas reducen la sincronización de aportes (López-Ramos et al., 2022). La cuenca principal, con 217 km², presenta diferencias marcadas entre subcuencas, desde 81,35 km² (Sub 1) hasta 12,93 km² (Sub 5), lo que explica variaciones en la velocidad con la que se moviliza el caudal hacia el cauce principal se presentan la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros morfométricos de la cuenca del río de Oro

Categoría	Variable	Unidad	Cuenca	Sub 1	Sub 2	Sub 3	Sub 4	Sub 5
Geometría de la cuenca	Área total de la cuenca (A)	km ²	217	81,35	48,02	52,60	22,18	12,93
	Longitud de la cuenca (L)	Km	25,12	19,00	15,60	7,90	17,00	4,50
	Perímetro de la cuenca (P)	Km	85	58,26	33,04	52,63	31,47	16,84
	Ancho promedio (W)	Km	8,64	4,28	3,08	6,66	1,30	2,87
	Area de la parte derecha de la cuenca (Ad)	km ²	97,6	36,61	23,61	22,67	10,98	5,12
Relieve de la cuenca	Pendiente promedio	%	37,6	0,14	0,08	0,11	0,13	0,12
	Elevación mínima	m s.n.m.	854	3598	2189	1751	3092	1378
	Elevación máxima	m s.n.m.	3598	910	910	877	878	854
	Desnivel altitudinal	M	2744	2688,00	1279,00	874,00	2214,00	524,00
	Pendiente del cauce principal	%	11%	14%	8%	11%	13%	12%
Forma de la cuenca	Índice de forma de Horton (Kf)	-	0,34	0,23	0,20	0,84	0,08	0,64
	Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)	-	1,628	1,82	1,35	2,05	1,89	1,32
	Índice de alargamiento (Ra)	-	0,647	1,65	2,65	3,65	4,65	5,65
	Índice de asimetría (IAS)	%	44,98	45,00	49,16	43,10	49,51	39,59
Red de drenaje	Orden del cauce principal	-	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	4,00
	Densidad de drenaje (Dd)	km/km ²	0,82	1,04	0,60	0,82	0,97	0,89

Las pendientes elevadas (37,6 %) y el desnivel altitudinal superior a 2.700 m evidencian un relieve de alta energía, típico de cuencas montañosas. Autores como López-Ramos et al. (2022)

muestran que sistemas con fuertes gradientes altitudinales presentan hidrogramas rápidos y mayor control topográfico, lo cual coincide con el comportamiento observado para el río de Oro. Sub 1 y Sub 4, con mayores pendientes y densidad de drenaje, responden más rápidamente a eventos de lluvia, mientras que Sub 2, con topografía más suave, retiene mayor parte del flujo, una dinámica compatible con cuencas donde la pendiente condiciona la infiltración y el tiempo de respuesta (López-Ramos et al., 2022).

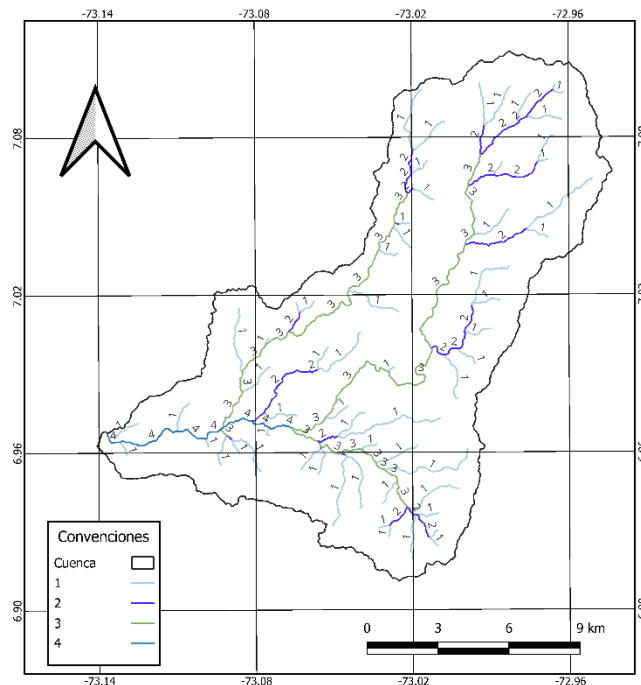
El análisis de forma y asimetría ($Ra = 0,65$; $IAS \approx 45 \%$) confirma un desarrollo moderadamente desequilibrado del drenaje, característico de cuencas con control estructural. La densidad de drenaje ($Dd = 0,82 \text{ km/km}^2$) se clasifica como moderada, pero con variabilidad interna: Sub 1 y Sub 4 superan $0,95 \text{ km/km}^2$, mientras que Sub 2 apenas llega a $0,60 \text{ km/km}^2$. Esto coincide con estudios nacionales donde densidades intermedias se asocian con respuestas rápidas pero no totalmente sincronizadas, especialmente en cuencas andinas con redes fluviales ramificadas (López-Ramos et al., 2022).

En la Figura 7 se observa que la red de drenaje de la cuenca del río de Oro presenta una estructura claramente ramificada, con cauces de hasta cuarto orden que convergen hacia un cauce principal bien definido. Esta organización evidencia una alta conectividad fluvial, coherente con los valores de densidad de drenaje calculados ($Dd = 0,82 \text{ km/km}^2$ en la cuenca principal y valores superiores a $0,95 \text{ km/km}^2$ en subcuencas como la 1 y la 4), y confirma la existencia de múltiples trayectorias de escurrimiento superficial.

En conjunto, la morfometría calculada mediante MDE y análisis cartográfico refleja una cuenca donde la dinámica hidrológica está dominada por el relieve y la estructura de la red de drenaje, un patrón ampliamente documentado en cuencas montañosas colombianas estudiadas por

López-Ramos et al. (2022), lo que valida la coherencia entre los parámetros obtenidos y la respuesta hidrológica esperada.

Figura 7. Red de drenaje de la subcuenca del río de Oro



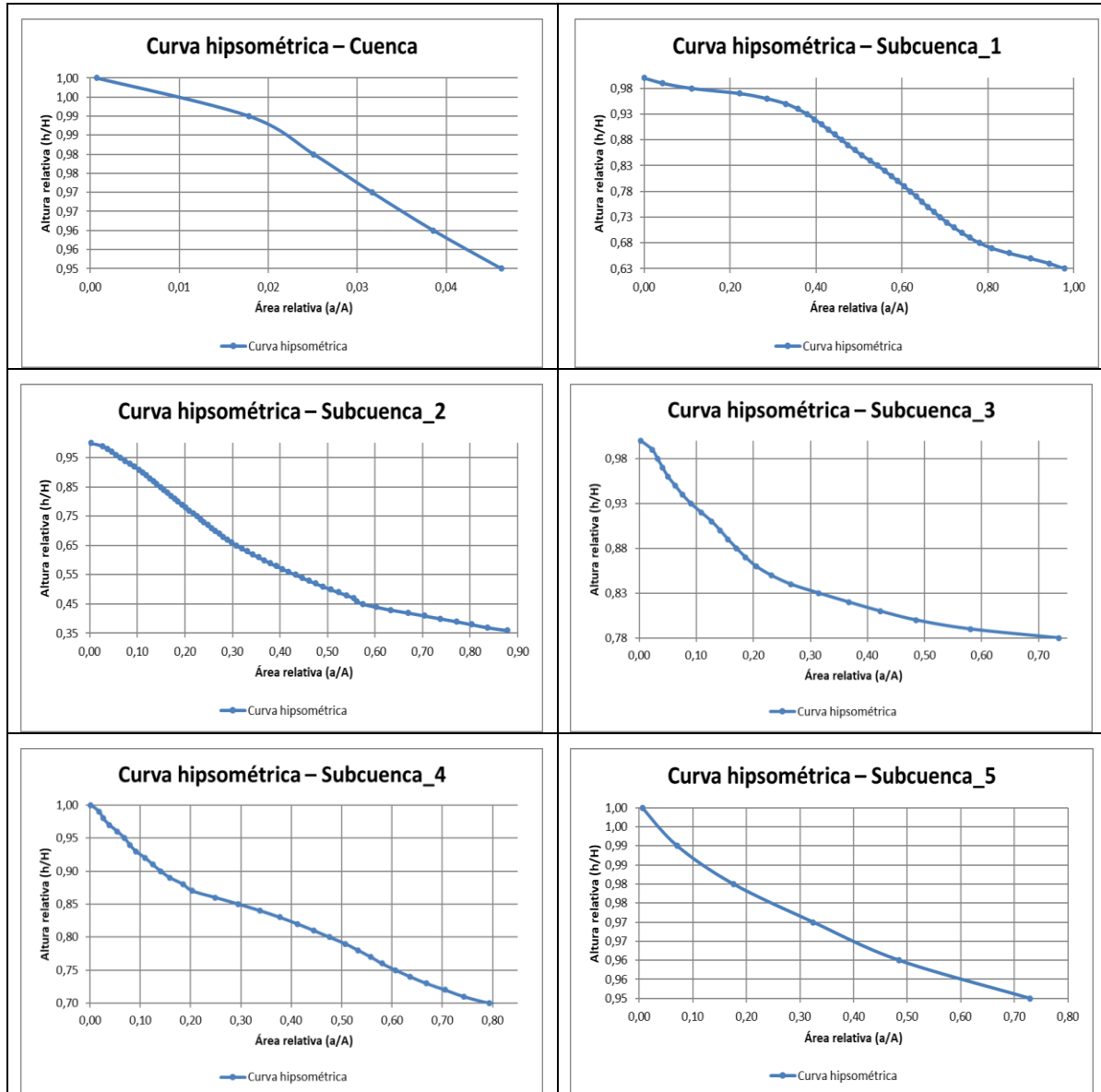
6.1.2 Curva hipsométrica

La Figura 8 muestra las curvas hipsométricas de la cuenca del río de Oro y de sus cinco subcuencas. En todos los casos, las curvas presentan una morfología predominantemente cóncava, lo que indica un relieve erosionado y en etapas avanzadas de evolución geomorfológica. Este tipo de curvas es típico de cuencas maduras, como lo documentan López-Ramos et al. (2022) en el análisis hipsométrico de la cuenca del río Sinú, donde la forma cóncava se asocia con un paisaje estabilizado y ampliamente modificado por la erosión.

En la cuenca principal, la curva desciende de manera continua sin presentar un tramo convexo inicial pronunciado, señalando que gran parte del relieve ha experimentado procesos de

desgaste prolongados. El índice hipsométrico ($HI \approx 0,30$) confirma esta condición de relieve envejecido, valor similar a los reportados por López-Ramos et al. (2022) para cuencas andinas con pendientes suavizadas y altos niveles de disección fluvial.

Figura 8 Curva hipsométrica de la subcuenca del río de Oro.



A nivel de subcuencas, el comportamiento es consistente con la tendencia general. La Subcuenca 1 mantiene una curva cóncava con un descenso progresivo en su tramo medio, lo que sugiere una evolución geomorfológica comparable a la cuenca principal, aunque preserva

secciones altas algo más extendidas. La Subcuenca 4 exhibe un patrón casi idéntico al de la cuenca completa, indicando un relieve igualmente erosionado y la pérdida significativa de zonas topográficas elevadas.

