

Fecha de recibido: 18-04-2024  
Fecha de aceptado: 29-06-2024  
DOI: 10.22490/ECAPMA.8067

# DINÁMICA HIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAGDALENA. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO TIMANÁ, COLOMBIA

## HYDROLOGICAL DYNAMICS OF THE UPPER MAGADELNA RIVER BASIN. CASE STUDY: TIMANA RIVER BASIN, COLOMBIA

**Andrés Mauricio Munar Samboní**

Docente Investigador - ECAPMA  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2056-7234>  
[andres.munar@unad.edu.co](mailto:andres.munar@unad.edu.co)

**Citación:** Munar, A. (2024). Dinámica hidrológica de la cuenca alta del río Magdalena. Caso de estudio: cuenca del río Timaná, Colombia. *Working Papers ECAPMA*, 8(1), 115 – 139. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.8067>

# RESUMEN

**Contextualización:** la gestión del recurso hídrico es crucial para garantizar la disponibilidad y calidad del agua para usos múltiples, incluyendo el abastecimiento humano, la agricultura, la industria y la conservación del medio ambiente. Este enfoque integral implica la implementación de políticas, tecnologías y prácticas que promuevan la equidad en el acceso al agua, la eficiencia en su uso, la protección de ecosistemas acuáticos y la mitigación de riesgos relacionados con la escasez, la contaminación y los eventos climáticos extremos.

**Vacío de conocimiento:** la gestión efectiva de recursos hídricos en regiones tropicales cada vez es más crítica debido a la complejidad de factores climáticos y geográficos. En este contexto, la predicción precisa de caudales máximos es esencial para mitigar riesgos de inundaciones y garantizar la seguridad hídrica.

**Propósito:** este estudio evalúa la dinámica hidrológica de la cuenca del río Timaná, localizada en la cuenta alta del río Magdalena.

**Metodología:** para tal fin se realizó: (1) determinación de las características morfológicas y fisiográficas de la cuenca, (2), caracterización hidro-climática y (3) estimación de caudales máximos a partir de modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS para lluvias de di-

seño en diferentes periodos de retorno y eventos extremos.

**Resultados y conclusiones:** los resultados demuestran la utilidad de HEC-HMS en la modelación de caudales máximos en la cuenca, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones en la gestión del agua y el diseño de obras hidráulicas. El estudio destaca la capacidad del modelo para simular con precisión eventos extremos de precipitación y prever la respuesta hidrológica, específicamente en términos de caudales máximos. Este trabajo no sólo contribuye al entendimiento fundamental de la hidrología en cuencas colombianas, sino que también destaca la utilidad de herramientas avanzadas como HEC-HMS en entornos geográficos y climáticos complejos, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y estrategias de gestión del agua en Colombia y otras regiones similares. El marco metodológico propuesto contribuye al avance del conocimiento en hidrología de la cuenca del río Magdalena, ofreciendo una herramienta valiosa para la planificación y gestión sostenible de recursos hídricos en estas regiones vulnerables.

**Palabras clave:** cambio climático, cuencas hidrográficas, modelación hidrológica, modelo HEC-HMS, recursos hídricos



# ABSTRACT

**Contextualization:** Water resource management is crucial to ensure the availability and quality of water for multiple uses, including human supply, agriculture, industry, and environmental conservation. This integrated approach involves the implementation of policies, technologies and practices that promote equity in access to water, efficiency, protection of aquatic ecosystems and mitigation of risks related to scarcity, pollution, and extreme weather events.

**Knowledge gap:** Effective management of water resources in tropical regions has become increasingly critical due to the complexity of climatic and geographic factors. In this context, accurate prediction of peak flows is essential to mitigate flood risks and ensure water security.

**Purpose:** This study evaluates the hydrological dynamics of the Timaná river basin, located in the upper Magdalena River basin.

**Methodology:** The comprehensive methodology employed encompasses (1) determination of the morphometric and physiographic characteristics of the ba-

sin, (2) hydro-climatic characterization and (3) estimation of maximum flows from hydrological modeling using the HEC-HMS software for design rainfall in different return periods and extreme events.

**Results and Conclusions:** The results demonstrate the usefulness of HEC-HMS in modeling peak flows in the basin, providing valuable information for decision making in water management and the design of hydraulic and drainage works. The study highlights the model's ability to accurately simulate extreme precipitation events and forecast the hydrological response, specifically in terms of peak flows. This work not only contributes to the fundamental understanding of hydrology in Colombian watersheds, but also highlights the usefulness of advanced tools such as HEC-HMS in complex geographic and climatic environments, providing a solid basis for the development of the model.

**Keywords:** water resources, hydrological modeling, HEC-HMS model, river basins, climate change

# 1. INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente de los recursos hídricos en regiones tropicales es cada día más importante debido a la interacción de factores climáticos y geográficos; además, las alteraciones referidas al ciclo hidrológico amenazan la seguridad hídrica y los ecosistemas. Los impactos del cambio climático en el uso del suelo y en la cobertura vegetal pueden influenciar significativamente el balance hídrico y los ciclos biogeoquímicos en las cuencas hidrográficas, alterando los procesos de interceptación, evapotranspiración, infiltración, humedad del suelo, ciclo de nutrientes y los patrones espaciales y temporales que caracterizan la respuesta hidrológica de estos ecosistemas (Li et al., 2022; Parra-Orobio et al., 2023).

Las estrategias de gestión integral de recursos hídricos apoyadas de herramientas de análisis y modelación hidrológica son cada vez más utilizadas para una mejor comprensión de los procesos y dinámicas en cuencas hidrográficas (Munar et al., 2018; 2019; 2022). Los modelos hidrológicos como el HEC-HMS permiten prever con precisión caudales máximos para mitigar riesgos de inundaciones, siendo óptimas herramientas para simular eventos extremos con adaptabilidad única a las condiciones tropicales (Chathuranika et al., 2022; Logah et al., 2023). Esto permite avanzar no solamente en la comprensión local sino también en el desarrollo global de metodologías de modelación hidrológica en entornos tropicales desafiantes.

Colombia, caracterizada por su topografía montañosa y patrones climáticos complejos, enfrenta desafíos únicos en la gestión del agua, especialmente en relación con eventos extremos de precipitación (Ávila et al., 2019; Giraldo-Osorio et al., 2022). La cuenca alta del río Magdalena enfrenta desafíos en la gestión y disponibilidad del recurso hídrico, que requieren evaluaciones hidrológicas confiables (Elgamal et al., 2017). Por otro lado, el análisis hidrológico y las simulaciones a través de modelos se ven obstaculizados por un conocimiento insuficiente e incierto de dinámica del régimen hidrológico en la cuenca. Por tanto, la integración de modelación hidrológica permite mejorar la comprensión de los principales factores que controlan los procesos hidrológicos e hidrodinámicos de las cuencas, facilitando la evaluación simultánea de diferentes periodos hidrológicos (húmedos y secos, variación diaria y estacionalidad), y las respuestas de las cuencas a potenciales impactos del cambio climático (Munar et al., 2018; 2019; 2022; 2023; Tavares et al., 2019; 2020).

Recientes estudios realizados en la cuenca del río Magdalena pronostican potenciales impactos del cambio climático en los caudales en diversas regiones de la cuenca, con significativas reducciones en las regiones altas y medias (Munar et al., 2022; 2023). Eventos de variabilidad climática como La Niña de 2010-2011 y las graves inundaciones que afectaron a gran parte de la cuenca del Magdalena-Cauca en Co-

lombia pusieron de manifiesto varias deficiencias en el enfoque de la gestión de los riesgos de inundación en el país (Werner et al., 2016).

La cuenca alta del río Magdalena, localizada en el departamento del Huila, de acuerdo a la Evaluación Regional del Agua-ERA, realizada por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena-CAM (Jiménez-Segura y Lasso, 2021), en un año hidrológico medio, produce 17.787 millones de metros cúbicos, volumen suficiente para suministrar agua a una población equivalente a 236 millones de habitantes, bastante mayor que la población de Brasil (208.5 millones de habitantes) (IBGE, 2017). A pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años, cada vez se hace necesario utilizar la información científica para estrechar la relación existente entre las dinámicas climáticas y sus relaciones con el ciclo del agua, el cambio de los usos del suelo y las actividades socioeconómicas. Cabe destacar que, en el departamento del Huila, los principales efectos podrán reflejarse en el sector agrícola debido a los aumentos en precipitación, particularmente para monocultivos extensivos, dada la po-

sibilidad de aumento en plagas y enfermedades. La biodiversidad asociada a las zonas de mayor aumento de temperatura podrá verse afectada por estrés térmico (IDEAM, 2019b; 2023; Rodríguez, 2012).

Este estudio se centra en la evaluación de la dinámica hidrológica de la cuenca del río Timaná, situada en la parte alta de la cuenca del río Magdalena. La metodología integral empleada comprende (1) la determinación de las características morfométricas y fisiográficas de la cuenca, (2) la caracterización hidroclimática y (3) la estimación de caudales máximos a través de la modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS. Este trabajo contribuye significativamente a la comprensión básica de la hidrología en las cuencas colombianas, apoyado en herramientas avanzadas como HEC-HMS. El marco metodológico propuesto y los resultados obtenidos apuntan a promover la utilización de la información en diseño de obras hidráulicas y futuros estudios que integren alteraciones en el uso del suelo y cobertura vegetal, para implementar medidas de mitigación al cambio climático y estudios de disponibilidad hídrica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Características morfométricas y fisiográficas de la cuenca

#### Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca hidrográfica fue realizada utilizando operaciones de

geoprocesamiento mediante el software libre QGIS, usando el Plugin *IPH Hydro Tools* (Siqueira et al., 2016), considerando como entrada el modelo digital de elevación MDE SRTM de 30 m disponible en la Cartografía Base Escala del IGAC (IGAC, 2023), así como la información conteni-

da en las bases de datos vectoriales por hojas cartográficas en Escala: 1:25.000 del IGAC. Con las herramientas *IPH-Hydro Tools* y el módulo MHS (*Modified Heuristic Search*) fueron eliminadas las depresiones y estimados el flujo acumulado y la red de drenaje. A partir de esta última, fue delimitada la cuenca a estudiar; posteriormente, utilizando la herramienta *Stream segmentation*, la red de drenaje fue dividida en varios tramos de ríos desde las confluencias.

Las características morfométricas corresponden a la aplicación de procedimientos que, a través del estudio de la morfología y geomorfología, caracterizan de manera cuantitativa los rasgos propios de las cuencas hidrográficas en valores numéricos, los cuales permiten comparar en forma exacta una parte de la superficie terrestre con otra. Estos parámetros están relacionados con el régimen hidrológico de una cuenca en función de numerosos factores, entre los que predomina el clima y la forma del terreno en el cual se desarrolla el fenómeno. Las formas de la superficie terrestre, en particular su altitud, tienen influencia decisiva sobre los más importantes factores condicionantes del régimen hidrológico, como precipitación, escorrentía, infiltración y formación de depósitos y sedimentos. Los valores morfométricos son fundamentales para documentar la analogía territorial y establecer relaciones hidrológicas de generalización, que expresan en valores simples las características de paisajes complejos (Singh et al., 2013; Werner et al., 2016).

Para la determinación de las características morfométricas y fisiográficas de la cuenca fueron estimados parámetros físicos (e.g., área de drenaje, perímetro, altitud máxima y mínima, ancho de la cuenca), parámetros de forma (e.g., índice de compacidad o índice de Gravelius, factor de forma), características de relieve de la cuenca (e.g., pendiente media de la cuenca, elevación media, curva hipsométrica) y características del sistema de drenaje (e.g., identificación de los tipos de red de drenaje, orden de las corrientes y tiempos de concentración con su respectivo análisis estadístico y eliminación de valores extremos, *outliers*).

## Caracterización hidro-climática

### Datos hidroclimáticos y procesamiento

La información *hidro-climatológica* de cada estación fue obtenida de la base de datos del IDEAM, de acuerdo con las informaciones hidrometeorológicas disponible en el banco de datos hidrometeorológicos (IDEAM, 2019a). Fueron utilizadas estaciones climatológicas, agrometeorológicas, climatológicas ordinarias, climatológicas principales, estaciones pluviométricas y pluviográficas, estaciones limnigráficas y limnimétricas, estaciones fluviométricas, entre otras. Así mismo, fueron evaluados y completados los datos faltantes de las estaciones analizadas.

## Estimación de caudales máximos a partir de modelación hidrológica con HEC-HMS

### Espacialización de la lluvia y determinación del valor $M$

Para generar la espacialización de la lluvia máxima en 24h fue necesario como primer paso el tratamiento de la información base de las estaciones hidroclimatológicas. Este tratamiento consiste en calcular las precipitaciones promedio máximas en cada una de las estaciones estudiadas, lo cual se calcula promediando los valores máximos anuales para el periodo de registro. Con la precipitación máxima en 24h ( $P_{max\ 24h}$ ) calculada para cada estación se realiza la espacialización de la misma con ayuda de un sistema de información geográfica. En el presente estudio se utilizó el software ArcGIS 10.2, en la cual están disponibles los métodos de interpolación IDW y Krigging.

#### *Generación de series de lluvia sintéticas – Método regionalizado curvas IDF*

Una vez se cuenta con la información espacializada, el paso siguiente para llevar a cabo la metodología (Vargas y Díaz-Granados, 1998), que consiste en calcular un valor promedio de precipitación en 24h máxima anual, este valor representa la variable  $M$  para cada subcuenca.

El valor  $M$  corresponde al valor promedio multianual de la precipitación máxima en

24 horas a nivel anual calculado para cada una de las subcuencas de la zona de análisis. Para determinar este valor se requieren realizar los siguientes pasos:

- Calcular el valor máximo de precipitación en 24 horas a nivel anual para cada año de registros en la estación medidora de lluvia.
- Calcular el valor promedio multianual teniendo en cuenta los periodos de registro válidos para cada estación medidora de lluvia.
- Espacializar los valores medios multianuales de las estaciones por medio de métodos de interpolación disponibles en las herramientas GIS.
- Encontrar el valor de  $M$ , que corresponde al valor medio de la variable especializada ( $P_{Max\ 24h}$ ) para cada una de las subcuencas del sistema. Esto se realiza por medio de un análisis zonal de la variable especializada.

### Construcción de curvas IDF

Como la zona del proyecto se encuentra dentro de la Región andina ( $R_1$ ) entonces el valor de la intensidad se define a partir de los coeficientes de la región presentados en la Tabla 1 y que serán utilizados para estimar la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia IDF (Ecuación 1).

**Tabla 1** Parámetros R1 Curvas IDF Sintéticas. Fuente: adaptado de Vargas & Diaz-Granados (1998)

Región	a	b	c	d
Andina (R <sub>1</sub> )	0.94	0.18	0.66	0.83

Fuente: autores.

$$I = 0.94 * \frac{T^{0.18}}{t^{0.66}} * M^{0.83}$$

(Ecuación 1)

Donde:  $M$  corresponde al promedio máximo anual de precipitación en 24 horas, el valor del parámetro  $T$  corresponde al periodo de retorno seleccionado en años y finalmente el factor  $t$  varía entre 5 y 100 minutos.