Las Subcuencas 2, 3 y 5 muestran curvas aún más cóncavas, lo que evidencia un mayor grado de desgaste geomorfológico. En estas unidades, la pérdida de volumen topográfico es más marcada, mostrando pendientes suavizadas y un paisaje notablemente degradado. Este comportamiento coincide con el planteamiento de López-Ramos et al. (2022), quienes señalan que hipsometrías muy cóncavas reflejan cuencas con alta erosión y menor energía del relieve, especialmente en zonas con drenaje bien establecido.

En conjunto, la cuenca del río de Oro y sus subcuencas presentan una morfología madura a vieja, dominada por procesos erosivos que han reducido significativamente la energía del relieve. La forma cóncava de todas las curvas confirma un estado geomorfológico avanzado y una dinámica condicionada por la erosión prolongada y la estabilización del paisaje.

6.1.3 Parámetros hidrológicos

Los parámetros hidrológicos se obtuvieron a partir de la combinación entre los usos del suelo, la clasificación hidrológica y la condición de infiltración asociada a cada tipo de suelo. Con esta información se estimó el Número de Curva (CN), así como los parámetros de retención y transformación del escurrimiento.

Tabla 6. CN ponderado de la cuenca

Clasificación hidrológica de los suelos			Año 2020		
Usos suelo	Grupo Suelo	Condición hidrológica	CN	Area	NCi*Ai
Bosque	D	Buena	79	78,13	6172
Cultivos en Hileras	D	Buena	83	57,79	4797
Pasto corte	D	Mala	78	25,95	2024
Pastos de pastoreo	B	Regular	69	31,93	2204
Pavimentos	C	-	74	12,69	939
Rastrojo	D	-	94	10,83	1018
Area Total	-	-	-	217,32	-
CN Ponderado	-	-	-	-	78,93

Este procedimiento es coherente con la aplicación del método SCS-CN en estudios similares, como el desarrollado por Viji et al. (2015), donde la respuesta hidrológica depende directamente de la relación entre cobertura vegetal, tipo de suelo y capacidad de infiltración.

El CN ponderado obtenido para la cuenca (78,93) indica una condición hidrológica de permeabilidad intermedia, donde existe capacidad de infiltración pero también una respuesta rápida cuando las lluvias son intensas. Este comportamiento coincide con lo reportado por Viji et al. (2015), quienes identifican que valores de CN en rangos intermedios generan escorrentías significativas cuando la precipitación supera el almacenamiento inicial del suelo.

Tabla 7. Número de Curva (CN) ponderado por subcuena

Usos de Suelo	TIPO	NC	Subcuena 1		Subcuena 2		Subcuena 3		Subcuena 4		Subcuena 5	
			Area	NCi*Ai	Area	NCi*Ai	Area	NCi*Ai	Area	NCi*Ai	Area	NCi*Ai
Bosque	D	79	39,20	3.097	12,91	1.020	4,14	327	18,56	1.466	3,32	262
Cultivos en Hileras	D	83	17,00	1.411	22,45	1.863	4,44	369	13,00	1.079	0,90	75
Pasto de Corte	D	78	11,37	886	1,93	151	2,81	219	7,97	622	1,88	146
Pastos de pastoreo	B	69	11,04	762	6,34	437	5,95	411	6,29	434	2,32	160
Pavimentos	C	74	2,40	177	1,93	142	4,60	341	3,70	274	0,06	4
Rastrojo	D	94	0,55	51	2,44	229	0,24	22	3,16	297	4,45	418
CN Ponderado			81,55	78,00	48,00	80,00	22,18	76,00	52,68	79,00	12,92	82,00

Las subcuencas 3, 4 y 5 presentan los valores de CN más altos, lo que indica mayor propensión a generar escorrentía superficial. Por el contrario, las subcuencas 1 y 2 muestran valores ligeramente menores, reflejando una mejor capacidad de infiltración.

Tabla 8. Parámetros hidrológicos de la subcuena del río de Oro

Variable	Unidad	Sub-1	Sub-2	Sub-3	Sub-4	Sub-5
Número de curva (CN) ARC I		61,06	63,59	58,07	62,33	67,18
Número de curva (CN) ARC II		78,00	80,00	76,00	79,00	82,00
Número de curva (CN) ARC III		89,35	90,33	88,11	89,85	91,63
Tiempo de Concentracion (Tc)	Horas	1,56	1,79	1,73	1,18	1,15
Capacidad potencial máxima de retención (S)	Mm	70,43	63,22	79,73	66,75	53,95
Coefficiente de almacenamiento (Clark)	Horas	0,52	0,60	0,58	0,39	0,38

La capacidad de retención (S) evidencia diferencias claras entre subcuencas: mientras algunas pueden almacenar mayor humedad inicial, otras alcanzan más rápidamente el punto en que el exceso de lluvia se convierte en escorrentía. Los tiempos de concentración (1,15–1,79 h) y los coeficientes de almacenamiento de Clark (0,38–0,60 h) muestran que la cuenca responde

rápidamente a los eventos lluviosos, como es típico en cuencas de montaña. Viji et al. (2015) también reportan respuestas hidrológicas rápidas en cuencas con pendientes pronunciadas y estructuras de drenaje bien desarrolladas, un comportamiento que coincide con los resultados obtenidos para la subcuenca del río de Oro.

6.2 Análisis de frecuencia de precipitaciones mediante distribuciones de Gumbel y Log-Pearson III

Se analizaron los registros de precipitación máxima anual de las estaciones Llano Grande y Piedecuesta para el periodo 2011–2024, con el fin de determinar los valores extremos. Estos datos se utilizaron para el análisis de frecuencia de precipitaciones, aplicando las distribuciones de Gumbel y Log-Pearson tipo III.

Tabla 9 Datos de precipitaciones máxima de 24 horas por año

Año	LLANO GRANDE (mm)	PIEDECUESTA (mm)
2011	39,5	98,7
2012	30	127,3
2013	28,5	128,5
2014	82,4	88,5
2015	33,7	129
2016	57,4	134
2017	44,2	127,7
2018	83	74,3
2019	80	70
2020	42,6	78
2021	67	92,9
2022	79	106,5
2023	109,8	126,5
2024	67,8	114,5

Nota. Información tomada por el IDEAM

En la estación Llano Grande, los valores más altos se presentaron en los años 2011 y 2023, con 182 mm y 109,8 mm, mientras que los menores ocurrieron en 2012 y 2013. Por su parte, en la estación Piedecuesta, los registros más elevados se concentraron entre 2015 y 2024 (ver Tabla 9).

Con base en estos datos, se calcularon las precipitaciones máximas para distintos periodos de retorno. Según lo presentado en la Tabla 10 (Log-Pearson III) y la Tabla 11 (Gumbel), ambas distribuciones coincidieron los valores estimados para periodos de retorno cortos (2 y 5 años), pero comenzaron a diferenciarse progresivamente en los eventos de mayor recurrencia. En LLANO GRANDE, para un Tr de 100 años, Log-Pearson III estimó 186,80 mm, mientras que Gumbel arrojó 178,22 mm.

Tabla 10 Distribución Log Pearson Tipo III

Tr (años)	LLANO GRANDE (mm)	PIEDECUESTA (mm)
2	55,33	103,84
5	94,45	119,72
10	115,61	133,70
25	143,41	150,41
50	164,83	162,30
100	186,80	173,79

Tabla 11 Distribución Gumbel

Tr (años)	LLANO GRANDE	PIEDECUESTA
2	65,33	95,84
5	95,55	117,11
10	115,56	131,19
25	140,84	148,98
50	159,60	162,18
100	178,22	175,28

Figura 9 Distribución de probabilidad Precipitaciones Máximas Anuales LLANO GRANDE

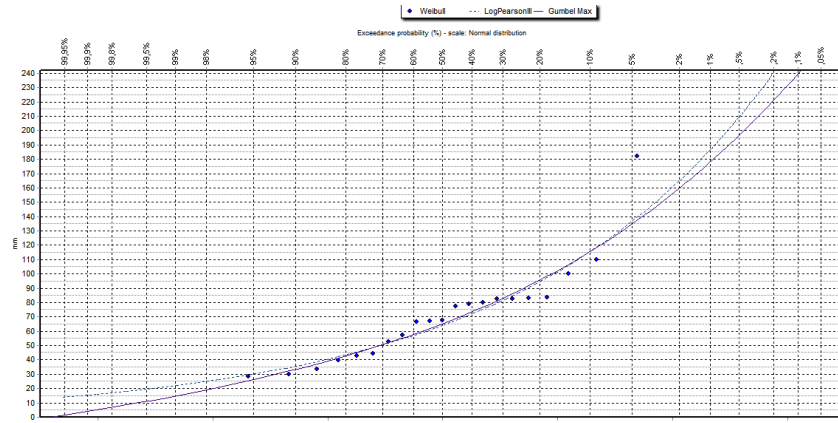
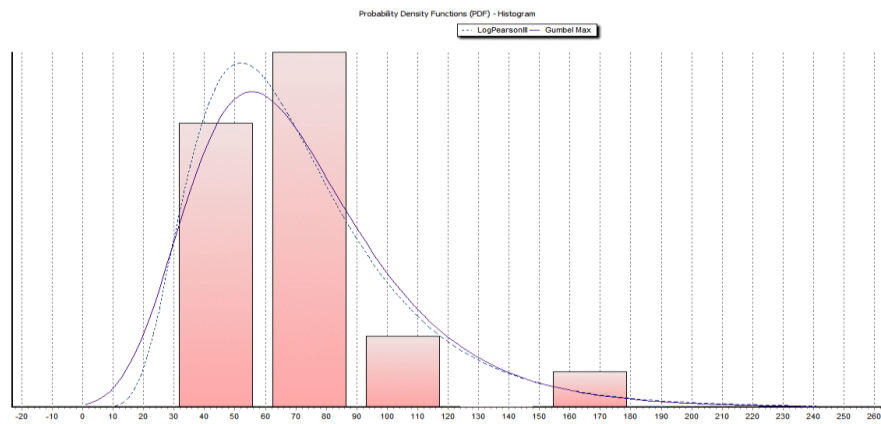


Figura 10 Distribución de frecuencias para Precipitaciones Máximas Anuales LLANO GRANDE



La Figura 9 y 10 mostró la distribución anual de los máximos registrados en la estación LLANO GRANDE. Los valores oscilaron ampliamente a lo largo del periodo analizado, sin una tendencia clara.

En la Figura 11 y 12, correspondiente a la estación PIEDECUESTA, se observó una mayor estabilidad en los últimos años, aunque con la presencia de picos significativos que indicaron la recurrencia de eventos intensos.

Figura 11 Distribución de probabilidad Precipitaciones Máximas Anuales PIEDECUESTA

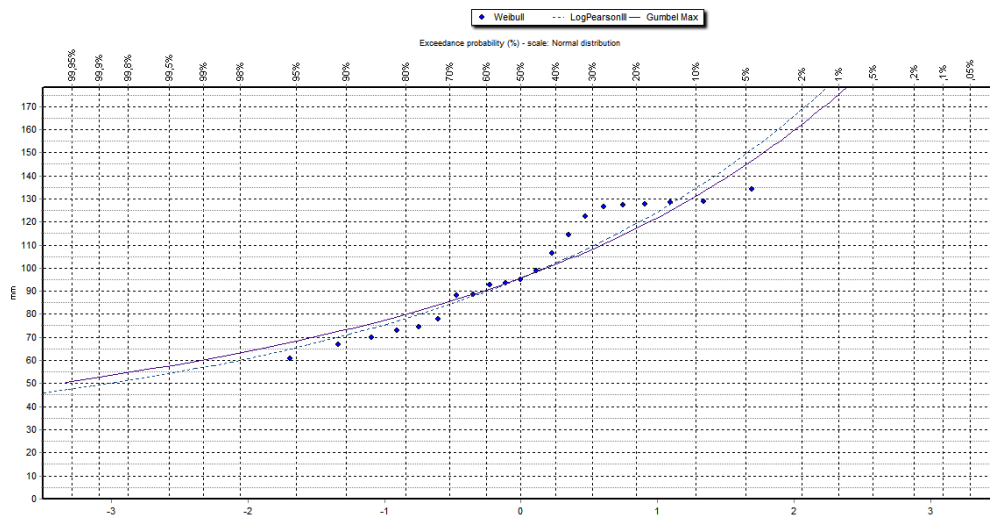
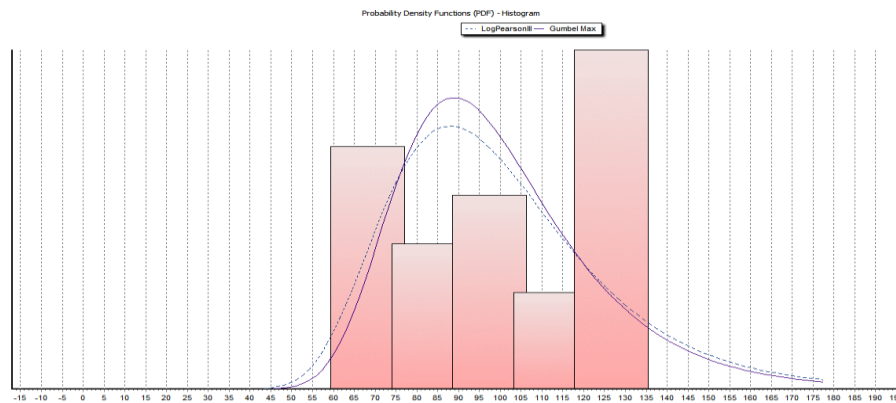


Figura 12 Distribución de frecuencias Precipitaciones Máximas Anuales PIEDECUESTA



6.3 Identificación y análisis de tormentas específicas

Se seleccionó la estación PALOGORDO como punto de referencia para el análisis de tormentas, debido a su disponibilidad de registros continuos de caudales horarios y a la extensión de su serie histórica. A partir de dicha estación, se consolidó una base de datos con más de 78.000 registros horarios de caudal, los cuales se sometieron a un proceso de depuración estadística. Para identificar observaciones atípicas, se aplicaron las pruebas de Grubbs y Rosner.

Como resultado del análisis, se identificaron 29 eventos hidrológicos extremos con duraciones entre 24 y 96 horas, asociados a tormentas o crecidas súbitas que afectaron la subcuenca

del río de Oro. En la Tabla 12 se listan las fechas correspondientes a los últimos seis eventos registrados entre 2017 y 2024.

Posteriormente, se extrajeron los registros de precipitación horaria correspondientes a las mismas fechas, utilizando las estaciones LLANO GRANDE y PIEDECUESTA, que cuentan con datos horarios disponibles. En las Tablas 13 y 14 se presentan los registros para cada evento en dichas estaciones.

Tabla 12. Fechas de los eventos hidrológicos extremos seleccionados.

Serie	Fecha de inicio	Fecha de finalización	DATOS
23	10/11/2017 0:00	10/11/2017 23:00	24
24	17/11/2017 0:00	17/11/2017 23:00	24
25	28/04/2023 13:00	29/04/2023 12:00	24
26	22/06/2023 13:00	23/06/2023 12:00	24
27	1/02/2024 0:00	1/02/2024 23:00	24
28	29/04/2024 0:00	29/04/2024 23:00	24
29	4/05/2024 0:00	4/05/2024 23:00	24

Tabla 13 Tormentas de la estación Llano grande

Serie	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Datos
23	2017/11/10 01:20:00	2017-11-10 04:20:00	19
25	2023/04/29 23:30:00	2023-04-30 16:50:00	18
27	2024/02/01 06:00:00	2024-02-01 10:50:00	23
28	2024/04/29 00:00:00	2024-04-29 06:40:00	35
29	2024/05/04 01:40:00	2024-05-04 10:00:00	56
29	2024/05/04 21:10:00	2024-05-07 23:40:00	14

Tabla 14 Tormentas de la estación Piedecuesta

Serie	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Datos
27	2024/02/01 05:10:00	2024-02-01 10:00:00	30
28	2024/04/29 00:00:00	2024-04-29 06:20:00	35
29	2024/05/04 00:00:00	2024-05-04 09:40:00	56
29	2024/05/04 20:30:00	2024-05-04 23:10:00	14

6.3.1 Selección de eventos críticos

Con el fin de realizar la calibración y validación del modelo hidrológico en HEC-HMS, se seleccionaron aquellas tormentas en las que coincidieran registros horarios de precipitación y caudal en las mismas fechas. Este cruce permitió identificar dos eventos críticos con información completa y representativa para el análisis lluvia–escorrentía (ver Tabla 15).

Tabla 15 Tormentas seleccionadas con coincidencia de datos de caudal y precipitación

Tormenta	Fecha de inicio	Fecha de finalización
1	2024-02-01 00:00:00	2024-02-01 23:00:00
2	2024-04-29 00:00:00	2024-04-29 23:00:00

Estos dos eventos constituyen la base empírica para la simulación hidrológica en HEC-HMS, y se utilizaron en las etapas de calibración, validación y análisis de sensibilidad del modelo.

6.3.2 Completado de datos faltantes de las series de tiempo de Tormentas

Durante el análisis de los eventos seleccionados, se identificaron vacíos de información en las series horarias de caudal y precipitación, lo que afectó la preparación de los datos de entrada para la simulación en HEC-HMS.

En total, se completaron 2 registros de caudal en la estación PALOGORDO y 12 registros de precipitación entre las estaciones de LLANO GRANDE y PIEDECUESTA.

En la Tabla 16 se presenta el resumen de los registros completados para caudal en la estación PALOGORDO. Las Tablas 17 y 18 recogen los registros interpolados para las precipitaciones en las estaciones LLANO GRANDE y PIEDECUESTA, respectivamente.

Tabla 16 Datos completados de caudales de la Estación PALOGORDO

Serie	Fecha de inicio	Fecha de finalización	DATOS	DATOS COMPLETADOS	%
1	1/02/2024 0:00	1/02/2024 23:00	24	1	4
2	29/04/2024 0:00	29/04/2024 23:00	24	1	4

Tabla 17 Datos completados de precipitaciones de la Estación Llano Grande

Serie	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Datos	DATOS COMPLETADOS	%
1	2024-02-01 00:00:00	2024-02-01 23:50:00	144	5	3
2	2024-04-29 00:00:00	2024-04-29 23:50:00	144	3	2

Tabla 18 Datos completados de precipitaciones de la Estación Piedecuesta

Serie	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Datos	DATOS COMPLETADOS	%
1	2024-02-01 00:00:00	2024-02-01 23:50:00	144	0	0
2	2024-04-29 00:00:00	2024-04-29 23:50:00	144	4	3

Los porcentajes de datos completados fueron bajos (máximo del 4 %) y no afectaron de manera significativa la estructura de los eventos de tormenta.

6.3.3 Verificación de coherencia de los datos completados Tormentas

Una vez completado el procedimiento de llenado de datos faltantes en las series horarias de caudal y precipitación, se llevó a cabo un proceso de verificación de coherencia con el propósito de validar la integración de los valores estimados.

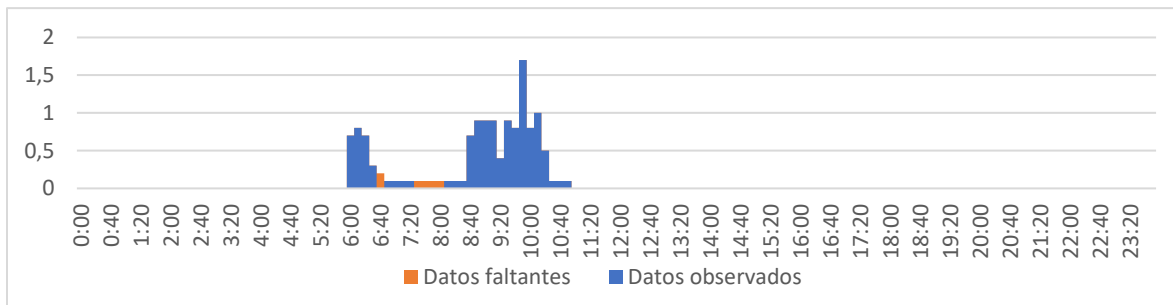
6.3.3.1 Análisis gráfico

Se elaboraron gráficos comparativos que representan la distribución de los datos reales y los valores completados durante cada uno de los eventos. En ellos se identifican visualmente los puntos imputados y su comportamiento respecto al patrón del hietograma o hidrograma original. Las figuras 12 a 17 presentan la verificación gráfica correspondiente a las dos tormentas analizadas, tanto para caudales (estación Piedecuesta) como para precipitaciones (estaciones Llano Grande y Piedecuesta).

6.3.3.1.1 Tormenta 1 – 1 de febrero de 2024

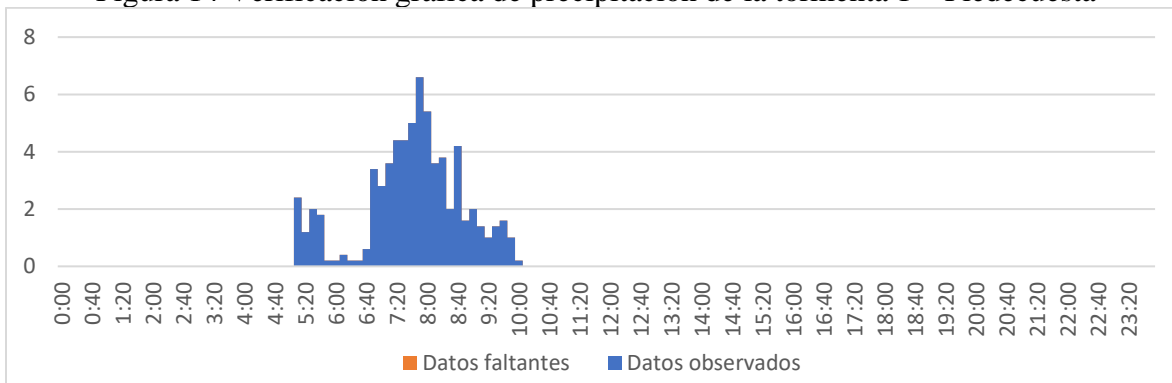
Durante la tormenta 1, se identificaron cinco datos faltantes en la estación Llano Grande, los cuales se completaron mediante media aritmética. En la Figura 13 se observa que los valores incluidos se integran armónicamente al hietograma, sin generar saltos abruptos ni alterar los picos del evento.