### Construcción de Hietogramas de diseño – Método de los bloques alternos

Partiendo de las curvas intensidad–duración–frecuencia (IDF) generadas en el proceso anterior se procede a llevar a cabo el procedimiento para el cálculo de los hietogramas de diseño, mediante la metodología de bloques alternos. Como primer paso, se determinan los valores de la curva de masa de los hietogramas de diseño para diferentes duraciones para cada uno de los periodos de retorno seleccionados.

### Estimación de caudales máximos

Para estimar los hidrogramas de diseño y estudiar el comportamiento de la cuenca se aplicó el modelo hidrológico HEC-HMS- Hydrologic Modeling System (USACE, 2000, 2018), desarrollado por

el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de EE.UU. El modelo permitió evaluar el balance hídrico, así como las condiciones hidrológicas y el comportamiento de los diferentes caudales. Este es un modelo de base física semi-distribuido que conceptualiza la cuenca por medio de unidades hidrológicas homogéneas, representando los procesos de interceptación, almacenamiento superficial, infiltración, escorrentía, caudal base y tránsito de hidrogramas. Cabe destacar que la modelación hidrológica integrada con datos *in-situ* permite una mejor comprensión de los procesos hidrológicos–hidrodinámicos, facilitando la evaluación de diversos escenarios reales e hipotéticos, ayudando a soportar y mejorar la toma de decisiones (Munar et al., 2018; 2019; 2022; 2023).

En el análisis de caudales se determinaron los caudales máximos instantáneos mediante la implementación del modelo HEC–HMS, apoyado en la aplicación de la metodología de los Hidrogramas Unitarios Sintéticos del SCS. Para determinar el caudal generado por la lluvia se aplicó el modelo lluvia-caudal del *Soil Conservation Service de los E.U.A.*, dado que el método racional sobrevalora el caudal cuando se usa en cuencas rurales con una extensión superior a 100 ha. Para el efecto, se definen las áreas aferentes, se selecciona el periodo de retorno del aguacero de diseño, se calcula el valor de la tormenta con el periodo de retorno requerido, se evalúan los

tiempos de concentración, se selecciona el Número de Curva CN el cual es un concepto similar al coeficiente de escorrentía y, finalmente, se calculan los caudales con diferentes períodos de retorno.

### **Período de retorno del aguacero de diseño**

A fin de precisar el período de retorno del aguacero de diseño se determinaron crecientes con períodos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años, con el fin de disponer de los datos suficientes para desarrollar un estudio completo de la capacidad hidráulica del río y de la frecuencia de las crecientes.

### **Hidrograma Unitario del SCS. Método del Número de Curva**

El *Natural Resources Conservation Service (NRCS)* conocido también como *Soil Conservation Service* desarrolló en la década de los setenta un método empírico para el cálculo de la transformación de

lluvia–escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados y para distintas condiciones de humedad antecedente. Se observaron curvas al representarse en gráficos la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa (Pe). Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional de curva CN, tal que  $0 \leq CN \leq 100$ ; en superficies impermeables y de agua  $CN = 100$ ; para superficies naturales  $CN < 100$  y para superficie sin escurrimiento  $CN = 0$ .

La lluvia efectiva es el escurrimiento directo e inmediato que produce una lluvia sobre una determinada cuenca y resultan igual a la lluvia total menos las pérdidas de agua. Estas pérdidas poseen tres componentes:

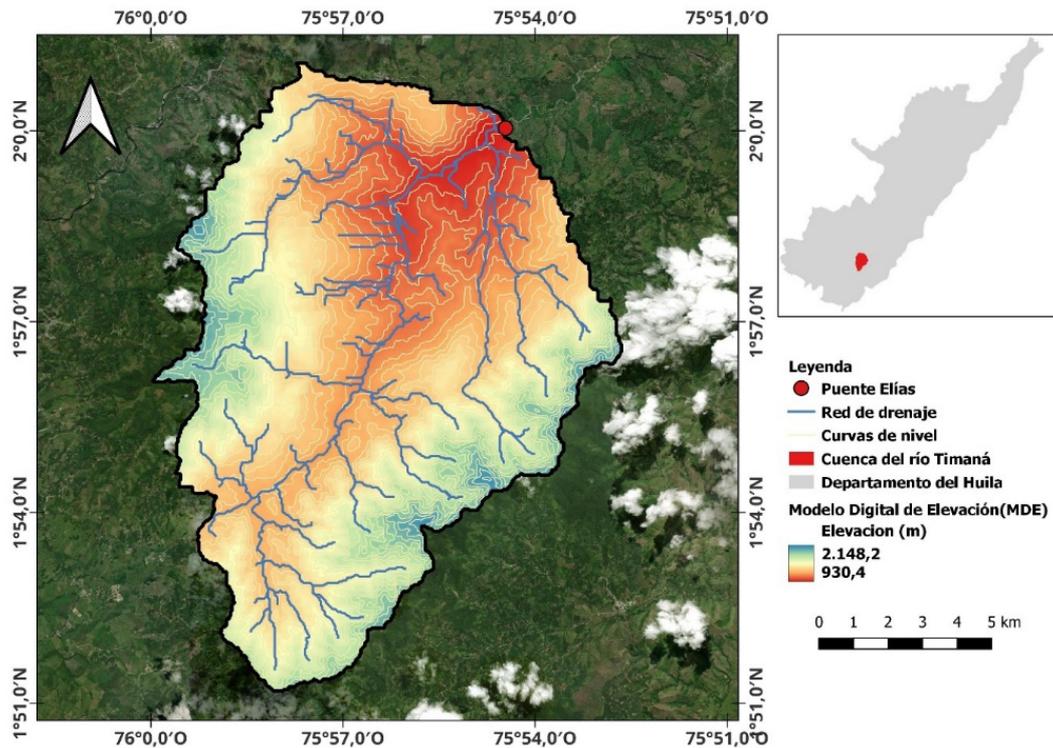
- Interceptación por parte de la vegetación.
- Detención superficial.
- Infiltración.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Caracterización morfométrica y fisiográfica de la cuenca**

#### **Área de drenaje de la cuenca (AD)**

En la Figura 1 se presentan el área de drenaje de la cuenca, la cual fue estimada en 151.36 km<sup>2</sup>.



**Figura 1.** Delimitación del área de la cuenca del río Timaná

**Fuente:** autores

En la Tabla 2 se presenta el resumen los parámetros de forma de la cuenca analizada:

**Tabla 2.** Parámetros de forma de la cuenca del río Timaná

Perímetro (Km)	Longitud recta de la cuenca (Km)	Ancho de la cuenca (w) [km]	Índice de Gravelius	Factor de Forma Kf	Índice de alargamiento IA
74,26	16,45	12,255	1,7027	0,5591	1,3426

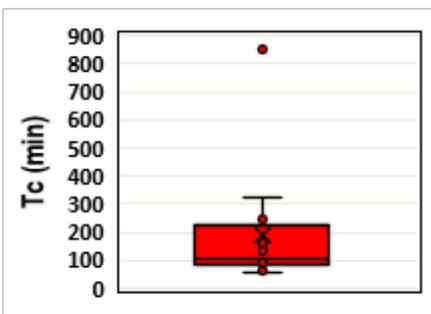
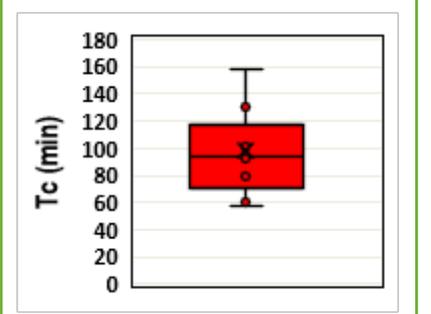
**Fuente:** autores

El índice de Gravelius es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Este describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico. Para el caso de la cuenca analizada, los resultados obtenidos ( $IG > 1.5$ ) demuestran una forma oval-oblonga a rectangular-oblonga que con un Factor de Forma ( $kf > 1$ ), revelan que la cuenca tiende a ser

alargada con baja susceptibilidad a las avenidas (A.U. et al., 2021).