Figura 13 Verificación de datos de precipitación de la tormenta 1 – Llano Grande



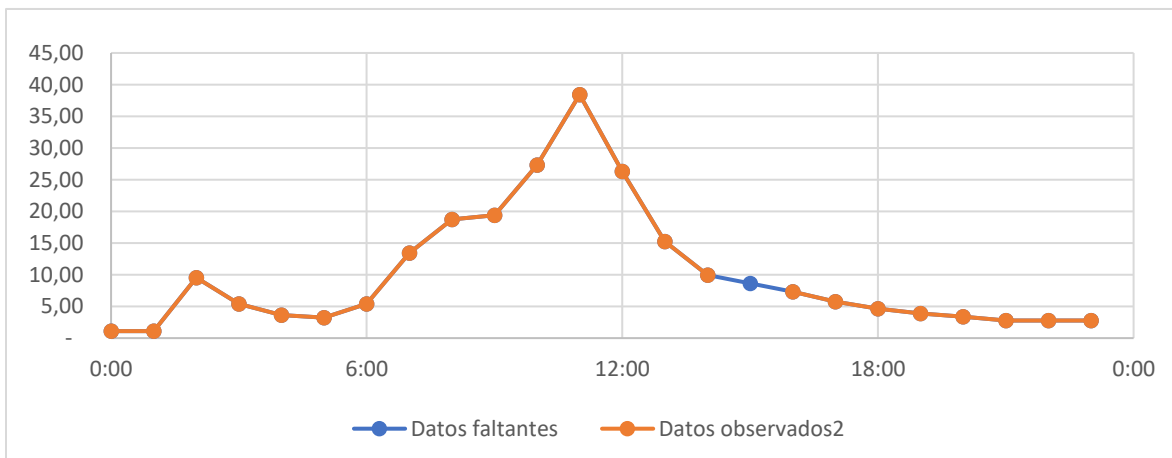
En la estación Piedecuesta no se identificaron datos faltantes durante esta tormenta; sin embargo, se presenta el hietograma completo en la Figura 14 como control de consistencia. La gráfica confirmó que los datos originales mantienen una evolución coherente, sin interrupciones ni anomalías en la secuencia horaria.

Figura 14 Verificación gráfica de precipitación de la tormenta 1 – Piedecuesta



El análisis de caudal en la estación Piedecuesta muestra un solo valor completado. En la Figura 15 se aprecia que dicho valor se encuentra inmerso dentro de un tramo de ascenso progresivo, siguiendo la tendencia general del hietograma. No se observan distorsiones en el pico ni en el volumen de escorrentía generado.

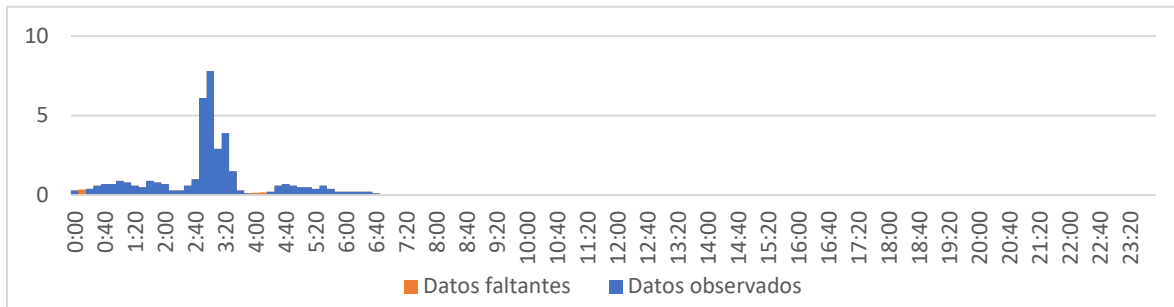
Figura 15 Verificación gráfica del caudal de la tormenta 1 – Piedecuesta



6.3.3.1.2 Tormenta 2 – 29 de abril de 2024

Para la tormenta 2, se completaron tres datos en la estación Llano Grande. En la Figura 16, se observa que los valores completados se localizan en tramos intermedios del hietograma y mantienen la pendiente natural del evento. La coherencia de la curva se conserva, sin afectar el momento ni la magnitud de la precipitación máxima.

Figura 16 Verificación de datos de precipitación de la tormenta 2 – Llano Grande



En la estación Piedecuesta, los cuatro datos completados corresponden a horas dispersas dentro del evento. La Figura 17 muestra que la estructura general del hietograma no se ve alterada por la imputación, y los valores estimados se ubican dentro del rango esperado de intensidades para esta tormenta.

Figura 17 Verificación gráfica de precipitación de la tormenta 2 – Piedecuesta

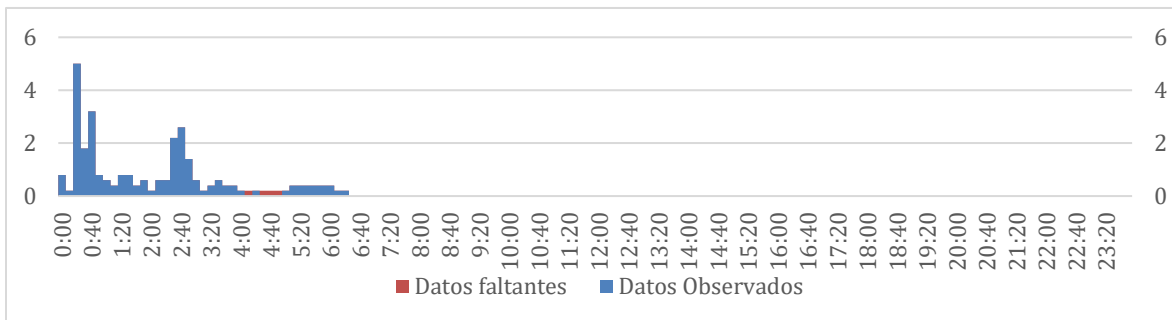
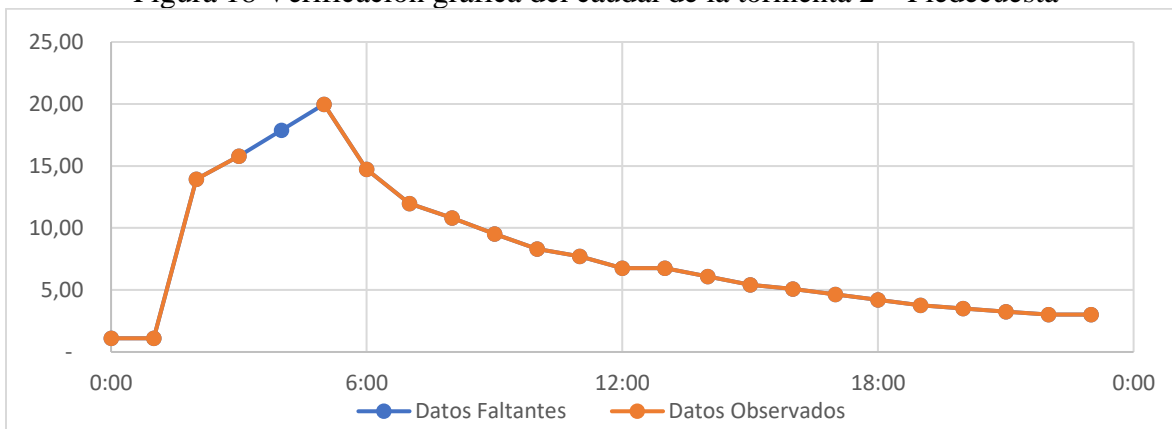


Figura 18 Verificación gráfica del caudal de la tormenta 2 – Piedecuesta



El hietograma correspondiente al evento del 29 de abril en la estación Piedecuesta presentó un solo valor faltante. Como se aprecia en la Figura 18, el dato imputado sigue la forma recesiva de la curva de caudal y no introduce ningún cambio significativo en la evolución del flujo.

6.3.3.2 Análisis estadístico

Para verificar la coherencia estadística de los datos completados, se compararon los valores de media y desviación estándar de las series horarias de caudal y precipitación antes y después de la imputación. En la mayoría de los casos, los porcentajes de datos faltantes fueron bajos y las diferencias en los parámetros estadísticos resultaron mínimas, lo que confirmó que el procedimiento aplicado.

Durante la tormenta 1, por ejemplo, la serie de caudales en la estación Piedecuesta presentó un llenado del 4 %, con un leve aumento en la media (de 10.01 a 10.07) y un cambio marginal en la desviación estándar (de 9,69 a 9,90). En la estación Llano Grande, con un 3 % de datos faltantes en precipitación, los valores también se mantuvieron estables (media 0,09; desviación estándar de 0.27 a 0.26). En cuanto a la estación Piedecuesta para precipitación, no se presentaron datos faltantes y, por tanto, no se registraron cambios.

En la tormenta 2, los registros de caudal en Piedecuesta también presentaron un 4 % de datos completados, con una leve disminución en la media (de 7,85 a 7,42) y en la desviación estándar (de 5.36 a 5.03), lo que sugiere que el dato imputado fue coherente con el comportamiento general del evento. Las estaciones de precipitación, tanto en Llano Grande como en Piedecuesta, mostraron variaciones menores al 1 % en sus parámetros, confirmando que la estructura de los eventos se conservó.

Estos resultados se resumen en la Tabla 19, donde se presentan los valores estadísticos antes y después del llenado de datos faltantes.

Tabla 19. Verificación estadística antes y después del llenado de datos faltantes

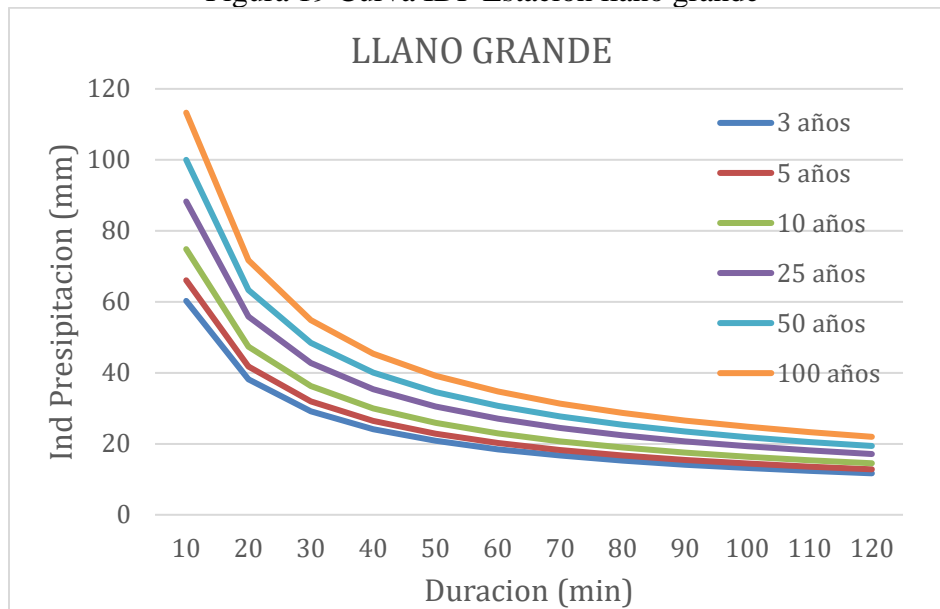
Tormenta	Estación	Parámetro	Datos	Datos faltantes	%	Media Antes	Media Después	Desviación estándar antes	Desviación estándar después
1	Piedecuesta	Caudal	24	1	4 %	10,01	10,07	9,69	9,90
	Llano Grande	Precipitaciones	144	5	3 %	0,09	0,09	0,27	0,26
	Piedecuesta	Precipitaciones	144	0	0 %	0,48	0,48	1,23	1,23
2	Piedecuesta	Caudal	24	1	4 %	7,85	7,42	5,36	5,03
	Llano Grande	Precipitaciones	144	3	2 %	0,27	0,27	0,94	0,93
	Piedecuesta	Precipitaciones	144	4	3 %	0,21	0,21	0,62	0,61

6.4 Curva Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF)

Los resultados mostraron, en ambas estaciones, una relación inversa clara entre la duración del evento y la intensidad de la precipitación. La coherencia de las curvas IDF se evaluó con base en el marco teórico y en el método simplificado establecido por el Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS (2011), el cual es ampliamente utilizado en Colombia para el diseño hidrológico de cuencas donde no se dispone de registros pluviográficos de alta resolución o de series continuas de precipitación.

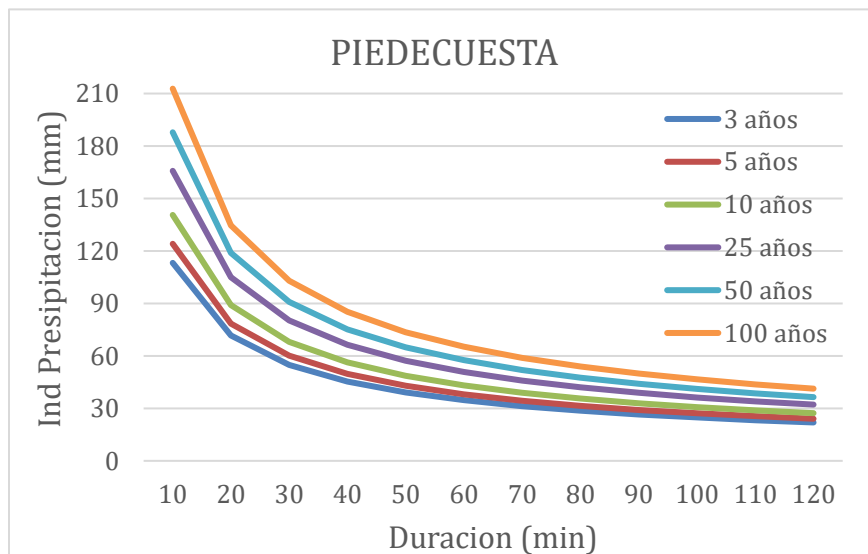
En el caso de Llano Grande, las curvas IDF (ver Figura 18) mostraron valores de intensidad moderados para diferentes periodos de retorno. Para eventos cortos de 10 a 30 minutos, las intensidades oscilaron entre 60 y 75 mm/h, con una marcada disminución a medida que aumentaba la duración, alcanzando 11 mm/h en eventos de 120 minutos. En los periodos de retorno más largos, como 100 años, la intensidad máxima alcanzó 113 mm/h en 10 minutos, lo que evidenció un potencial de lluvia extrema relativamente bajo.

Figura 19 Curva IDF Estación llano grande



En contraste, las curvas IDF de Piedecuesta (ver Figura 19) presentaron las mayores intensidades de precipitación, con valores que oscilaron entre 113 y 140 mm/h para duraciones de 10 a 30 minutos.

Figura 20 Curva IDF Estación Piedecuesta

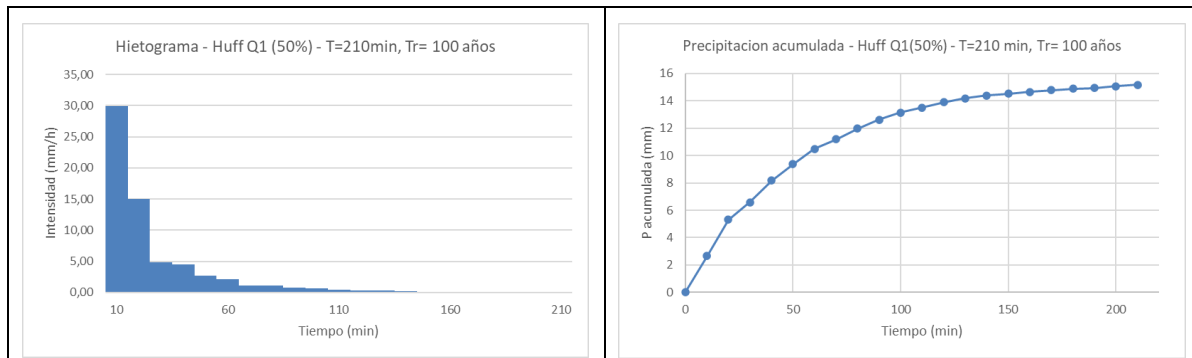


En general, se confirmó que la estación de Piedecuesta registraba la mayor susceptibilidad a lluvias torrenciales, mientras que Llano Grande mostró una exposición menor a eventos extremos.

6.5 Hietograma de la tormenta de diseño – Metodología Huff

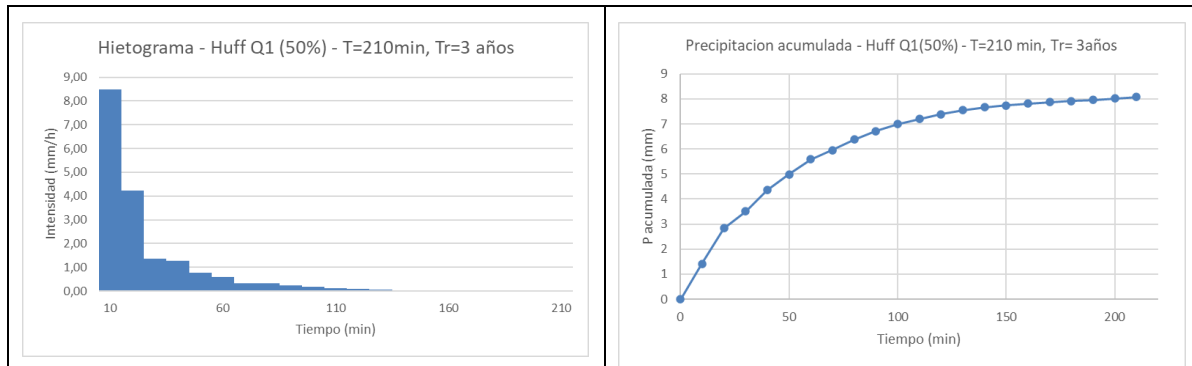
En general, los eventos tipo Huff Q1 (50 %) muestran una fuerte concentración de lluvia durante el primer tercio del temporal, seguida de una disminución progresiva de la intensidad. Este patrón se asocia a tormentas convectivas intensas, típicas de regiones montañosas, en las cuales la mayor descarga pluviométrica ocurre en los primeros minutos del evento.

Figura 21 Hietograma y precipitación acumulada – Estación Piedecuesta (Huff Q1–50 %, Tr = 100 años)



La Estación Piedecuesta presenta las mayores intensidades máximas, alcanzando valores cercanos a 15,9 mm/h, y una precipitación total aproximada de 15 mm en 210 min. Cerca del 70 % del volumen total ocurre antes de la primera hora, evidenciando un comportamiento torrencial de rápida respuesta hidrológica.

Figura 22 Hietograma y precipitación acumulada – Estación Llano Grande (Huff Q1–50 %, Tr = 3 años)



En contraste, la Estación Llano Grande muestra intensidades iniciales alrededor de 8 mm/h y una precipitación total cercana a 8 mm. Su curva de acumulación es más gradual, estabilizándose hacia los 150 min, lo que refleja eventos frecuentes de baja severidad, típicos de lluvias regionales de moderada duración.

En conjunto, los hietogramas obtenidos mediante el patrón Huff Q1 reproducen adecuadamente la concentración inicial de la lluvia observada en eventos convectivos de zonas montañosas. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Serna Arbeláez y Ortiz Gómez (2020), quienes encontraron que, en estaciones pluviográficas de Boyacá, las tormentas de mayor energía también concentran la mayor parte de la precipitación en el primer tercio del evento.

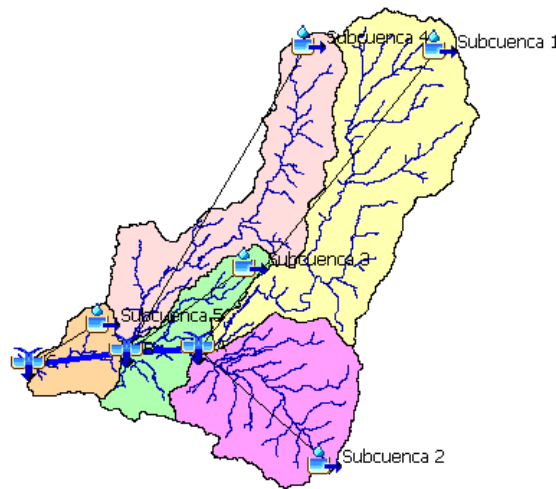
6.6 Modelación lluvia–escorrentía en HEC-HMS

Este apartado presenta los resultados de la modelación lluvia–escorrentía realizada en HEC-HMS, considerando variaciones en la cobertura del suelo reflejadas en diferentes valores del número de curva (CN) y distintos escenarios de precipitación asociados a períodos de retorno específicos (Tr). Se analizan los caudales simulados por subcuenca, en la cuenca completa y en la bocatoma, así como el efecto de los cambios en el CN sobre la respuesta hidrológica.

6.6.1 Configuración del modelo

La cuenca se dividió en cinco subcuencas con base en los principales divisores topográficos y las zonas de aporte definidas a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM). Todas las subcuencas drenan hacia la estación hidrométrica PALOGORDO, que se utilizó como punto de calibración del modelo hidrológico, al ser la única con registros horarios de caudal disponibles. La Subcuenca 1 corresponde a la bocatoma La Colina. Esta segmentación permitió asociar condiciones de uso del suelo y parámetros morfométricos. La Figura 24 muestra la distribución espacial de las subcuencas, la red de drenaje y los puntos de control utilizados en la simulación (Chow, 1988).

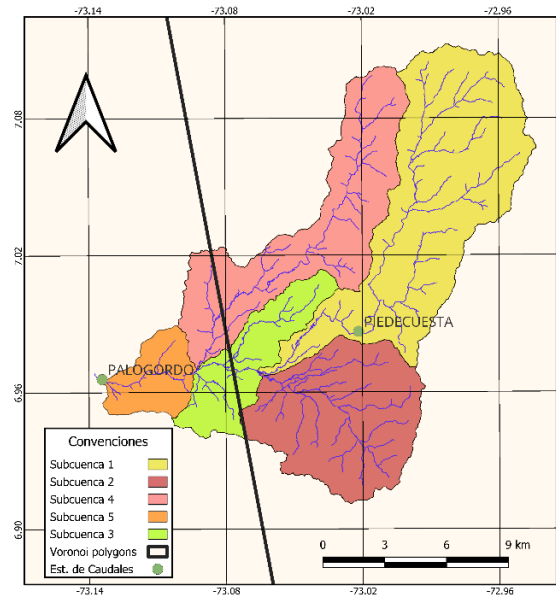
Figura 23 División de la cuenca en subcuencas para el modelo hidrológico



La asignación de estaciones pluviométricas a cada subcuenca se realizó mediante el método de polígonos de Thiessen (Ver figura 25), con el fin de garantizar una representación espacialmente adecuada de la precipitación. Según este análisis, las subcuencas 1, 2, 3 y 4 quedaron asociadas a la estación meteorológica Piedecuesta, mientras que la subcuenca 5 se vinculó a la estación Llano

Grande, de acuerdo con su localización dentro del polígono correspondiente y la cobertura de datos disponible (Chow, Maidment y Mays, 1988).