Así mismo, fue determinado el tiempo de concentración (Tabla 3), el cual es utilizado extensivamente en el diseño hidrológico para determinar la capacidad hidráulica máxima de diferentes estructuras. Se trata de variables que son propias para cada sitio y que dependen de las características geomorfológicas de la cuenca y de la lluvia (Vélez y Botero, 2011).

**Tabla 3.** Tiempos de concentración estimados para la cuenca del río Timaná

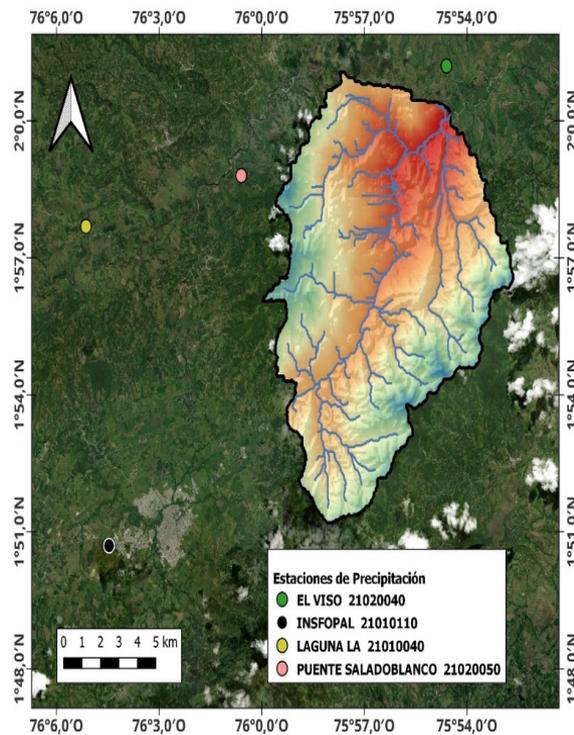
No	Método	Cuenca río Timaná	Cuenca río Timaná (eliminando valores extremos <i>Outliers</i> )
		(Tc en minutos)	(Tc en minutos)
1	Kirpich	93,225	93,225
2	Giandotti	158,792	158,792
3	Scs-Ranser	60,688	60,688
4	California Culvert Practice	93,723	93,723
5	Témez	103,387	103,387
6	V.T Chow	79,713	79,713
7	Clark	853,466	
8	Passini	322,852	
9	Bransby-Williams	244,769	
10	Kerby – Hathaway	58,050	58,050
11	Método Racional Generalizado	130,408	130,408
12	Ventura - Heras	101,036	101,036
<b>Promedio</b>		<b>191,676</b>	<b>97,669</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>222,726</b>	<b>31,912</b>
<b>Diagrama Box Plot</b>			

Fuente: autores

## Caracterización hidro-climática

Para la caracterización hidro-climática fueron seleccionadas las siguientes estaciones: EL VISO 21020040, PUENTE SA-

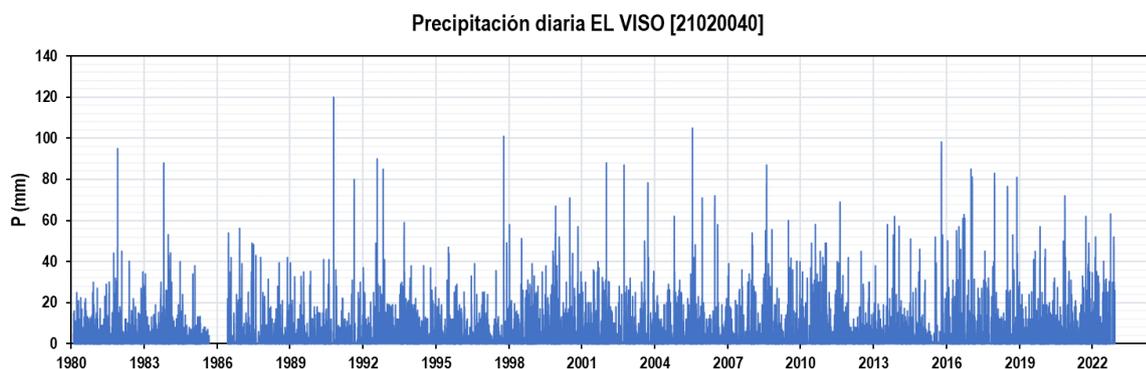
LADOBLANCO 21020050, LAGUNA LA 21010040 e INSFOPAL 21010110. Estas son las estaciones que se encuentran dentro o cerca de la zona estudiada (Figura 2).



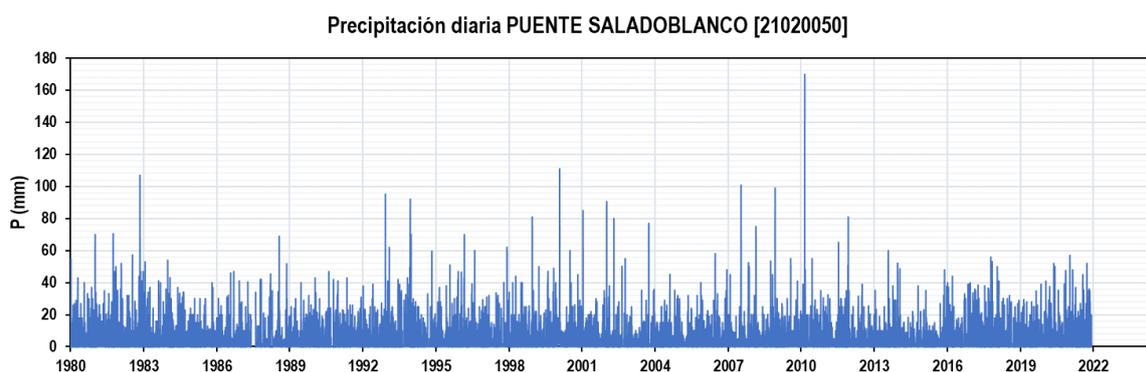
**Figura 2.** Localización de las estaciones pluviométricas utilizadas en el análisis de precipitación  
**Fuente:** autores.

En las figuras 3, 4, 5 y 6 se presentan los pluviogramas con los valores diarios de precipitación para las cuatro estaciones analizadas, donde se observa una amplia variabilidad en las estaciones analizadas.

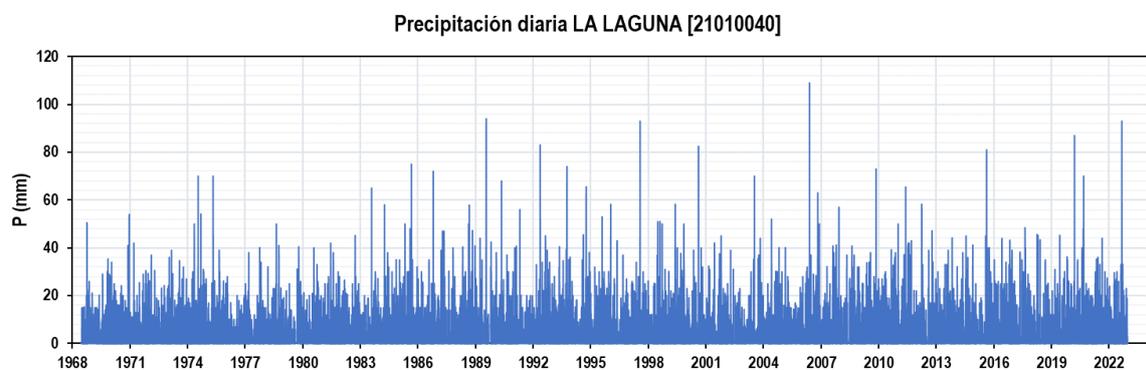
Los valores máximos de precipitación se presentan en la estación Puente Salado blanco, con un máximo de 170 mm ocurrido en junio de 2010.



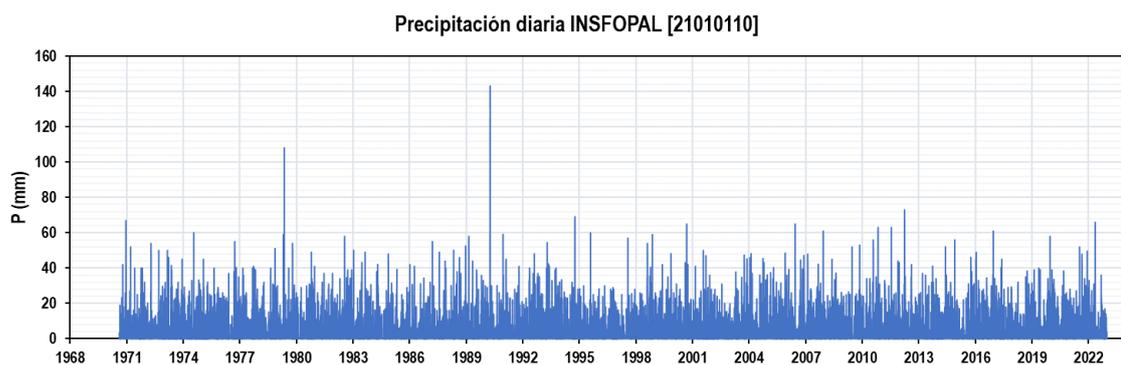
**Figura 3.** Valores diarios de precipitación en la estación EL VISO 21020040  
**Fuente:** autores.



**Figura 4.** Valores diarios de precipitación en la estación PUENTE SALADOBLANCO 21020050  
**Fuente:** autores.



**Figura 5.** Valores diarios de precipitación en la estación LAGUNA LA 21010040  
**Fuente:** autores.

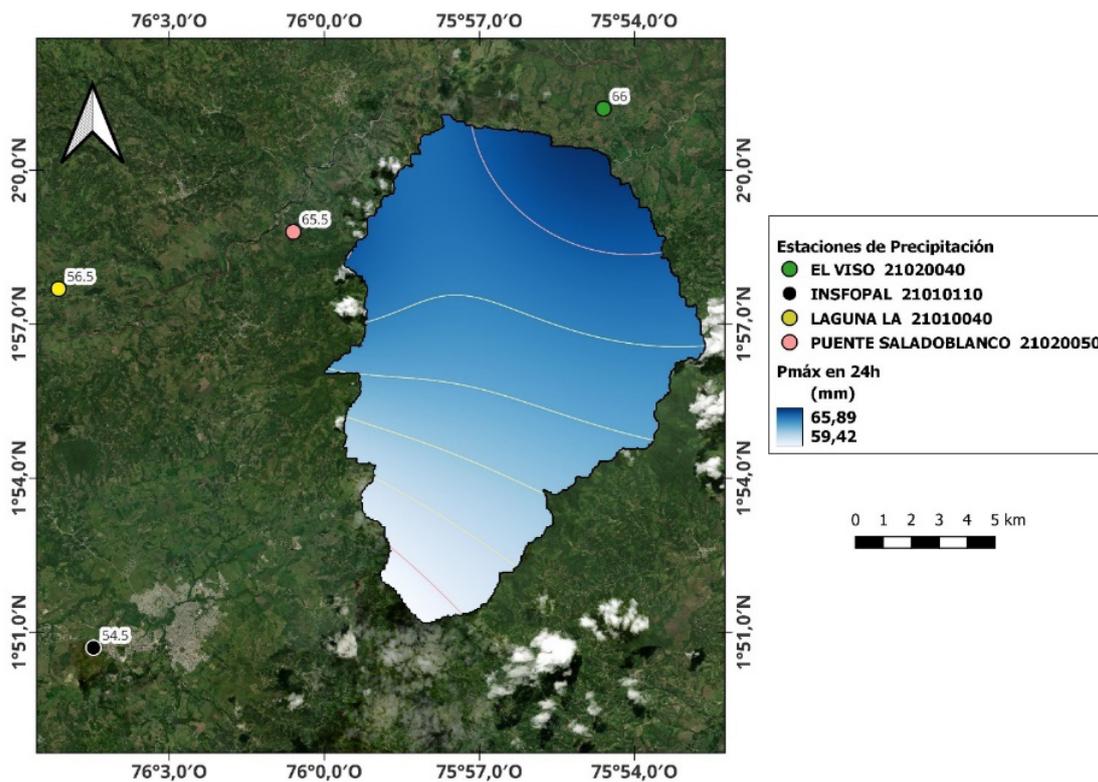


**Figura 6.** Valores diarios de precipitación en la estación INSFOPAL 21010110  
**Fuente:** autores.

## Espacialización de la lluvia y determinación del valor de M

En la Figura 7 se evidencian los resultados obtenidos para la espacialización de la lluvia mediante el método de interpola-

ción IDW para las estaciones analizadas, donde la precipitación máxima en 24h para la microcuenca estudiada oscila entre 59,12mm y 65,89mm con un promedio de 62,7mm.



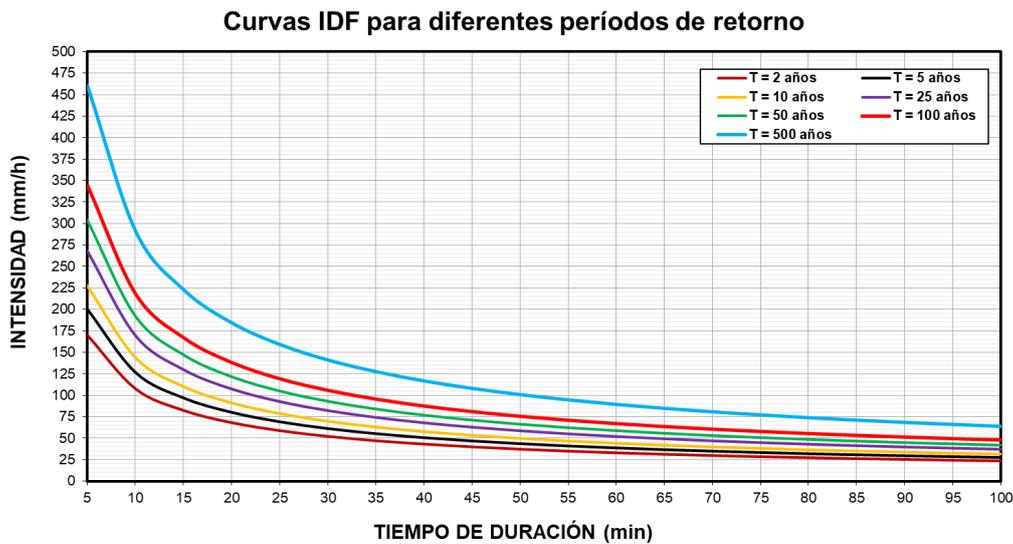
**Figura 7.** Interpolación de valores de lluvia mediante el método de IDW para las estaciones analizadas

**Fuente:** autores.

En este sentido el valor de M es igual al valor medio de la variable especializada (P max 24h) para la cuenca, corresponde a 62,7 mm.

## Generación de series de lluvia sintéticas–Método regionalizado curvas IDF

En la Figura 8 se presentan las curvas IDF para diferentes periodos de retorno (2,5,10,25,50,100 y 500 años).

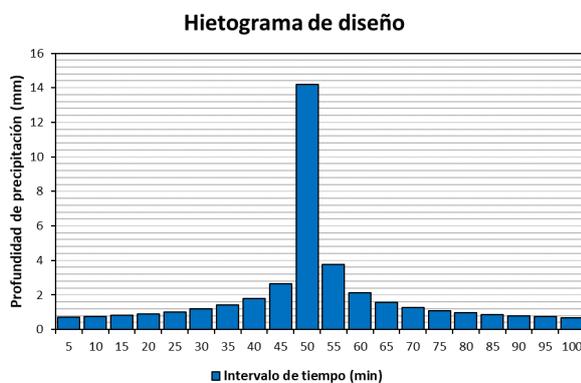


**Figura 8.** Curvas IDF para diferentes períodos de retorno  
**Fuente:** autores.

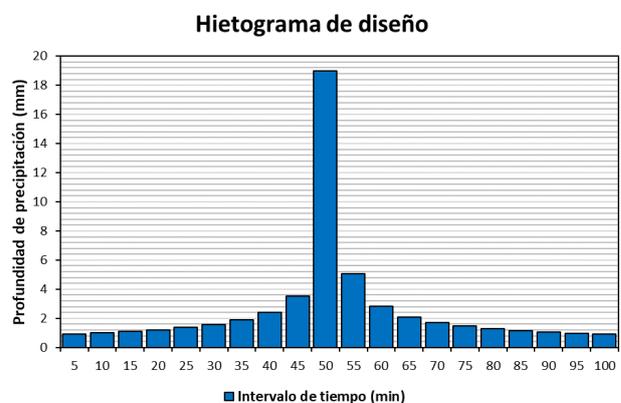
## Construcción de Hietogramas de diseño—Método de los bloques alternos

Partiendo de las curvas intensidad–duración–frecuencia (IDF) generadas en el proceso anterior, se procede a llevar a cabo el procedimiento para el cálculo de los hietogramas de diseño mediante la metodología de bloques alternos. Cabe

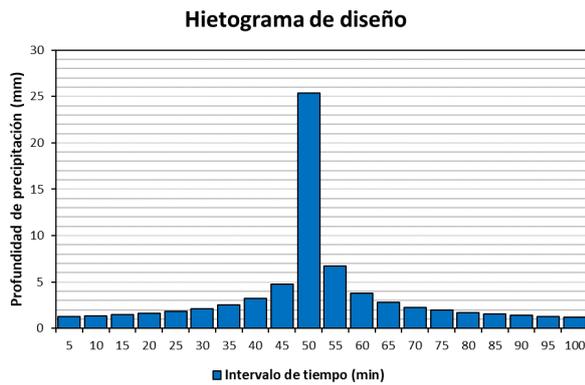
destacar que el hietograma proporciona información detallada sobre la variación temporal de la lluvia, lo que es fundamental para el diseño y la evaluación de infraestructuras hidrológicas y sistemas de drenaje, como alcantarillado pluvial, presas y sistemas de control de inundaciones. En las figuras 9, 10, 11 y 12 se presentan los hietogramas para diferentes períodos de retorno analizados:



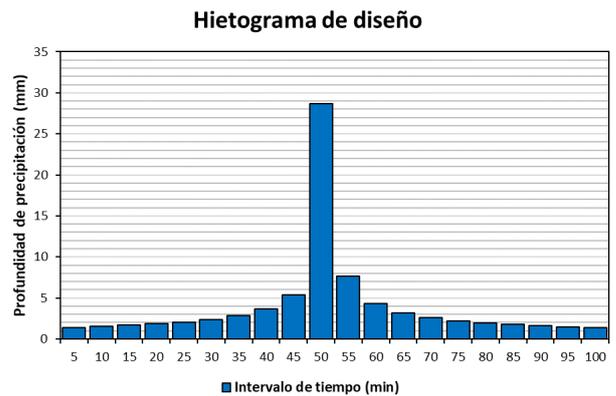
**Figura 9.** Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 2 años  
**Fuente:** autores.



**Figura 10.** Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 10 años  
**Fuente:** autores.



**Figura 11.** Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años  
**Fuente:** autores.



**Figura 12.** Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 100 años  
**Fuente:** autores.

## Corrección por representatividad de área–Factor de Reducción por Área FRA

Es de suma importancia aclarar que las tormentas no son simultáneas en toda el área de estudio y que al ir aumentando el área la simultaneidad se ve más afectada. Esto conlleva a buscar herramientas como los factores de reducción por área, que son aplicados a valores de precipitación puntual que dan como resultado una precipitación distribuida en una zona definida, considerando la duración y el periodo de retorno (González, 2012; Rubiano, 2021). En este sentido se realizó la aplicación de un factor de espacialidad promedio de la lluvia de 0,75 con el fin de representar la distribución espacial de la

lluvia en la zona estudiada. Para seleccionar este valor se parte del concepto según el cual una lluvia puntual abarca aproximadamente hasta unos 25 km<sup>2</sup>. Finalmente, este valor se aplica a los hietogramas organizados por medio del método de los bloques alternos para obtener los hietogramas de diseño (Sanabria, 2019).

## Estimación de caudales máximos

A continuación, en la Tabla 4 se presentan los resultados del valor de curva número CN estimado para la cuenca analizada, apoyado en el mapa de coberturas *Corine Land Cover* para el departamento del Huila.

**Tabla 4.** Determinación del cubrimiento vegetal y del valor CN para la cuenca analizada

Descripción		Pendiente (%)	Porcentaje (%)	Grupo de suelo	Humedad antecedente	CN
Montaña: Área =	39,64%	18	39,64%	C	Condición II	

Descripción		Pendiente (%)	Porcentaje (%)	Grupo de suelo	Humedad antecedente	CN
Bosque denso alto			33,70%		Condición II	80
arbustos			3,96%	C	Condición II	80
pasto			1,98%	C	Condición II	76
<b>abanico: Área =</b>	<b>55,09%</b>	<b>8</b>	<b>55,09%</b>	<b>C</b>	<b>Condición II</b>	
arbustos			24,79%	C	Condición II	80
pasto			30,30%	C	Condición II	76
<b>planicie: Área =</b>	<b>5,27%</b>	<b>1</b>	<b>5,27%</b>	<b>C</b>	<b>Condición II</b>	
arbustos			1,74%	C	Condición II	76
viviendas			1,74%	C	Condición II	90
pavimentos			1,79%	C	Condición II	90
<b>Valor final</b>			<b>100%</b>			<b>79,00</b>

Fuente: autores.

Los resultados demuestran que el valor estimado de curva número CN para la cuenca analizada corresponde a 79,00.

Así mismo, el tiempo de retardo o retraso (*lag*) para la cuenca analizada corresponde a lo descrito en la Tabla 5.

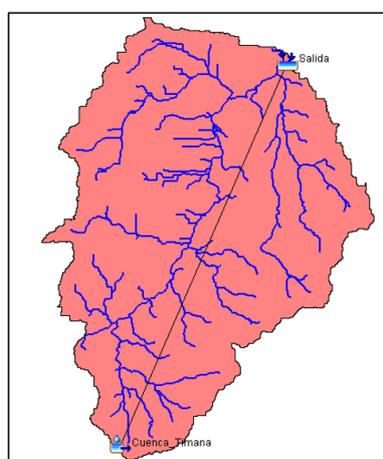
**Tabla 5.** Cálculo del tiempo de retardo para la cuenca analizada

Cuenca del río Timaná	(Tc en minutos)	Tiempo de retardo (min)
Promedio	97,669	58,60

Fuente: autores.

En la Figura 13 se presentan los resultados de la estimación de caudales máxi-

mos a través del modelo HEC-HMS para la cuenca analizada.

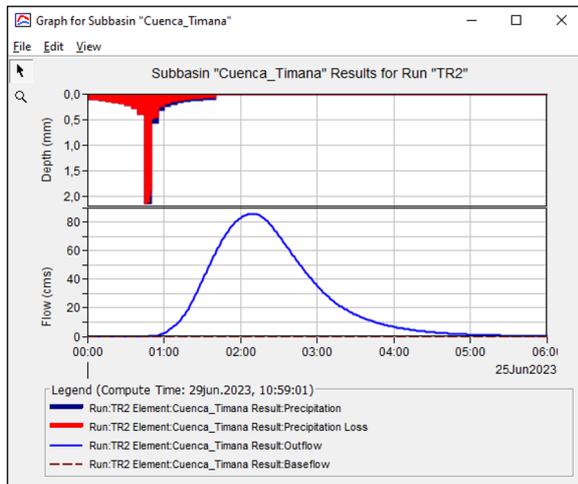


**Figura 13.** Representación de la cuenca del río Timaná en el modelo HEC-HMS

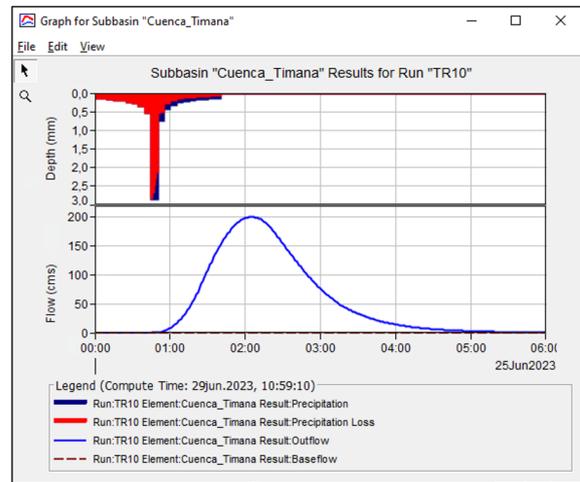
Fuente: autores.

En las figuras 14, 15, 16 y 17, se presentan los hidrogramas obtenidos para los dife-

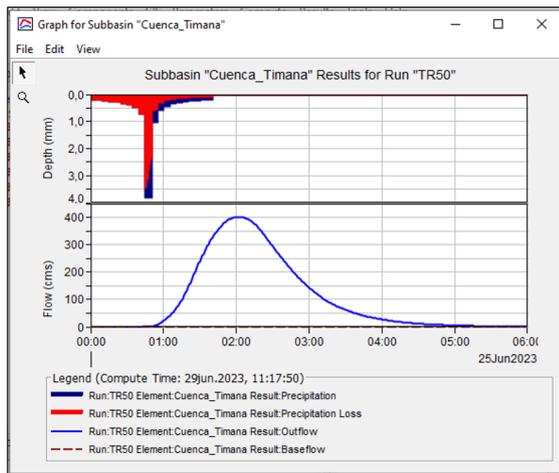
rentes tiempos de retorno TR (2, 10, 50 y 100) estimados para la cuenca analizada.



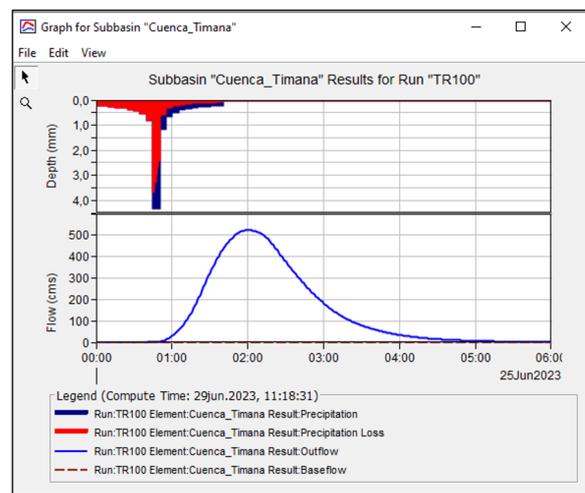
**Figura 14.** Hidrograma de la creciente con un período de retorno TR = 2 años en la cuenca del río Timaná.  
**Fuente:** autores.



**Figura 15.** Hidrograma de la creciente con un período de retorno TR = 10 años en la cuenca del río Timaná.  
**Fuente:** autores.



**Figura 16.** Hidrograma de la creciente con un período de retorno TR = 50 años en la cuenca del río Timaná.  
**Fuente:** autores.



**Figura 17.** Hidrograma de la creciente con un período de retorno TR = 100 años en la cuenca del río Timaná.  
**Fuente:** autores.

Los caudales fueron obtenidos para las crecientes analizadas con los parámetros indicados para la cuenca analizada. En la Tabla 6 se presenta el resumen de

los resultados de la estimación de caudales máximos con períodos de retorno de 2,10, 50 y 100 años obtenidos a través de HEC-HMS.

**Tabla 6.** Caudales máximos obtenidos para la cuenca del río Timaná a través de HEC-HMS asociados a diferentes tiempos de retorno

Ítem	Cuenca	Caudales Máximos (m <sup>3</sup> /s)			
		Tr = 2 años	Tr = 10 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
1	Cuenca del río Timaná	85,8	200,2	401,0	523,6

Fuente: autores.

## 4. CONCLUSIONES

Este estudio consistió en la evaluación de la dinámica hidrológica de la cuenca del río Timaná, localizada en la parte alta de la cuenca del río Magdalena, con el objetivo de estimar caudales máximos a partir de precipitaciones extremas y sus respuestas hidrológicas. Para tal fin se realizó (1) la determinación de las características morfométricas y fisiográficas de la cuenca, (2) la caracterización hidroclimática y (3) la estimación de caudales máximos a través de la modelación hidrológica utilizando el software HEC-HMS.

Con relación al análisis hidrológico de la cuenca del río Timaná, el área de drenaje estimada corresponde a 151,36 Km<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos a partir del análisis morfométrico indican que cada cuenca presenta forma alargada, con baja susceptibilidad a las avenidas torrenciales y con capacidad de absorber mejor una alta precipitación sin generar una crecida de grandes proporciones.

Adicionalmente, los caudales máximos en la cuenca hidrográfica analizada fueron estimados usando modelación hidrológica mediante el software HEC-HMS.

Los resultados de la estimación de caudales máximos revelan que los caudales máximos obtenidos para la cuenca analizada y asociados a los periodos de retorno 2, 10, 50 y 100 años, corresponden a 85,8, 200,2, 401,0 y 523,6 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Estos resultados para diferentes periodos de retorno están en el orden de los esperados para cuencas con características fisiográficas y morfométricas similares. La selección del período de retorno está asociada entonces con las características de protección e importancia del área de estudio. Así mismo, según la norma RAS 2000, el período de retorno de diseño también debe determinarse de acuerdo con la importancia de las áreas y con los daños, perjuicios o molestias que las inundaciones periódicas puedan ocasionar a los habitantes, tráfico vehicular, comercio, industria, etc.

Los resultados de este estudio demuestran la utilidad del modelo HEC-HMS para la estimación de caudales máximos en la cuenca, proporcionando así información valiosa para la toma de decisiones y generación de estrategias de gestión de los recursos hídricos y la gestión del

riesgo de desastres. Así mismo, los resultados de las modelaciones para estimar los caudales máximos en la cuenca serán cruciales para la gestión del riesgo en los casos más críticos de emergencia invernal, permitiendo generar pronósticos hidrológicos y conocer escenarios de riesgo para efectuar las acciones de prevención

y control requeridas una vez la población ya esté alertada del peligro latente, dirigida a orientar las acciones e intervenciones sobre el territorio y reducir los efectos adversos sobre la población y las actividades económicas asociadas

## REFERENCIAS

- A.U., A., K.R., B., Thomas, P. K., Anns, M., P.B., R., & Babu, S. (2021). Status of GIS-enabled morphometric analysis of river basins of Kerala, Southern India: A review and assessment. *Regional Studies in Marine Science*, 44, 101792. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101792>
- Ávila, Á., Guerrero, F., Escobar, Y., & Justino, F. (2019). Recent Precipitation Trends and Floods in the Colombian Andes. *Water*, 11(2), 379. <https://doi.org/10.3390/w11020379>
- Chathuranika, I. M., Gunathilake, M. B., Baddewela, P. K., Sachinthanie, E., Babel, M. S., Shrestha, S., Jha, M. K., & Rathnayake, U. S. (2022). Comparison of Two Hydrological Models, HEC-HMS and SWAT in Runoff Estimation: Application to Huai Bang Sai Tropical Watershed, Thailand. *Fluids*, 7(8), 267. <https://doi.org/10.3390/fluids7080267>
- Elgamal, A., Reggiani, P., & Jonoski, A. (2017). Impact analysis of satellite rainfall products on flow simulations in the Magdalena River Basin, Colombia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9, 85–103. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.09.001>
- Giraldo-Osorio, J., Trujillo-Osorio, D., & Báez-Villanueva, O. (2022). Analysis of ENSO-Driven Variability, and Long-Term Changes, of Extreme Precipitation Indices in Colombia, Using the Satellite Rainfall Estimates CHIRPS. *Water*, 14(11), 1733. <https://doi.org/10.3390/w14111733>
- González, S. (2012). *Estimación de Factores de Reducción por Área. Aplicación a la Cuenca del Río Pánuco*. [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de México.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (2019a). *DHIME - Manual de Usuario Consulta y Descarga de datos hidrometeorológicos* - IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (2019b). Estudio Nacional del Agua 2018. *Instituto de Hidrología, Meteorología*

- logía y Estudios Ambientales Marzo de 2019*. IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/anexos-estudio-nacional-del-agua-20221>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2023). *Modelo Digital de Elevación. SRTM 30 Metros. Colombia. Año 2011*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC. <https://www.colombiainmapas.gov.co/>
- Jiménez-Segura, L. F. y Lasso, C. A. (2021). *Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://doi.org/10.21068/A2020RRHXIX>
- Li, P., Wang, D., Li, W., & Liu, L. (2022). Sustainable water resources development and management in large river basins: an introduction. *Environmental Earth Sciences*, 81(6), 179. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10298-9>
- Logah, F. Y., Obuobie, E., Adjei, K. A., Gyamfi, C., & Odai, S. N. (2023). Capability of satellite rainfall products in simulating streamflows in the Black Volta Basin. *Sustainable Water Resources Management*, 9(3), 96. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00871-w>
- Munar, A. M., Cavalcanti, J. R., Bravo, J. M., da Motta-Marques, D., & Frago- so, C. R. (2019). Assessing the large- scale variation of heat budget in poorly gauged watershed-shallow lake system using a novel integrated modeling approach. *Journal of Hydrology*, 575, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.025>
- Munar, A. M., Cavalcanti, J. R., Bravo, J. M., Fan, F. M., Motta-Marques, D. da, & Frago- so, C. R. (2018). Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes. *Journal of Hydrology*, 564, 424–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.045>
- Munar, A. M., Méndez, N., Narváez, G., Campo Zambrano, F., Breda, J. P., Da Motta-Marques, D., Angarita, H., & Fleischmann, A. (2023). Modelling the climate change impacts on river discharge and inundation extent in the Magdalena River basin – Colombia. *Hydrological Sciences Journal*, 1(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2215932>
- Munar, A. M., Méndez, N., & Vinasco, M. (2022). *Gestión integrada de la cuenca alta del río Magdalena: instrumentos para su evaluación y planificación*. UNAD.
- Parra-Orobio, B. A., Soto-Paz, J., Ramos-Santos, A., Sanjuan-Quintero, K. F., Saldaña-Escorcía, R., Domínguez-Rivera, I. C., & Sánchez, A. (2023). Assessment of the Water Footprint in Low-Income Urban Neighborhoods from Developing Countries: Case Study Fátima (Gamarra, Colombia). *Sustainability*, 15(9), 7115. <https://doi.org/10.3390/su15097115>

- QGIS. (s.f.). <https://www.qgis.org/es/site/forusers/download.html>
- Rodríguez, A. (2012). Evaluación de las simulaciones de precipitación y temperatura de los modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 con el clima presente en Colombia. *Ideam-Meteo*, 34. <http://fs03eja1.cormagdalena.com.co/nuevaweb/Niveles/Definiciones.pdf>
- Rubiano, F. (2021). *Factor de Reducción por Área de Cobertura para Tormentas en la ciudad de Bogotá*. [Tesis de Maestría]. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Sanabria, J. (2019). *Guía metodológica para el análisis de la gestión de embalses. Caso de estudio embalse la copa*. [Tesis de Maestría]. Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Singh, P., Thakur, J. K., & Singh, U. C. (2013). Morphometric analysis of Morar River Basin, Madhya Pradesh, India, using remote sensing and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 68(7), 1967–1977. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1884-8>
- Siqueira, V., Fleischmann, A., Jardim, P., Fan, F., & Collischonn, W. (2016). IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), 274–287. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p274-287>
- Tavares, M. H., Cunha, A. H. F., Motta-Marques, D., Ruhoff, A. L., Cavalcanti, J. R., Frago, C. R., Bravo, J. M., Munar, A. M., Fan, F. M., & Rodrigues, L. H. R. (2019). Comparison of methods to estimate lake-surface-water temperature using landsat 7 ETM+ and MODIS imagery: Case study of a large shallow subtropical lake in Southern Brazil. *Water (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/w11010168>
- Tavares, M. H., Cunha, A. H. F., Motta-Marques, D., Ruhoff, A. L., Frago, C. R., Munar, A. M., & Bonnet, M. P. (2020). Derivation of consistent, continuous daily river temperature data series by combining remote sensing and water temperature models. *Remote Sensing of Environment*, 241(June 2019), 111721. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111721>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2018). HEC-HMS: Hydrologic modeling system. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- USACE. (2000). Hydrologic Modeling System HEC - HMS - Technical Reference Manual. *Hydrologic Engineering Center*.
- USACE. (2018). Hydrological Modeling System HEC-HMS - User's Manual Version 4.3. *Davis, CA: Hydrologic Engineering Center*.
- Vargas, M. R., y Díaz-Granados, O. M. (1998). *Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*.
- Vélez, J. J., y Botero, A. (2011). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales*. DYNA.

Werner, M., Loaiza, J. C., Rosero Mesa, M. C., Faneca Sánchez, M., de Keizer, O., & Sandoval, M. C. (2016). Developing Flood Forecasting Capabilities in

Colombia (South America). In *Flood Forecasting* (pp. 349–368). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801884-2.00012-8>



**Licencia de Creative Commons**

Revista Working Papers ECAPMA is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional License.