Figura 24 Polígonos de Thiessen



Los parámetros iniciales del modelo se calcularon a partir de las características físicas y morfométricas de cada subcuenca. Los valores del número de curva en condición media (CN II) oscilaron entre 75,00 y 82,48. A partir de estos valores se estimaron los CN I y CN III mediante los factores de conversión del método SCS, los cuales dependen de la Condición de Humedad Antecedente (AMC) del evento analizado. De esta manera, para cada subcuenca se obtuvieron los valores de CN bajo suelo seco (AMC I), humedad promedio (AMC II) y suelo húmedo (AMC III), que posteriormente fueron utilizados en el método de pérdidas del modelo HEC-HMS (SCS-CN).

Tabla 20. Parámetros iniciales por subcuenca para la configuración del modelo

Subcuenca	Área (m ²)	Longitud (m)	Pendiente (%)
1	81,35	19	14 %
2	48,02	15,6	8 %
3	52,6	7,9	11 %
4	22,18	17	13 %
5	12,93	4,5	12 %

La Tabla 21 presenta los parámetros iniciales utilizados en HEC-HMS para cada subcuenca. En el módulo de pérdidas (SCS-CN) se incluyen el Número de Curva (CN), la abstracción inicial (Ia, mm) calculada con la relación estándar, y el porcentaje de área impermeable. En el módulo de transformación (Clark) se reportan el tiempo de concentración (Tc) y el coeficiente de almacenamiento (R).

Tabla 21. Parámetros iniciales insertados en HEC-HMS

Subcuenca	LOSS SCS Curve Number			Clark Unit Hydrograph	
	Initial Abstraction	CN	Impervious	Tiempo de Concentracion (HR)	Storage Coefficient (HR)
1	36,90	59		1,56	0,52
2	31,06	62,06		1,79	0,60
3	29,21	63,49		1,73	0,58
4	32,95	60,65		1,18	0,39
5	25,65	66,45		1,15	0,38

La Tabla 22 presenta los parámetros empleados para los tramos de conducción, modelados mediante el método de Muskingum. En esta etapa se asignaron valores iniciales estándar, definidos con base en fuentes bibliográficas y configuraciones de referencia (Chow et al., 1988; Subramanya, 2008; USACE, 2000; Yoo et al., 2017).

Tabla 22 Reach Muskingum

Tramos	Initial Discharge	K (h)	X (adimensional)
A – B	2	3	0,1
B – C	2	4	0,1

6.6.2 *Análisis de sensibilidad.*

El análisis de sensibilidad se realizó con el fin de identificar los parámetros que ejercen mayor influencia en la respuesta del modelo hidrológico. Para ello, se aplicó una variación del ± 10 % sobre los parámetros calibrados principales, evaluando el efecto en el caudal pico simulado.

Los resultados evidencian que el Número de Curva (CN) presenta el mayor coeficiente de sensibilidad ($-214,734$), lo que indica que pequeñas variaciones en este parámetro generan cambios significativos en el caudal pico. Este comportamiento coincide con lo reportado por Rey-Valencia y Zambrano (2016) en su estudio sobre cuencas urbanas de montaña en Manizales, donde encontraron que el uso del suelo ejerce mayor control sobre la respuesta hidrológica que las pendientes, debido al aumento del área impermeabilizada y la reducción de infiltración. Esta misma tendencia se refleja en el presente análisis, dado que el CN sintetiza las condiciones de infiltración y permeabilidad del suelo, factores determinantes en la generación de escorrentía superficial.

Tabla 23. Coeficientes de sensibilidad total (δ)

Parámetro Calibrado	Δs	Sensibilidad
Numero Curva (CN)	-214,734	Alta
Tiempo de Concentracion	0,196	Baja
Coefficiente de Almacenamiento (HR)	0,321	Moderada

El coeficiente de almacenamiento (0,321) muestra una sensibilidad media, afectando principalmente la forma y atenuación del hidrograma, mientras que el tiempo de concentración

(0,196) presenta baja sensibilidad, lo que indica que pequeñas variaciones en este parámetro no modifican significativamente la respuesta del modelo. Este patrón también es consistente con lo observado por Rey-Valencia y Zambrano (2016), quienes resaltan que en cuencas con alta impermeabilización, los procesos de retención y regulación del hidrograma tienen un papel secundario frente al control dominante del uso del suelo y la cobertura.

6.6.3 Calibración y validación del modelo

Los valores ajustados permitieron obtener un comportamiento estable durante la calibración, lo cual se refleja en los parámetros presentados en la Tabla 24. Estos valores proporcionaron una adecuada representación de la respuesta hidrológica del evento de referencia.

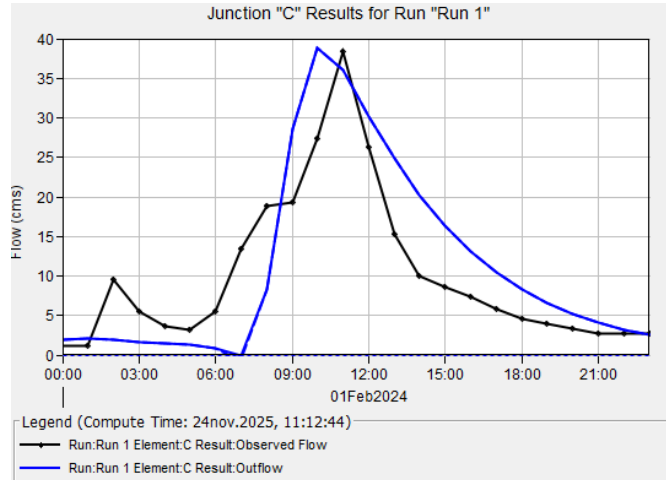
Tabla 24. Parámetros calibrados.

LOSS SCS Curve Number		
Initial Abstraction	CN	Impervious
36,90	59,00	
31,06	62,06	
29,21	63,49	
32,95	60,65	
25,65	66,45	5

Durante la calibración, el modelo mostró un desempeño satisfactorio, alcanzando un NSE de 0,676, lo que indica buena correspondencia entre los hidrogramas simulado y observado. El caudal pico simulado (36,6 m³/s) se mantuvo cercano al observado (38,4 m³/s), y aunque el volumen simulado (926,6 mm) fue mayor que el observado (858 mm), el PBIAS de 7,91 % evidencia una sobrestimación moderada. Estos resultados se encuentran por encima de los reportados por Pérez Téllez y Hernández Gaitán (2025) en la microcuenca del sistema regional Botello (NSE = 0,35; PBIAS = -2,69 %) y son comparables a los obtenidos por Arenas-Bautista

et al. (2017) en el valle medio del Magdalena (NSE = 0,62). La Figura 25 muestra gráficamente esta correspondencia adecuada entre los hidrogramas.

Figura 25 Hidrograma comparativo entre el caudal simulado y observado – Curva de calibración



Nota. Generado por el programa HEC HMS

Los parámetros hidráulicos empleados en los tramos de cauce se resumen en la Tabla 25, la cual debe ubicarse inmediatamente después del párrafo donde se mencionan los reaches (insertar aquí la tabla). Estos valores permitieron mantener la continuidad del flujo entre las subcuencas y complementan la coherencia del hidrograma durante la calibración.

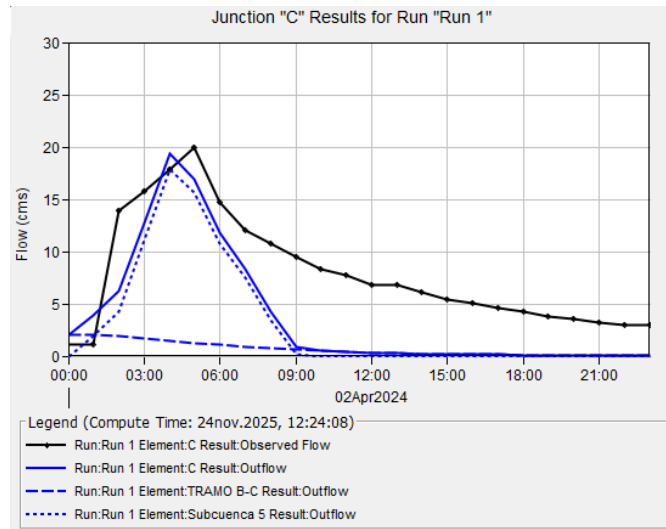
Tabla 25 Parámetros hidráulicos para los reaches en HEC-HMS

Reach	Initial Discharge	K (h)	X (adimensional)
Tramos A – B	2	3	0,1
Tramos B – C	2	4,2	0,1

En la validación, el comportamiento del modelo disminuyó de manera significativa. Aunque se conservó la estructura general de la respuesta, el caudal pico simulado (27,5 m³/s) fue considerablemente mayor que el observado (20 m³/s), y el volumen simulado (607 mm) superó ampliamente el volumen observado (402 mm). Estas diferencias generaron un NSE cercano a 0 y un PBIAS de -40,20 %, indicando una sobreestimación marcada tanto del caudal como del

volumen. Este desempeño contrasta con lo observado por Urrutia Rivas (2025) en las cuencas de los ríos Coello y Dagua, donde, pese a la reducción lógica del desempeño en validación, los valores permanecen dentro de rangos aceptables (NSE entre 0,53 y 0,40) y no alcanzan niveles de eficiencia nula.

Figura 26 Hidrograma comparativo entre el caudal simulado y observado – Curva de validación



Nota. Generado por el programa HEC HMS

La Tabla 26 resume los indicadores de desempeño obtenidos para ambas tormentas. En términos generales, el modelo refleja un ajuste sólido durante la calibración, reproduciendo adecuadamente la forma del hidrograma y el volumen bajo condiciones de baja humedad antecedente. Sin embargo, la validación confirma una sensibilidad elevada a eventos con características diferentes.

Tabla 26 Indicadores de desempeño del modelo hidrológico por tormenta

Indicador	Calibrado	Validación
	Tormenta 1	Tormenta 2
Q pico simulado (m ³ /s)	36,6	27,5
Q pico observado (m ³ /s)	38,4	20
Volumen simulado (mm)	926,6	607
Volumen observado (mm)	858	402
NSE	0,676	0
PBIAS	7,91%	-40,20%

Nota: Solo fue necesario calibrar los parámetros CN, Initial Abstraction, K y X. Los demás parámetros permanecieron sin modificación respecto a la configuración inicial. El volumen se expresa como lámina de escorrentía acumulada (mm).

6.7 Simulación con lluvias sintéticas para diferentes períodos de retorno

Para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de diseño, se desarrollaron simulaciones en HEC-HMS utilizando lluvias sintéticas basadas en el hietograma de Huff (1967) correspondiente al primer cuartil (Q1), el cual representa tormentas con alta concentración de precipitación en las fases iniciales. Los resultados permiten analizar el comportamiento del caudal pico tanto en la cuenca completa como en la bocatoma bajo tres condiciones de humedad antecedente (CN I, CN II y CN III).

6.7.1 Caudales simulados en la cuenca completa

En la cuenca completa, los resultados muestran un aumento progresivo del caudal pico conforme incrementa el período de retorno, manteniendo un comportamiento estable en los escenarios CN I y CN II. Para estos dos casos, los valores obtenidos son prácticamente iguales desde TR=3 hasta TR=50 años, pasando de 4,3 m³/s a 5,9 m³/s, lo cual indica que la cuenca conserva su capacidad de infiltración bajo condiciones de humedad baja y media.

Tabla 27. Caudales pico (m^3/s) simulados en la cuenca completa para los tres escenarios

TR (años)	CN I (%)	CN II (%)	CN III (%)
3	4,3	4,3	6,9
5	4,5	4,5	8,9
10	4,9	4,9	12,4
25	5,4	5,4	18,6
50	5,9	5,9	24,5
100	6,5	7,5	31,7

El escenario CN III presenta el incremento más marcado: el caudal pico pasa de $6,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR=3 años) a $31,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR=100 años), resultado que evidencia la sensibilidad extrema del sistema cuando el suelo se encuentra saturado. Este comportamiento es coherente con estudios desarrollados en cuencas de montaña en Santander, donde se ha documentado que la saturación reduce drásticamente la capacidad de almacenamiento e incrementa la escorrentía directa (Bagos & Hurtado, 2017; Plazas & Pedraza, 2020).

Asimismo, Urrutia (2025) señala que bajo condiciones de humedad alta los modelos hidrológicos muestran una amplificación significativa en los picos de caudal, especialmente en regiones con alta pendiente y suelos poco profundos, reafirmando el patrón observado en este estudio.

6.7.2 *Análisis hidrológico en la bocatoma*

En la bocatoma, la magnitud de los caudales refleja la capacidad de la cuenca alta para transmitir y concentrar aportes generados por eventos extremos. En CN I no se registran caudales representativos para ningún período de retorno, lo que indica que bajo condiciones secas la infiltración domina completamente el proceso de generación de escorrentía.

En CN II, la respuesta comienza a ser apreciable desde TR=5 años, con $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, aumentando hasta $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ en TR=100 años. Aunque los valores son bajos, representan

incrementos relevantes para el diseño de captación, confirmando que la humedad media puede generar aportes graduales.

El escenario CN III concentra los mayores aportes. Los caudales aumentan desde 1,2 m³/s (TR=3 años) hasta 6,3 m³/s (TR=100 años), reflejando nuevamente el papel dominante de la saturación del suelo en la cuenca alta. Este comportamiento coincide con los resultados de Plazas & Pedraza (2020), donde la saturación del terreno en microcuencas montañosas del Playón generó aumentos bruscos en los picos de caudal, incluso bajo eventos de retorno moderado.

Tabla 28 Caudales pico (m³/s) en la bocatoma según CN de cada escenario.

TR (años)	CN I (%)	CN II (%)	CN III (%)
3	0	0	1,2
5	0	0,1	1,6
10	0	0,2	2,4
25	0	0,5	3,6
50	0	1	4,8
100	0	1,1	6,3

En conjunto, la bocatoma solo recibe caudales significativos bajo condiciones de CN III, lo cual demuestra que la saturación previa del suelo es el factor crítico en la generación de aportes hacia la captación.

Los resultados obtenidos confirman que el comportamiento hidrológico de la cuenca está fuertemente condicionado por la humedad antecedente del suelo. La similitud entre CN I y CN II demuestra que, mientras el terreno conserve capacidad de infiltración, la respuesta hidrológica permanece estable aun cuando el evento de lluvia aumenta en intensidad. Este patrón ha sido documentado en cuencas andinas por Urrutia (2025), quien concluye que los incrementos en el período de retorno no necesariamente generan aumentos drásticos en los caudales si las condiciones de almacenamiento del suelo no han sido sobrepasadas.

Por el contrario, el escenario CN III evidencia un cambio abrupto en la dinámica de generación de escorrentía. La saturación elimina el efecto regulador del suelo y convierte la precipitación en escorrentía directa, amplificando los picos de caudal hasta en cinco veces respecto a CN II. Este efecto ha sido ampliamente reportado en cuencas montañosas de Santander (Bagos & Hurtado, 2017) y en estudios de modelación hidrológica e inundación para microcuencas torrenciales (Plazas & Pedraza, 2020), donde la combinación de pendientes pronunciadas, suelos delgados y alta intensidad de lluvia acelera la concentración del flujo y reduce la amortiguación natural del sistema.

En la bocatoma, la tendencia es coherente con la observada en la cuenca completa, pero con aportes menores debido a la mayor distancia y a la mayor dispersión del flujo en la parte alta. Aun así, para TR altos y suelos saturados, los caudales alcanzan valores que requieren consideración en el diseño de obras de captación, confirmando que la saturación es el factor determinante en la transmisión del flujo hacia la infraestructura de abastecimiento.

Estos resultados fortalecen la validez del modelo implementado y demuestran que el análisis de escenarios con distintas condiciones de humedad antecedente es fundamental para el diseño hidráulico, la gestión del riesgo y la planificación del recurso hídrico.

7 Conclusiones

Con base en los parámetros morfométricos e hidrológicos analizados, la cuenca presenta una forma alargada e irregular, lo cual la hace menos susceptible a crecidas rápidas y picos de caudal elevados. No obstante, esta condición se ve compensada por un relieve escarpado y de alta pendiente, que favorece la escorrentía superficial y eleva el riesgo de erosión del suelo. La baja densidad de drenaje indica una red fluvial poco desarrollada, posiblemente asociada a una mayor capacidad de infiltración y a la alta permeabilidad de los suelos. Estos factores, combinados con

un número de curva elevado ($CN II = 79,64$) y un almacenamiento potencial relativamente bajo ($S = 64,94$ mm), reflejan condiciones que pueden incrementar la susceptibilidad a crecidas súbitas durante eventos de lluvia intensos.

Las curvas IDF generadas a partir de los datos históricos de las estaciones Piedecuesta y Llano Grande permitieron caracterizar la intensidad de eventos extremos bajo diferentes periodos de retorno. La estación Piedecuesta mostró intensidades significativamente más altas, especialmente en eventos cortos, lo que indica mayor susceptibilidad a respuestas hidrológicas bruscas. Las curvas de diseño construidos por el método de HFF confirmaron esta tendencia. La selección de la distribución Log-Pearson III, aunque más conservadora para eventos extremos, debe ser contrastada con la Gumbel para evitar sobreestimaciones o subestimaciones en el diseño.

El modelo HEC-HMS fue calibrado utilizando la tormenta del 1 de febrero de 2024 (Tormenta 2), alcanzando un ajuste aceptable, con un valor de NSE superior a 0,5 que indica un desempeño adecuado, aunque con precisión moderada. Posteriormente, se validó con la tormenta del 29 de abril de 2024 (Tormenta 2), obteniéndose un PBIAS inferior, lo que respalda la confiabilidad del modelo para representar adecuadamente eventos reales de escorrentía en la cuenca.

El análisis de sensibilidad demostró que el número de curva (CN) es el parámetro más influyente en la generación de escorrentía, seguido del tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento. Esta alta sensibilidad resalta la importancia de asignar correctamente los valores de CN, sobre todo cuando se evalúan escenarios de cambio de uso del suelo. No obstante, el modelo no incorpora procesos de modelación hidráulica que permitan verificar si los caudales simulados superan la capacidad del cauce.

La respuesta hidrológica no es uniforme en toda la cuenca. El análisis por subcuenca reveló que la sensibilidad a los cambios en el CN varía según la unidad espacial. Algunas subcuencas, como la 2 y la 3, mostraron mayor variabilidad en los valores de CN, lo que sugiere que podrían ser prioritarias para implementar medidas de manejo del suelo.

La magnitud de la tormenta (TR) y las condiciones de humedad antecedente ejercen un efecto multiplicador en la respuesta hidrológica. En todos los escenarios simulados, a mayor periodo de retorno o mayor humedad inicial del suelo, se registraron incrementos significativos en los caudales pico. Esto resalta la importancia de incorporar distintos escenarios climáticos y condiciones iniciales en los procesos de planificación y gestión del recurso hídrico.

El punto de captación (bocatoma) también experimenta efectos derivados del cambio en el uso del suelo. Aunque los incrementos de caudal en este punto son menores que los observados a nivel de cuenca, los escenarios con mayor escorrentía muestran aumentos significativos, lo que implica un riesgo potencial para la infraestructura hidráulica y la seguridad en el abastecimiento hídrico.

Los resultados de las simulaciones con lluvias sintéticas muestran que la respuesta hidrológica de la cuenca está fuertemente condicionada por la humedad antecedente, siendo el escenario CN III el más crítico en términos de generación de caudales pico. A nivel de cuenca, los incrementos son significativos, especialmente para periodos de retorno altos ($TR \geq 50$ años), donde los caudales pueden multiplicarse hasta por cinco respecto a CN II.

En la bocatoma, la presencia de aportes relevantes solo se manifiesta bajo CN III, lo cual indica que el sistema de captación solo se ve comprometido en eventos extremos y bajo condiciones de saturación del suelo. Esto resalta la necesidad de considerar escenarios

conservadores en la planificación y diseño de infraestructura hidráulica, así como en la gestión del riesgo para eventos de baja frecuencia y alta severidad.

Finalmente, se reconocen limitaciones asociadas a la calidad de los datos históricos, la resolución espacial del uso del suelo, y la ausencia de modelación hidráulica del cauce. Se recomienda hacer estudios complementarios para evaluar la capacidad de conducción del río, validar escenarios extremos con modelación acoplada hidrológica-hidráulica, e incorporar análisis de incertidumbre más profundos en futuras investigaciones.

8 Recomendaciones

Efectuar un análisis detallado de la capacidad hidráulica de la infraestructura de captación ante caudales proyectados para eventos con periodos de retorno mayores a 25 años, a fin de identificar puntos críticos de posible desbordamiento y establecer medidas de reforzamiento o rediseño. Este análisis debe considerar los escenarios de pérdida de cobertura boscosa, dado su impacto significativo en el incremento del caudal pico.

Implementar estrategias de conservación y restauración de cobertura boscosa en la zona de captación, dado que su pérdida incrementa significativamente la esorrentía y los caudales pico. Se sugieren acciones como incentivos para prácticas agroforestales, delimitación de zonas de protección hídrica y control del crecimiento urbano no planificado.

Integrar el modelo hidrológico calibrado en HEC-HMS con herramientas como HEC-RAS, a fin de simular niveles de agua y posibles desbordamientos en puntos críticos, especialmente en la bocatoma y zonas aguas abajo. Esta integración permitirá una evaluación más completa de las amenazas por inundación.

Incorporar análisis de incertidumbre y escenarios de cambio climático en futuras simulaciones, con el fin de fortalecer la planificación adaptativa en la gestión del recurso hídrico. Asimismo, se recomienda mejorar la densidad y resolución de las series pluviográficas para refinar las curvas IDF y los hietogramas de diseño.

Implementar un sistema de monitoreo continuo del cambio de uso del suelo en la zona de captación, utilizando sensores remotos y análisis multitemporal. Esto permitirá actualizar periódicamente los valores del número de curva (CN) y mantener la vigencia del modelo hidrológico.

Diseñar un plan de manejo de esorrentía para escenarios de urbanización futura, que incluya obras de control como zanjas de infiltración, cunetas revestidas y reservorios temporales, tomando como base los caudales simulados en este estudio.

9 Referencias Bibliográficas

- Acosta Castellanos, P. M., & Sierra Aponte, L. X. (2013). Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 22(35), 25-33.
- Arce, S. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca del río Lucre y su influencia en la dinámica hídrica de la región. Dialnet, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5339474.pdf>
- ArcGeek. (2022). ArcGeek Calculator: Complemento para análisis hidrológicos en QGIS [Software complementario]. Recuperado de <https://arcgeek.blogspot.com/>
- Arenas-Bautista, A., Jiménez-Leal, W., & Zell, C. (2017). Hydrological modelling the Middle Magdalena Valley (Colombia). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/323074560_Hydrological_Modelling_the_Middle_Magdalena_Valley_Colombia
- ASP Colombia. (2023). 3.9 Riesgo de desastres y cambio climático. En ASP Colombia 2023 (pp. 1–56). ASP Colombia
- Blanco-Chávez, M. E. (2023). Efecto del cambio de uso del suelo sobre el hidrograma de crecida en la microcuenca del cauce 31 de diciembre, Managua. *Arquitectura +*, 8(16), 33-53. <https://doi.org/10.5377/arquitectura.v8i16.17127>
- Caracol Radio. (2023, 29 de abril). Van 150 familias afectadas por el desbordamiento de la quebrada en Piedecuesta. Recuperado de <https://caracol.com.co/2023/04/29/van-150-familias-afectadas-por-el-desbordamiento-de-la-quebrada-en-piedecuesta/>

- Choquehuanca Huanca, A. (1999). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Lucre. *Espacio y Desarrollo*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Clark, C. O. (1945). Storage and the unit hydrograph. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 110(1), 1419–1446.
- Del Águila, S., & Mejía, A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(2). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-12>
- Feldman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Frontiers in Water. (2024). Rainfall–runoff modeling based on HEC-HMS model: A case study in an area with increased groundwater discharge potential. *Frontiers in Water*, 6, 1474990. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1474990>
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Reinhold.
- Giraldo-Osorio, J. D., González-Pérez, C., & Poveda, G. (2022). Analysis of ENSO-Driven Variability, and Long-Term Changes in Extreme Precipitation Indices over Colombia. *Water*, 14(11), 1733. <https://doi.org/10.3390/w14111733>
- Grubbs, F. E. (1969). Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, 11(1), 1–21.
- Haan, C. T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Ames, Iowa: Iowa State University Press.

- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). Statistical Methods in Water Resources (Techniques of Water-Resources Investigations, Book 4, Chapter A3). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/twri04A3>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370.
- Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3(4), 1007–1019. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- Hussain, I. (2020). Outlier Detection using Nonparametric Depth-Based Techniques in Hydrology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 11(9). The Science and Information (SAI) Organization.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2016). Mapa de Suelos por Departamentos. Bogotá D.C. Recuperado de <https://geoportal.igac.gov.co>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2018). Cobertura de la Tierra 100K – Periodo 2018 [Datos geográficos]. Colombia en Mapas. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Instituto Nacional de Vías. (2011). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas>
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2023). ALOS PALSAR Radiometrically Terrain Corrected (RTC) DEM, 12.5 m [Data set]. Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center (ASF DAAC). <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-radiometrically-terrain-corrected-rtc/>

- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape* (2^a ed.). Prentice Hall.
- Kougias, I., Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2020). A comparison of methods for the infilling of missing rainfall data in the context of flood modeling. *Water*, 12(5), 1370. <https://doi.org/10.3390/w12051370>
- López-Ramos, A., Medrano-Barboza, J. P., Martínez-Acosta, L., Acuña, G. J., Remolina-López, J. F., & López-Lambraño, A. A. (2022). Assessment of morphometric parameters as the basis for hydrological inferences: A case study from the Sinú River Basin in Colombia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(9), 459. <https://doi.org/10.3390/ijgi11090459>
- Lozano-Rivas, W. A. (2018). *Clima, hidrología y meteorología: Para ciencias ambientales e ingeniería*. Ecoe Ediciones.
- Marín Guzmán, A. (2019). *Evaluación de métodos de completado y extensión de series temporales hidrológicas y meteorológicas en estaciones de las cuencas de los ríos Reventazón, Pirrís y Toro* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. Repositorio Institucional UCR. <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/>
- McCuen, R. H. (2005). *Hydrologic Analysis and Design* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Meshram, S. G., Tiwari, K., Mohit, H., & Chouhan, P. K. (2017). Prioritization of watershed through morphometric parameters. *Applied Water Science*, 7(5), 2221-2232. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0332-9>

- Montalvo, F., Abril, A., & Vázquez, J. A. (2014). Evaluación de la sensibilidad de parámetros en modelos hidrológicos distribuidos: aplicación del modelo HEC-HMS a una cuenca tropical. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 35(2), 45-58.
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Ochoa–Tocachi, B. F., Arias, S., Crespo, P., De Bièvre, B., & Buytaert, W. (2018). Información bioclimática y topográfica para modelación hidrológica. En *Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural* (p. 76). Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica.
- ONU-Hábitat. (2015). Sequías, tormentas e inundaciones: El agua y el cambio climático dominan la lista de desastres. ONU-Hábitat. Recuperado de <https://onu-habitat.org/index.php/sequias-tormentas-e-inundaciones-el-agua-y-el-cambio-climatico-dominan-la-lista-de-desastres>
- Pérez Téllez, M. A., & Hernández Gaitán, J. A. (2025). Estimación hidrológica del sistema regional Botello (Cundinamarca, Colombia) bajo escenarios de cambio climático. Universidad de Cundinamarca. <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/items/a795d9bd-7b54-4ace-a06f-e1491c648ea4>
- Pianosi, F., & Wagener, T. (2016). Understanding the time-varying importance of different uncertainty sources in hydrological modelling using global sensitivity analysis. *Hydrological Processes*, 30(14), 2686–2703. <https://doi.org/10.1002/hyp.10786>

- Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P. (2022). Informe de gestión y operación del sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de Piedecuesta. Piedecuesta, Santander: Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios.
- Pike, R. J., & Wilson, S. E. (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4), 1079–1084.
- QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System (Version 3.40.4) [Software de sistema de información geográfica]. Open Source Geospatial Foundation Project. Recuperado de <https://www.qgis.org>
- Ramírez López, P. A., & Velasco Mateus, K. D. (2019). Modelación hidrológica a la cuenca El Hato (Cundinamarca): comparando los diferentes resultados de pérdidas por infiltración utilizando la herramienta computacional HEC-HMS [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia].
- Rey-Valencia, D., & Zambrano, J. (2016). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 254–266.
- Salas, J. D. (1993). Analysis and modeling of hydrologic time series. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of Hydrology* (pp. 19.1–19.72). McGraw-Hill.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., & Lane, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications.
- Sánchez-Núñez, J. M., Serrano Flores, M. E., Sangermán Jarquín, D. M., Navarro Bravo, A., Vera Alejandre, G. R., Cuevas Sánchez, J. A., & Macías Vázquez, J. L. (2011).

- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5), 597–646.
- Semana. (2022, 13 septiembre). Piedecuesta, Santander, se encuentra sin agua por las fuertes lluvias. Recuperado de <https://www.semana.com/nacion/bucaramanga/articulo/piedecuesta-santander-se-encuentra-sin-agua-por-las-fuertes-lluvias/202215/>
- Serna Arbeláez, C. O., & Ortiz Gómez, C. A. (2020). Evaluación del desarrollo temporal de las precipitaciones en 13 estaciones pluviográficas del departamento de Boyacá a través de la metodología de Huff [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Shekar, P. R., & Mathew, A. (2023). Morphometric analysis of watersheds: A comprehensive review of data sources, quality and geospatial techniques. *Watershed Ecology and the Environment*, 6, 13–25.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. *Handbook of Applied Hydrology*, 4(39), 76-97. San Francisco: W. H. Freeman.
- Suárez-Aguilar, Z. E., Sepúlveda-Delgado, O., Patarroyo-Mesa, M., & Canaria-Camargo, L. C. (2020). Modelo matemático para estimar curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvias extremas en Tunja, Colombia. *Información Tecnológica*, 31(1), 193–202. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100193>

Suárez-Aguilar, Z. E., Sepúlveda-Delgado, O., Patarroyo-Mesa, M., & Canaria-Camargo, L. C.

(2020). Modelo matemático para estimar curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvias extremas en Tunja, Colombia. *Información Tecnológica*, 31(1), 193–206.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100193>

Subramanya, K. (2008). *Engineering Hydrology* (4th ed.). New Delhi: Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd.

Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.
<https://doi.org/10.1029/96WR03137>

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center, Davis, California, United States.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2021). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual (Version 4.9)*. Hydrologic Engineering Center, Davis, California, United States. Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD. (2015). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD) 2015-2025. Una estrategia de desarrollo*. Bogotá, Colombia.

United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service (USDA-SCS). (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds (Technical Release No. 55 – TR-55)*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture.

- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5). <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- Urrutia Rivas, M. Y. (2025). Evaluación del desempeño de las herramientas hidrológicas HYDRO-BID y HEC-HMS en la estimación de caudales máximos mensuales en las regiones del Valle del Cauca y Tolima. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/3531>
- USACE – Hydrologic Engineering Center. (2021). HEC-HMS User’s Manual (Version 4.9). U.S. Army Corps of Engineers. https://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.9.pdf
- USDA - United States Department of Agriculture. (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Soil Conservation Service.
- USDA-SCS. (1972). National Engineering Handbook, Section 4 – Hydrology. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture
- USDA-SCS. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds (Technical Release No. 55). U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Valcárcel Gómez, H. Y. (2016). Análisis de incertidumbre en modelos hidrológicos usando HEC-HMS. Bogotá, D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Vanguardia. (2024, 26 de febrero). Avalancha en Piedecuesta: se cumplen cuatro años de la tragedia y el milagro de Dylan. Recuperado de <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/2024/02/26/avalancha-en-piedecuesta-se-cumplen-cuatro-anos-de-la-tragedia-y-el-milagro-de-dylan/>

- Vélez Otálvaro, M. V. (2000). Hidrología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Vélez Upegui, J. J., & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58–71.
- Vera Ruiz, D. A. (2015). Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca alta del Río Bogotá, en el Municipio de Villapinzón, utilizando modelación hidrológica HEC-HMS e hidráulica 1D y 2D HEC-RAS e ÍBER [Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito].
- Viji, R., Rajesh Prasanna, P., & Ilangovan, R. (2015). GIS-based SCS–CN method for estimating runoff in Kundahpalam watershed, Nilgiris District, Tamilnadu. *Earth Sciences Research Journal*, 19(1), 59–64. <https://doi.org/10.15446/esrj.v19n1.44714>
- Yoo, C., Lee, J., & Lee, S. (2017). Estimation of Muskingum K parameter using concentration time for flood routing. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(5), 1758–1766. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0793-1>
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons.