



**Delimitación de cuencas hidrográficas y estimación del caudal medio dentro del área
hidrográfica Magdalena-Cauca**

Danier Felipe Alvarez Ceballos

Informe de práctica para optar al título de ingeniero civil

Asesor

Carlos Alberto Palacio Tobón, Doctor en ingeniería, área aprovechamiento de recursos hidráulicos

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Escuela ambiental
Ingeniería civil
Medellín
2023

Cita

(Alvarez Ceballos, 2023)

Referencia

Alvarez Ceballos, D. (2018). *Delimitación de cuencas hidrográficas y estimación del caudal medio dentro del área hidrográfica Magdalena-Cauca*, [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi padre y madre.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo de grados. En primer lugar, a mi asesor externo Jhon Osorio por su guía constante y sus valiosos consejos durante todo el proceso.

En segundo lugar, a mis familiares y amigos, quienes me brindaron todo su apoyo y motivación en los momentos difíciles y que me impulsaron a seguir adelante en este camino.

Y en ultimo lugar, pero no menos importante, a mi alma mater que me acogió y formó, cuya influencia en mi desarrollo personal y profesional es invaluable.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Objetivos	11
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos.....	11
2 Marco teórico	12
Caudal medio.....	12
Balance hídrico a largo plazo	13
Características especiales de la ecuación de balance hídrico respecto a diferentes intervalos de tiempo.....	14
Ecuación del balance hídrico a largo plazo:	15
Semivariograma	17
Kriging	17
3 Metodología	21
Adquisición de grandes volúmenes de datos geoespaciales e hidrometeorológicos de una fuente confiable, de manera que estén fácilmente accesibles y sean precisos.	21
Desarrollo de un programa (en el lenguaje Python) que simplifique la manipulación de datos hidrometeorológicos y geoespaciales, para generar resultados aplicables y seguros, reduciendo procesos repetitivos y poco eficientes	23
Evaluación del código desarrollado mediante pruebas de correlación entre los caudales generados por el mismo y los caudales reales recolectados por el IDEAM u otras entidades, en estaciones limnométricas y limnigráficas.	25
4 Resultados	27
5 Análisis.....	37
6 Conclusiones	49

Referencias50

Lista de tablas

Tabla 1. Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.	36
Tabla 2. Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio.	46

Lista de figuras

Figura 1. Relación del error absoluto y el área de la cuenca.	47
Figura 2. Relación entre el error relativo y el área de la cuenca.	48

Siglas, acrónimos y abreviaturas

MDE	Modelo de Elevación Digital
AH	Área hidrográfica
ZH	Zona hidrográfica
SZH	Subzona hidrográfica

Resumen

El propósito de este estudio consiste en la estimación del caudal que fluye por un punto de aforo en la región hidrográfica Magdalena-Cauca de Colombia. Esta estimación se basa en el desarrollo de funciones en el lenguaje de programación Python, aprovechando el procesamiento de datos raster para delimitar las cuencas hidrográficas, y una vez obtenida la delimitación de las cuencas, se procede a calcular el caudal promedio utilizando la metodología del balance hídrico a largo plazo.

En resumen, este estudio demuestra que las herramientas de geoprocésamiento, al utilizar información secundaria, son capaces de estimar resultados con una precisión razonable, aunque con un margen de error que es inherente a este tipo de enfoque de investigación.

Palabras clave: cuenca, afluente, precipitación, caudal, raster, shapefile.

Abstract

The purpose of this study is to estimate the flow rate passing through a gauge point within the Magdalena-Cauca hydrographic region of Colombia. This estimation is based on the development of functions in the Python programming language, utilizing raster data processing to delineate hydrographic basins. Once the basins are delineated, the average flow rate is calculated using the long-term water balance methodology.

In summary, this study demonstrates that geoprocessing tools, when utilizing secondary information, are capable of estimating results with reasonable accuracy, albeit with an inherent margin of error associated with this type of research approach.

Keywords: watershed, tributary, precipitation, flow, raster, shapefile

Introducción

Particularmente en un país como Colombia que ostenta la distinción de ser uno de los países con las mayores reservas de agua dulce a nivel mundial, la estimación del caudal medio de cuencas hidrográficas es fundamental para la gestión del agua, la prevención de desastres, el desarrollo económico, la conservación del medio ambiente y la planificación de infraestructura. En resumen, el caudal medio de las cuencas hidrográficas es información clave para tomar decisiones bien fundamentadas y promover un uso sostenible de los recursos hídricos del país.

Un diseño hidrológico preciso requiere una cantidad significativa de datos. Desde el aspecto de la morfometría de la cuenca, se requieren modelos de elevación digital (DEM), mientras que desde la perspectiva de los parámetros hidrometeorológicos se necesitan registros históricos que muestren la evolución de la lluvia en la cuenca. No solo se necesitan datos, sino también herramientas y metodologías adecuadas para la recopilación y análisis de estos, herramientas tales como los softwares GIS o las librerías de Python que los respaldan, que han demostrado con el paso de las décadas su precisión y confiabilidad al momento de predecir con buena exactitud la magnitud de los eventos hídricos que se pueden presentar en una cuenca hidrográfica.

En orden de estimar el caudal medio de cualquier cuenca del área hidrográfica Magdalena-Cauca se procederá a recopilar datos hidrometeorológicos utilizando la información recopilada por las estaciones del IDEAM. Además, se obtendrán modelos de elevación digital mediante el portal ALOS PALSAR, una herramienta idónea para la obtención de modelos digitales de elevación. Para el análisis y procesamiento de los datos recopilados, se utilizará el lenguaje de programación Python y principalmente sus librerías Numpy, Geopandas, Rasterio y Pysheds, con el objetivo de delimitar la cuenca hidrográfica de interés y estimar su caudal medio.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Agilizar la obtención y manipulación de datos hidrometeorológicos y geoespaciales con el fin de calcular de manera más rápida y confiable el caudal medio de cualquier cuenca del área hidrográfica Magdalena-Cauca.

1.2 Objetivos específicos

- Adquirir grandes volúmenes de datos geoespaciales e hidrometeorológicos de una fuente confiable, de manera que estén fácilmente accesibles y sean precisos.
- Desarrollar un programa que simplifique la manipulación de datos hidrometeorológicos y geoespaciales, para generar resultados aplicables y seguros, reduciendo procesos repetitivos y poco eficientes.
- Evaluar el código desarrollado mediante pruebas de correlación entre los caudales generados por el mismo y los caudales reales recolectados por el IDEAM u otras entidades, en puntos geográficos específicos.

2 Marco teórico

Según Linsley et al (1985), la hidrología es la ciencia que trata del agua, su ocurrencia, su circulación, distribución, sus propiedades y su relación con el ambiente y los seres vivos.

La hidrología proporciona los elementos técnicos y científicos que permiten conocer adecuadamente el ciclo del agua y realizar investigaciones y trabajos de regulación y ordenación de las cuencas hidrográficas.

No es de extrañar que la Hidrología sea parte esencial del diseño de obras hidráulicas, ya que la Hidrología es insumo clave cuando se trata de prever la influencia que tendrá el ciclo hidrológico del agua en el comportamiento de las estructuras hidráulicas ante eventos críticos.

Según Pérez Porto y Gardey (2018) la idea de hidráulica puede usarse para aludir a las técnicas, metodologías y recursos que permiten contener, guiar y aprovechar el agua. En este sentido, el concepto se vincula al aprovechamiento del agua para producir energía, al desarrollo de acueductos, etc.

Por esto la hidráulica tiene como insumo principal la disponibilidad del recurso hídrico, que es estudiada por la hidrología, así la hidráulica no puede separarse de la hidrología.

Al abordar el tema de la disponibilidad hídrica, resulta imprescindible considerar el caudal medio, ya que este indicador desempeña un papel fundamental en la estimación de la cantidad de agua que atraviesa una cuenca hidrográfica durante un período determinado.

Según Chow et al (1988), el caudal medio se define como el promedio aritmético de los caudales instantáneos registrados en un punto de control a lo largo de un período determinado, generalmente expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Este indicador hidrológico es ampliamente utilizado para caracterizar el flujo de agua que atraviesa una cuenca en un tiempo dado y proporciona información clave sobre el comportamiento hidrológico y el régimen de escurrimiento en dicha área.

A continuación, se describe la teoría utilizada para la estimación de los caudales medios para las cuencas de interés hidrográfico.

Caudal medio

Para la estimación de los caudales es imperativo tener claridad sobre cómo es la dinámica de la cuenca en términos espaciotemporales, toda vez que es vital comprender el impacto que genera el entorno y las características de la cuenca con respecto al comportamiento hídrico de la zona.

Balance hídrico a largo plazo

El estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masa, también conocido como ecuación de continuidad, la cual establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante un intervalo de tiempo definido, la diferencia entre las entradas y las salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. La ecuación del balance hídrico, para cualquier cuenca natural o masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo, y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua.

En general, las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve, la infiltración en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera (Q_{SI}). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación (en realidad evapotranspiración) desde la superficie de la masa de agua (E) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada (Q_{SO}). Cuando las entradas superan a las salidas, el volumen de agua almacenada (DS) aumenta y cuando ocurre lo contrario, disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia (W).

Por tanto, el balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, es representado por la siguiente ecuación:

$$(P + Q_{SI}) - (E + Q_{SO}) = DS + W$$

Ecuación 1. Ecuación del balance hídrico.

Donde:

P: Es la precipitación.

E: Es la evapotranspiración.

QSI: Es el caudal de aguas superficiales que entra al volumen de control.

QSO: Es el caudal de aguas superficiales que sale del volumen de control.

DS: Es el volumen de agua dentro del volumen de control.

W: Representa la acumulación de las incertidumbres generada en la estimación de las variables de la ecuación

Para su aplicación a ciertos casos, la ecuación del balance hídrico podrá simplificarse o hacerse más compleja, dependiendo de los datos disponibles, del objeto del cálculo, del tipo de masa de agua (cuenca de un río, lago o embalse, etc.), de las dimensiones de la masa de agua, de sus características hidrográficas e hidrológicas, de la duración del balance y de la fase del régimen hidrológico (crecida, baja crecida) para el cual se calcula el balance hídrico.

En una cuenca de una corriente superficial con una divisoria de cuencas bien definida, las aportaciones superficiales son prácticamente despreciables (suponiendo que no haya trasvases artificiales desde otras cuencas) y, por lo tanto, QSI no figura en la ecuación del balance para una cuenca de un río. Por esto, la ecuación del balance a la salida de la cuenca es la siguiente:

$$P - E - Q = DS + W$$

Ecuación 2. Ecuación del balance a la salida de la cuenca.

Donde:

Q: Hace referencia a la descarga del río desde la cuenca.

Características especiales de la ecuación de balance hídrico respecto a diferentes intervalos de tiempo

El balance hídrico se puede calcular para cualquier intervalo de tiempo, pero deberá hacerse una distinción entre balances medios y balances para períodos determinados (tales como un año, una estación, un mes o un número de días).

Los balances hídricos para valores medios se calculan para un ciclo anual (año calendario o año hidrológico), aunque también pueden hacerse para cualquier estación o mes. Para un largo período (mayor que 20 años) los incrementos del agua almacenada, positivos y negativos, en la escala anual, tienden a equilibrarse y su valor neto al final puede considerarse igual a cero. La situación contraria ocurre cuando se calculan los balances hídricos para períodos cortos, para los cuales $DS \neq 0$.

Cuanto más corto es el intervalo de tiempo, más precisa deberá ser la estimación de los componentes del balance hídrico y más subdividido estarán los valores de DS y demás parámetros. Esto da como resultado una ecuación del balance compleja, que es difícil de ajustar aceptablemente. El término DS deberá, también, tenerse en cuenta en la determinación de balances medios estacionales o mensuales.

Ecuación del balance hídrico a largo plazo:

Para formular el balance hídrico, considérese la ecuación diferencial de conservación de masa dentro de una cuenca hidrográfica, que se define como (Poveda Jaramillo G. ,2001):

$$\frac{dS}{dt} = P(t) - E(t) - Q(t)$$

Ecuación 3. Balance hídrico a largo plazo.

Donde:

S(t): Representa el almacenamiento en el suelo y en los acuíferos, en función del tiempo

P(t): Representa la precipitación real asociadas a la cuenca

E(t): Representa la evaporación real asociada a la cuenca

Q(t): Representa el caudal de salida de la cuenca

Poveda, et al. (2001), establece que si se integra la ecuación anterior en el largo plazo (15-20 años), el cambio de almacenamiento (lado izquierdo) se vuelve despreciable en relación con los demás términos de la ecuación. Además, $P(t)$, $E(t)$ y $Q(t)$, se pueden reemplazar por sus valores promedios de largo plazo, P , E y Q , de acuerdo con la Ley de los Grandes Números. Por lo tanto, la aproximación de la ecuación del balance hídrico a largo plazo es:

$$Q = P - E$$

Ecuación 4. Balance hídrico a largo plazo simplificado.

Los términos de esta ecuación típicamente se dan en unidades de $[LT^{-1}]$, y por tanto, el área de la cuenca resulta como factor de escala para la estimación del caudal, Q $[L^3T^{-1}]$. Por tanto, la estimación del caudal medio multianual requiere de estimativos de la precipitación y de la evapotranspiración real en la cuenca, con una distribución de la topografía como una función bidimensional del espacio, $f(x,y)$, de manera que:

$$Q = A \int \int [P(x,y) - E(x,y)] dx dy$$

Ecuación 5. Ecuación caudal medio.

Como se ha observado previamente, el caudal medio está vinculado a la distribución espacial de la precipitación y la evapotranspiración real. En el ámbito de los sistemas de información geográfica, existen métodos que permiten estimar adecuadamente esta distribución. Uno de los enfoques más reconocidos y ampliamente utilizado para esta tarea es la interpolación espacial, específicamente la técnica conocida como kriging, la cual ha sido seleccionada como la preferida en el contexto de esta investigación.

El Semivariograma y el Kriging son dos herramientas fundamentales utilizadas en el análisis espacial y la estimación de valores en ubicaciones no muestreadas dentro de un dominio geográfico. Ambas técnicas tienen aplicaciones en diversas disciplinas, como la geología, la hidrología, la agricultura y la meteorología. A continuación, se presenta un resumen del respaldo teórico de cada uno:

Semivariograma

El Semivariograma es una medida estadística que cuantifica la variabilidad espacial de una variable en función de la distancia entre diferentes puntos de muestreo. Esta herramienta es especialmente útil en el análisis de datos geoespaciales, ya que proporciona información sobre la estructura de dependencia espacial presente en una variable.

El concepto básico del Semivariograma radica en comparar las diferencias de valores de una variable entre pares de puntos de muestreo en función de su distancia. A medida que la distancia entre los puntos aumenta, la diferencia en los valores de la variable también tiende a aumentar. Para funciones aleatorias estacionarias el semivariograma está definido por la siguiente ecuación (Wackernagel H. ,1995):

$$y(x + h, x) = y(h) = \frac{1}{2} * [Z(x + h) - Z(x)]^2$$

Ecuación 6. Ecuación semivariograma.

x: posición en el espacio.

h: vector de distancia entre dos valores.

Z(x): valor de la variable de interés en la ubicación x.

y: medida de la desimilitud entre dos valores.

El resultado del Semivariograma es un gráfico que muestra la semivariante en función de la distancia. Este gráfico, conocido como "nube de puntos semivariograma", puede ser utilizado para identificar patrones espaciales, como la presencia de autocorrelación espacial y la estructura de dependencia espacial de la variable en estudio.

Kriging

El Kriging es una técnica de interpolación espacial que se basa en el análisis del Semivariograma para realizar estimaciones de valores en ubicaciones no muestreadas dentro de un área geográfica. De forma general la estimación en un punto, teniendo en cuenta los valores de los puntos más cercanos a él, se puede realizar a través de la siguiente expresión (Londoño Ciro L. y Valdés Quintero J. ,2012):

$$Z_0 = \sum \lambda_i * Z_i$$

Ecuación 7. Ecuación Kriging.

Z_i = Valores conocidos

λ_i = Pesos de los valores conocidos

Z_0 = Valor a estimar

El Kriging se fundamenta en el principio de que los valores en ubicaciones cercanas tienen una mayor similitud o correlación que aquellos más alejados. Utilizando la información proporcionada por el Semivariograma, el Kriging estima los valores desconocidos ponderando las contribuciones de los puntos vecinos conocidos según su cercanía y su nivel de autocorrelación espacial.

En conjunto, el Semivariograma y el Kriging son una gran combinación para analizar y modelar la variabilidad espacial de una variable, lo que resulta fundamental en la toma de decisiones informadas y la planificación en áreas donde la ubicación y distribución espacial de fenómenos es de gran relevancia.

A diferencia de la precipitación, la disponibilidad de datos suficientes para llevar a cabo una interpolación kriging sólida de la evapotranspiración real en Colombia es limitada. En consecuencia, se han concebido enfoques alternativos para estimar la distribución espacial de la evapotranspiración real a partir de fuentes de información secundaria. Uno de estos métodos destacados es el denominado método de Turc, el cual será empleado en esta investigación.

A partir de los datos de 254 cuencas situadas en todo el mundo, Turc halló en 1954 una relación entre la evapotranspiración real, la precipitación promedio anual y la temperatura (Remenieras ,1974), así:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{(0.9 + \frac{P^2}{L^2})}}$$

Ecuación 8. Evapotranspiración real media anual Turc.

Donde:

ETR: Evapotranspiración real media anual (mm).

P: Precipitación media anual (mm).

L: Parámetro heliotérmico.

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Ecuación 9. Parámetro heliotérmico.

Donde:

T: Temperatura media anual °C.

En cuanto a la determinación de la distribución espacial de la temperatura, un elemento crítico para el cálculo del parámetro heliotérmico, se empleará el método de regionalización propuesto por Cenicafé (Chaves & Jaramillo, 1998) que es una buena manera de estimar la temperatura media multianual en cualquier lugar del país. Dicha regionalización, fue elaborada para las diferentes regiones del país tomando como información básica los registros de temperatura media mensual del aire en superficie de 1002 estaciones. Los resultados obtenidos permitieron obtener las siguientes relaciones:

- Región Andina

$$T_{MEDI A} = 29.42 - 0.0061 * H$$

Ecuación 10. Ecuación temperatura media, región andina.

- Región Atlántica

$$T_{MEDI A} = 27.72 - 0.0055 * H$$

Ecuación 11. Ecuación temperatura media, región atlántica.

- Región Oriental (Orinoquía y Amazonía)

$$T_{MEDI A} = 27.37 - 0.0057 * H$$

Ecuación 12. Ecuación temperatura media, región oriental.

- Región Pacífica

$$T_{MEDI A} = 27.05 - 0.0057 * H$$

Ecuación 13. Ecuación temperatura media, región pacífica.

Donde $T_{MEDI A}$ corresponde a la temperatura media multianual (en °C) y H es la altura sobre el nivel del mar (m). Es de anotar, que la dependencia lineal empírica expresada en las relaciones de Cenicafé concuerda con el decrecimiento de la temperatura con la altura sobre el nivel del mar en condiciones adiabáticas (Velez, 2000).

Con el propósito de optimizar la eficiencia de los procedimientos de análisis de rasters empleados en la delimitación de una cuenca hidrográfica y en la estimación del caudal medio correspondiente, se adoptará la zonificación hidrográfica de Colombia como indicador preliminar para evaluar la extensión geográfica de la cuenca de estudio. La zonificación hidrográfica divide a Colombia en cinco (5) áreas hidrográficas que incluyen cuarenta y un (41) zonas hidrográficas y trescientas once (311) subzonas hidrográficas en total (IDEAM, 2013).

3 Metodología

Adquisición de grandes volúmenes de datos geoespaciales e hidrometeorológicos de una fuente confiable, de manera que estén fácilmente accesibles y sean precisos.

Se procedió a realizar una solicitud formal al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con el fin de obtener los registros históricos de precipitación de todas las estaciones pluviográficas, pluviométricas, agrometeorológicas, así como las estaciones climáticas principales y climáticas ordinarias que se encuentran bajo su supervisión. Paralelamente, también se solicitó el acceso a los registros históricos de caudales de todas las estaciones limnigráficas y limnimétricas.

Ambas solicitudes fueron tramitadas mediante el portal oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), específicamente a través de su plataforma virtual (ideam.gov.co). En respuesta a dichas solicitudes, se proporcionó un total de dos carpetas, cada una conteniendo información relevante.

La primera carpeta comprendía los registros de las estaciones de precipitación, presentando archivos en formato de documento de texto, donde cada estación contaba con un archivo individual. Estos archivos albergaban los registros diarios de precipitación asociados a cada estación, presentados en una estructura de filas correspondientes a cada día registrado y columnas que contenían la fecha y el valor de la precipitación registrada para dicho día.

Por otra parte, en la segunda carpeta se encontraban los registros de las estaciones de caudales, presentados en archivos con formato de documento de texto. Cada estación contaba con tres archivos individuales, los cuales contenían los registros mensuales de caudales mínimos, medios y máximos respectivamente. La disposición de los datos se estructuraba en filas correspondientes a cada mes registrado y columnas que contenían la fecha y el valor de caudal medio registrado para dicho mes.

No obstante, además de la fecha y el valor de precipitación o caudal, es de vital importancia contar con las coordenadas geográficas de las estaciones para llevar a cabo su georreferenciación y asignación espacial en relación con nuestros puntos de interés. Este proceso permite otorgarles

relevancia y peso a los registros de las estaciones en función de su cercanía a las áreas de estudio determinadas.

Con el fin de lograr este objetivo, se optó por descargar el Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) proporcionado por el IDEAM, que contiene información detallada de las estaciones. A partir de estos datos, se procedió a crear un documento de texto que consiste en un diccionario, donde cada estación está representada por su código único junto a sus coordenadas geográficas, específicamente en el sistema de referencia WGS84.

Finalmente, los documentos de texto que contienen los registros históricos constituirían el insumo principal para el desarrollo de las funciones en Python. Python es ampliamente utilizado en tareas de procesamiento de datos y análisis debido a su legibilidad, versatilidad y diversas librerías disponibles para manipulación y visualización de datos, además de ofrecer gran facilidad para leer y procesar datos provenientes del tipo de archivo documento de texto.

Con el propósito de depurar la información relevante a extraer de los registros históricos, se desarrolló una función en el lenguaje de programación Python. El objetivo primordial de dicha función consistía en filtrar las estaciones que serían consideradas para un análisis de balance hídrico a largo plazo. Para lograr esto, se establecieron tres parámetros fundamentales, cuyo orden de importancia se detalla a continuación:

- **Cantidad de registros:** Se fijó un criterio de selección que requería que cada estación contara con un mínimo de veinte (20) años de registros de precipitación o de diez (10) años de registros para las estaciones de caudal.
- **Modernidad:** Se aplicó un segundo criterio, en el cual se descartaban aquellas estaciones cuyos registros de precipitación o caudal eran todos anteriores al año 2010. El propósito detrás de esta medida consistía en utilizar datos más recientes que reflejaran con mayor precisión y actualidad el comportamiento de los fenómenos hidrometeorológicos.
- **Continuidad:** Finalmente, una vez cumplidos los dos parámetros anteriores, se procedió a verificar la presencia de datos faltantes en el registro temporal de cada estación. Aquellas estaciones que presentaran un período continuo de datos faltantes con una duración superior a 5 años fueron excluidas del análisis.

Por otro lado, se adquirió un Modelo Digital de Elevación (MDE) de Colombia con una resolución inicial de 38x38 metros desde la plataforma "Colombia en Mapas". Posteriormente, se realizó un recorte de esta información geoespacial para limitar su cobertura al área de la cuenca hidrográfica Magdalena-Cauca. Asimismo, se efectuó un proceso de remuestreo para ajustar la resolución a 60x60 metros. Ambos ajustes se llevaron a cabo con el propósito de optimizar el proceso de delimitación de las cuencas hidrográficas de interés.

Desarrollo de un programa (en el lenguaje Python) que simplifique la manipulación de datos hidrometeorológicos y geoespaciales, para generar resultados aplicables y seguros, reduciendo procesos repetitivos y poco eficientes

Se llevó a cabo el proceso de delimitación de las cuencas hidrográficas utilizando como punto de partida el Modelo Digital de Elevación (MDE) que abarca el área de la cuenca hidrográfica Magdalena-Cauca. Este proceso se fundamentó en la zonificación hidrográfica de Colombia y se estructuró en dos enfoques distintos para la delimitación de cuencas, en función de la fuente hídrica asociada al punto de aforo de interés.

En caso de que el punto de aforo estuviera relacionado con uno de los ríos enumerados a continuación (Cauca, Magdalena, Nechí, San Jorge, Saldaña, Sogamoso o Cesar), se procedía a identificar la correspondiente zona hidrográfica a la que pertenecía dicho punto de aforo. En los casos donde se detectaban zonas hidrográficas tributarias que desembocaban en la zona hidrográfica del punto de aforo (por ejemplo, en la zona hidrográfica "Medio Magdalena", donde confluyen las zonas hidrográficas "Alto Magdalena", "Saldaña" y "Sogamoso"), se realizaba una integración de la zona hidrográfica de interés con las zonas hidrográficas aportantes mediante un proceso geoespacial de shapefiles. A través de este archivo resultante, se procedía al recorte del MDE del área hidrográfica Magdalena-Cauca, disminuyendo aún más la cobertura del MDE en el que se ejecutaban todos los procesos de acondicionamiento y delimitado de cuencas.

En el caso opuesto, cuando no se identificaban zonas hidrográficas tributarias que desembocaran en la zona hidrográfica de interés, se efectuaba el recorte del MDE del área hidrográfica Magdalena-Cauca solo en la zona hidrográfica que comprendía el punto de aforo de la cuenca a delimitar. Es relevante mencionar que, dado que todas las demás zonas hidrográficas

desembocaban en la zona hidrográfica "Bajo Magdalena", el recorte del MDE de Colombia se ejecutaba utilizando el shapefile correspondiente al Área Hidrográfica de Magdalena-Cauca.

Posteriormente, se realizaban los procesos de acondicionamiento del MDE recortado, que involucraban el relleno de pozos, el relleno de depresiones y el procesamiento de zonas planas. Estos procedimientos se efectuaban con el propósito de permitir el adecuado drenaje del MDE. A continuación, se iniciaban las etapas de delimitación de la cuenca, que comprendían el cálculo del raster de direcciones de flujo y, a partir de este, el raster de acumulaciones de flujo. Seguidamente, el punto de aforo se ajustaba al flujo más cercano en función del raster de acumulaciones de flujo. Con el punto de aforo ajustado y las direcciones de flujo como referencia, se procedía a trazar el límite de la cuenca y a exportarlo en formato shapefile, generando así el resultado final del proceso de delimitación de cuencas hidrográficas.

Para el cálculo del caudal medio en el punto de aforo, se procederá a generar rasters de precipitación anual y evapotranspiración real anual en la cuenca hidrográfica delimitada mediante operaciones algebraicas de mapas. Estos rasters serán sometidos a una resta, tal como se muestra en la Ecuación 5, obteniendo de esta forma el raster de escorrentía superficial. Posteriormente, se llevará a cabo un promedio de los valores de las celdas en el raster de escorrentía superficial, pero solo se considerarán aquellos que se encuentren dentro de los límites geométricos de la cuenca que abastece al punto de interés. Este valor promedio será multiplicado por el área de la cuenca hidrográfica, habiendo calculado así, a partir de un balance hídrico a largo plazo el caudal medio que pasa por el punto de interés.

Para la generación de los raster de precipitación, se implementará el método de kriging, utilizando como datos de entrada los valores de precipitación media anual de las estaciones de precipitación del IDEAM.

El funcionamiento inherente del kriging evidencia que únicamente las estaciones más próximas a la cuenca delimitada tendrán un impacto significativo en el proceso de creación del raster de precipitación. Considerando este aspecto, se procedió a crear una función cuya finalidad fuese identificar las n estaciones más cercanas al centroide geométrico de la cuenca de interés, donde se tomará un valor específico de n , en este caso, cuarenta (40) estaciones. Estas estaciones seleccionadas deberán cumplir con los parámetros establecidos previamente para garantizar la calidad y confiabilidad de los datos utilizados en el balance hídrico a largo plazo.

Después de obtener las cuarenta (40) estaciones de interpolación, con una segunda función se procede a calcular la precipitación mensual media para cada mes en cada estación con los registros existentes en los documentos de texto. De esta manera, se obtiene la suma de las precipitaciones mensuales medias, que resultará en la precipitación anual media. Este enfoque se adopta para evitar la presencia de datos nulos en la escala mensual y garantizar así resultados más fiables y veraces en el análisis hidrometeorológico

A partir de la precipitación anual media de las estaciones seleccionadas, con ayuda de una nueva función se generará un variograma experimental. Luego, se ajustará un variograma teórico al variograma experimental, lo cual permitirá definir la función de correlación entre los puntos. Posteriormente, se llevará a cabo un kriging simple empleando el variograma teórico ajustado, lo que resultará en la creación de un raster de precipitación anual. Los límites de este raster se delimitarán mediante los límites geométricos de la cuenca que abastece el punto o zona de interés. Dicho raster de precipitación anual representará el primer insumo crucial para el cálculo del caudal medio.

Como componente final y determinante en el cálculo del caudal medio en la cuenca de estudio, se incorpora el raster de evapotranspiración. Este archivo se generará mediante operaciones de álgebra de mapas, utilizando como insumos principales el MDE que ha sido previamente recortado para abarcar la cuenca delimitada y el raster de precipitaciones. Como ya se mencionó anteriormente la metodología empleada para estimar la evapotranspiración se basa en el enfoque de Turc, a partir de la Ecuación 8.

Evaluación del código desarrollado mediante pruebas de correlación entre los caudales generados por el mismo y los caudales reales recolectados por el IDEAM u otras entidades, en estaciones limnimétricas y limnigráficas.

Las estaciones limnimétricas y limnigráficas que cumplan con el parámetro previamente mencionado referente a la cantidad de registros serán objeto de estimación de caudales medios mensuales mediante un cálculo basado en el promedio aritmético de los registros de caudales medios correspondientes a cada mes. Esta estimación se lleva a cabo con el propósito final de calcular el caudal medio anual a través del promedio de los caudales mensuales.

Subsecuentemente, una vez calculado el caudal medio para cada estación, se procederá a ingresar sus coordenadas en los módulos correspondientes de delimitación de cuencas y estimación de caudales medios mediante el método de balance hídrico. Este proceso se llevará a cabo de manera secuencial con el objetivo de obtener tanto el área de la cuenca que contribuye a cada estación como el caudal medio a largo plazo, determinado mediante dicho balance hídrico.

4 Resultados

En la Tabla 1 se muestra el código de las estaciones limnigráficas y limnimétricas estudiadas, el afluente al que pertenecen, el área de la cuenca de la cual son el punto de aforo y el caudal medio exacto (promedio de los registros históricos) y estimado (calculado a partir del balance hídrico a largo plazo).

Las estaciones limnigráficas y limnimétricas estudiadas son aquellas que cuentan con más de diez (10) años de registro. Adicionalmente, se ha deliberado no incluir aquellas ubicadas en los cauces principales de la región hidrográfica Magdalena-Cauca. Esta elección se fundamenta en el hecho de que los ríos de mayor envergadura y las cuencas de gran magnitud ya cuentan con una buena cantidad de información primaria y secundaria.

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
1	24037080	Pesca	101.552	1.105	0.688
2	24037020	Tuta	6.886	2.172	0.04
3	24037580	Riogrande	144.248	2.255	0.965
4	24037470	Tuta	312.353	2.523	2.077
5	24037120	Iza	98.972	0.66	0.763
6	24037110	Chiquito	23.525	1.806	0.103
7	24037300	Mongui	24.964	1.102	0.331
8	24037460	Canal Principal	1501.649	2.838	12.465
9	24037290	Chicamocha	2088.188	9.746	16.715
10	24037590	La Chorrera	66.324	0.275	0.436
11	24037030	Tuta	431.127	2.549	2.68
12	24037090	Chulo	363.729	1.277	2.425
13	24037450	Salitre	52.712	0.234	0.451
14	24037070	Sotaquira	138.25	1.428	2.686
15	24037130	Chicamocha	975.208	5.371	12.171
16	24037320	Chicamocha	1056.936	5.203	10.337
17	24037480	Surba	41.573	0.654	0.911
18	21197090	Sumapaz	695.901	12.065	9.749
19	21197010	Sumapaz	919.812	19.449	15.7
20	21197030	Sumapaz	1155.756	26.851	19.243

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
21	21197150	Sumapaz	2412.149	44.451	160.826
22	21197080	Blanco	110.083	1.864	1.588
23	21197110	Subia	155.591	3.278	0.916
24	21207960	Bogota	4368.617	41.423	30.602
25	24017700	Gachaneca	17.819	0.425	0.209
26	24017240	Gachaneca	18.592	0.229	0.217
27	23067070	Villeta	430.171	8.617	8.884
28	23067060	Negro	1108.212	37.315	40
29	23067050	Negro	2524.298	71.984	66.883
30	23067090	Negro	429.848	11.119	15.225
31	23067080	Negro	705.484	22.908	25.592
32	23067020	Negro	3093.261	80.686	76.624
33	23127010	Minero	83.661	78.008	2.589
34	23067040	Negro	6.725	138.639	0.135
35	24017730	Gachaneca	18.592	0.232	0.217
36	24017670	Canal Ruchical	6.85	0.055	0.054
37	24017620	Gachaneca	171.857	0.497	1.213
38	24017830	Sutamarchan	328.352	2.98	3.399
39	24017740	Cane	19.84	2.148	0.251
40	24017820	Cane	78	0.17	1.053
41	24017900	Quebrada La Sicha	8.964	0.396	0.314
42	24017590	Suarez	2227.708	32.677	99.11
43	24017600	Moniquira	1154.283	11.913	13.018
44	23127060	Carare	19.319	234.933	0.404
45	23127020	Carare	5.941	261.175	0.268
46	23127050	Carare	6400.006	305.726	1348.884
47	23107020	Regla	5.519	75.468	0.183
48	23147020	Opon	1723.262	90.349	141.548
49	24017710	Suarez	5289.133	181.001	143.812
50	24017570	Suarez	5287.924	131.648	143.76
51	23147040	La Colorada	1448.241	66.058	33.088
52	23147030	Oponcito	1448.546	67.47	33.095
53	24057030	Quebrada Zarzal	169.134	30.466	4.291
54	23187040	Quebrada Stos Gutierrez	102.695	5.405	4.088
55	23187020	Quebrada Stos Gutierrez	102.695	6.974	4.088
56	24037360	Chicamocha	9361.291	124.425	237.872

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
57	23197690	De Oro	212.608	3.966	3.722
58	24057050	Chucuri	375.271	13.766	9.367
59	23197460	Frio	41.016	1.006	0.995
60	24060060	0	1358.488	480.249	33.412
61	23197700	Surata	471.488	8.934	6.222
62	23197290	Lebrija	1255.357	17.867	14.596
63	23177010	Cimitarra	2631.615	81.495	110.504
64	23177020	Bzo La Rompida	46.561	182.901	1.77
65	23207010	Quebrada La Fria	5.727	5.417	0.104
66	23187140	Canal Principal	131.601	3.681	5.176
67	23187300	Canal Principal	3343.334	2.96	58.169
68	23187240	Canal D1	4.007	0.903	0.119
69	23187250	Canal D1	28.98	1.726	0.89
70	23187290	Canal Principal	3424.156	1.161	61.425
71	23197370	Lebrija	4.696	91.213	0.415
72	23197410	San Alberto	220.817	20.779	5.697
73	23197360	Cachira	5.758	12.337	0.153
74	25028350	Cno Rompedero	84.939	72.915	12.11
75	25027910	Cno Caribona	4.635	289.308	0.409
76	25027400	Cno Las Palomas	33.67	149.839	1.194
77	25027620	Bzo Papayal	3.833	51.983	0.063
78	23207050	Bzo Morales	2196.886	1061.014	15.502
79	23207060	Bzo Morales	8.627	1089.619	0.122
80	25027080	Animito	285.177	4.317	4.166
81	25027930	Magdalena (Loba)	20.113	4913.47	0.465
82	25027420	Cno Violo	4.24	369.199	0.109
83	25027570	(Chicagua)Magdalena	10.195	760.044	0.218
84	25027530	Magdalena (Loba)	4.091	4847.343	0.141
85	28027050	Maracas	3.911	9.169	0.033
86	28027040	Sicarare	4.964	3.009	0.037
87	28027030	Magiriaimo	12.499	3.777	0.08
88	28027020	Jobo	3.872	2.118	0.016
89	28037020	Los Clavos	5.789	2.488	0.022
90	28037010	Azucarabuena	5.091	2.705	0.011
91	25027580	(Chicagua)Magdalena	29.644	875.199	0.751
92	28047050	Ariguani	2768.744	13.739	27.601

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
93	28047040	Ariguanicito	171.929	2.685	1.756
94	28047010	Ariguani	727.592	15.9	15.554
95	29067060	Fundacion	960.799	24.922	33.278
96	29067120	Fundacion	1000.786	26.307	33.72
97	29067150	Aracataca	728.576	16.843	24.62
98	29067130	Aracataca	1815.178	17.027	64.71
99	24037430	Canal Principal	4.037	0.936	0.028
100	24037190	Chicamocha	1415.032	6.651	12.924
101	24037270	Quebrada Chiticuy	68.263	0.492	1.108
102	24037510	Chicamocha	5.144	38.633	0.036
103	24037410	Minas	249.333	2.297	3.706
104	24037370	Onzaga	343.65	8.49	13.097
105	24037490	Nevado	1071.05	23.317	19.042
106	24037390	Chicamocha	6163.619	79.03	1358.581
107	24037100	Surba	4.37	0.666	0.087
108	24027030	Pienta	614.338	26.532	34.822
109	24017580	Oibita	313.893	21.568	20.863
110	24027050	Taquiza	603.907	25.716	25.593
111	24027070	Fonce	5.163	63.996	0.155
112	24017640	Suarez	6932.955	212.165	279.54
113	24027060	Monchia	165.913	8.381	7.216
114	24027010	Fonce	2067.049	84.449	92.672
115	24040060	Atrato	107.482	298.486	2.227
116	24037040	Nevado	150.463	4.3	2.941
117	24037380	Nevado	220.926	8.498	4.422
118	24027040	Mogoticos	180.263	6.586	6.653
119	24037010	Manco	97.727	2.239	1.926
120	23197430	Tachira	76.578	1.79	1.728
121	23197270	Vetas	4.374	2.629	0.05
122	23197130	Santa Cruz	127.204	4.637	2.279
123	23197400	Lebrija	2864.995	58.45	44.442
124	25027890	Animegrande	120.738	2.724	2.794
125	28027160	Calenturitas	7542.391	9.509	77.218
126	28037060	Garupal	165.665	1.775	1.52
127	28037130	Diluvio	21.927	4.219	0.172
128	28037040	Mariangola	119.794	1.982	3.118

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
129	28047020	Ariguani	34.214	1.35	1.277
130	28017100	Guatapuri	4.133	18.542	0.023
131	28017050	Guatapuri	777.784	17.653	55.807
132	28017120	Guatapuri	17.788	16.355	0.286
133	28017110	Badillo	473.669	9.912	10.842
134	29067140	Tucurinca	429.781	19.931	41.302
135	29067010	Tucurinca	429.595	17.164	41.294
136	29067020	Tucurinca	363.514	15.648	43.555
137	29067050	Sevilla	5.301	12.803	0.078
138	29067160	Sevilla	5.578	6.816	0.208
139	29067030	Sevilla	61.715	11.265	4.153
140	29067040	Orihueca	58.147	2.239	1.115
141	29067070	Frio	5.169	13.236	0.024
142	21017050	Guarapas	244.348	8.072	7.29
143	21037020	Suaza	345.503	24.953	9.545
144	21037010	Suaza	983.095	43.199	20.274
145	21017020	Sombrerillos	1110.487	16.331	43.881
146	21057110	Bedon	282.947	20.361	14.856
147	21057080	La Plata	158.374	39.934	4.806
148	21057020	Bedon	105.199	0.657	6.076
149	21057010	Estanquillo	3.94	0.719	0.235
150	21057120	Bedon	43.098	2.508	2.705
151	26017110	Vinagre	544.553	3.446	99.465
152	26017040	Piedras	56.986	2.42	1.465
153	26027240	Palace	113.444	3.26	3.695
154	26027080	Cofre	52.428	1.215	1.168
155	21057030	Paez	2281.432	95.651	96.173
156	26027200	Palace	243.978	6.79	7.054
157	21057070	Paez	5.35	58.097	0.054
158	26037030	Hondo	119.8	7.33	3.274
159	26027220	Quebrada Sate	28.375	0.771	1.173
160	26037010	Sucio	150.122	5.702	10.903
161	21117110	Motilon	30.314	1.03	0.635
162	21117100	Ceibas	102.898	2.724	2.146
163	21117130	Quebrada Los Micos	228.361	0.332	4.771
164	21117080	Ceibas	223.938	4.794	4.714

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km²)	CAUDAL EXACTO (m³/s)	CAUDAL ESTIMADO (m³/s)
165	21107030	Neiva	215.579	4.928	4.519
166	21107020	Neiva	607.772	16.145	13.384
167	21087070	Yaguara	481.653	9.75	13.001
168	21087080	Yaguara	659.863	17.356	16.65
169	21087040	Pederal	104.449	3.569	3.26
170	21127010	Tune	180.527	5.206	4.398
171	21047040	Quebrada Buena Vista	4.691	0.586	0.037
172	21057050	La Plata	1201.744	45.861	50.432
173	21057060	Paez	4810.201	173.643	340.702
174	21057130	Negro	462.701	16.619	17.066
175	21087050	Iquira	121.165	3.279	4.075
176	21087100	Iquira	32.45	0.948	1.011
177	21127030	Bache	3.686	6.147	0.117
178	22027020	Ata	908.525	28.825	44.816
179	22027010	Ata	1366.898	56.67	763.913
180	21117160	Guaroco	6.217	0.423	0.036
181	21147050	Venado	520.05	17.196	9.225
182	21147030	Cabrera	1646.183	50.797	105.506
183	21147010	Cabrera	2701.58	73.136	46.615
184	21147080	Cabrera	1169.677	32.759	48.159
185	21137040	Anchique	214.721	11.559	3.754
186	21127020	Bache	296.457	8.012	8.392
187	21127040	Bache	18.714	28.575	0.198
188	21117090	Villavieja	513.185	6.151	4.228
189	21137030	Aipe	648.492	16.088	19.754
190	22057050	Quebrada Pole	167.217	8.178	7.121
191	22047010	Amoya	1140.082	49.363	58.846
192	22057080	Meche	14.209	1.841	0.391
193	21167080	Negro	437.941	17.974	17.495
194	21167020	Prado	1606.205	52.396	90.918
195	21137080	Chenche	18.725	0.626	0.333
196	21137020	Chenche	16.684	9.017	0.196
197	22067010	Ortega	278.992	11.685	5.609
198	21167060	Cuinde	25.542	5.963	0.611
199	22067020	Tetuan	369.442	13.375	12.605
200	22077030	Cucuana	226.052	5.241	6.993

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
201	22077070	Cucuana	586.506	13.062	18.653
202	22077050	Chili	418.218	11.651	10.746
203	22077060	Tuamo	237.032	7.703	6.245
204	21217140	Anaime	109.869	2.374	2.206
205	21217120	Coello	790.015	16.333	28.962
206	21217270	Anaime	256.901	6.022	6.202
207	22017010	Anamichu	650.432	29.328	31.789
208	22037010	Mendarco	107.237	6.855	4.676
209	22017030	Blanco	106.184	3.7	5.161
210	26127150	Lejos	87.688	2.311	3.8
211	26127010	La Vieja	1647.356	56.747	77.822
212	26127090	Barbas	70.727	4.341	4.029
213	26127100	Barbas	43.782	2.798	2.678
214	26137220	Otun	4.025	9.951	0.242
215	22077040	Cucuana	1741.311	47.518	50.795
216	21167090	Cunday	335.418	9.179	6.834
217	21167050	Prado	140.868	4.52	2.991
218	21197100	Sumapaz	37.903	44.247	0.853
219	21187020	Luisa	164.359	4.932	4.725
220	21187030	Luisa	314.082	8.627	7.314
221	21217200	Coello	1086.404	24.267	54.861
222	21217070	Coello	1517.14	39.547	37.794
223	21057040	Ullucos	421.44	22.178	17.101
224	26027090	Piendamo	149.28	4.565	6.24
225	26027100	Piendamo	279.199	8.478	7.252
226	21057100	Paez	431.106	18.684	6.012
227	26027030	Mondomo	4.613	6.066	0.133
228	26027250	La Teta	125.402	4.081	4.615
229	26027210	Quinamayo	155.31	4.653	4.751
230	26047020	Palo	838.239	15.366	22.339
231	26047100	Palo	3.74	5.352	0.137
232	26057040	Timba	388.439	21.443	23.561
233	26047070	Palo	31.31	35.415	0.741
234	26057030	Jamundi	74.3	5.417	4.028
235	26077060	Fraile	4.677	5.823	0.026
236	26087100	Aguacatal	19.746	0.535	0.241

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
237	26097040	Guadalajara	125.07	4.273	3.199
238	26107130	Tulua	757.929	15.567	20.81
239	26117010	Pescador	122.512	1.329	1.831
240	26117200	Platanares	20.72	0.362	0.327
241	26117190	Las Palmas	3.862	0.618	0.021
242	26117060	Toro	18.731	0.729	0.144
243	26147140	Risaralda	9.63	29.223	0.384
244	26147130	Mapa	229.995	11.185	8.385
245	26157020	Chinchina	1033.974	27.491	23.841
246	26147040	Risaralda	468.471	19.203	354.937
247	26167060	Tapias	184.724	5.461	8.391
248	26167010	Tapias	185.322	5.608	8.41
249	26147050	Risaralda	419.207	16.885	317.98
250	26147010	Guatica	4.959	4.151	0.139
251	26207040	Sinifana	184.679	5.41	8.492
252	26217040	San Mateo	220.979	4.825	7.158
253	26237020	Aurra	191.051	3.796	5.832
254	26217010	Tonusco	315.89	7.426	11.001
255	26237110	San Andres	27.032	6.665	1.397
256	26237080	San Andres	390.237	13.731	28.606
257	26237090	San Andres	481.197	21.169	18.836
258	25017020	San Pedro	420.758	31.737	11.804
259	21227010	Opia	282.77	5.378	3.257
260	21237040	Seco	247.461	3.919	1.874
261	21247040	Totare Rio	38.058	1.029	0.798
262	21247050	Totare Rio	38.058	8.054	0.798
263	21257100	Recio	642.292	21.513	23.883
264	21257090	Lagunilla	5.52	24.706	0.039
265	21257120	Lagunilla	171.447	6.007	7.05
266	21217280	Bermellon	81.271	2.21	3.765
267	21217260	Combeima	224.01	7.629	7.08
268	21217250	Quebrada Cay	18.56	0.796	0.739
269	21217180	Combeima	165.15	4.847	9.294
270	21217220	Combeima	105.395	3.379	1.934
271	21217210	Quebrada La Honda	4.675	0.271	0.119
272	21217190	Quebrada Perlas	6.999	0.973	0.001

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
273	26137180	San Juan	21.492	2.122	1.428
274	26127040	La Vieja	2764.442	96.46	110.899
275	26137110	Otun	272.386	12.474	16.566
276	26137230	San Eugenio	61.902	3.214	3.536
277	26137120	San Eugenio	6.233	4.435	0.288
278	21257070	Sabandija	337.84	11.742	10.693
279	21257110	Cuamo	50.148	2.489	4.671
280	23017030	Guali	751.491	44.085	33.821
281	23017040	Guali	439.737	26.101	25.631
282	23017020	Quebrada Padilla	13.534	1.273	0.332
283	23017060	Sucio	446.444	5.27	25.681
284	23017080	Medina	591.457	5.953	21.272
285	26157080	Chinchina	149.624	4.549	4.548
286	26157100	Guacaica	302.356	10.638	9.536
287	26167090	Chamberi	207.257	4.179	5.459
288	26187170	Arma	294.046	17.103	13.223
289	26147080	Guatica	161.646	7.169	7.909
290	26177010	Supia	147.692	8.407	6.837
291	26197010	San Juan	459.111	26.93	22.409
292	26197020	Bolivar	221.338	8.11	13.467
293	26197030	San Juan	1088.388	55.839	57.128
294	23027060	Guarino	812.56	52.486	65.993
295	23057010	La Miel	3.916	86.96	0.163
296	23057140	La Miel	2260.918	253.047	1200.565
297	23087200	Santo Domingo	5.023	27.951	0.624
298	23087190	Samana Norte	1505.922	187.363	204.989
299	23077020	Cocorna	633.046	55.696	44.473
300	23087210	Nare	4678.251	404.684	418.038
301	23087180	Quebrada La Concepcion	118.482	7.316	9.279
302	23087160	Nus	284.193	18.098	20.247
303	26187030	Sonson	52.3	2.876	2.872
304	26187040	Arma	1027.371	43.323	52.317
305	23087300	Quebrada La Pereira	150.539	6.036	5.034
306	23087150	Negro	274.399	7.29	13.762
307	23087260	Quebrada La Cimarrona	55.494	2.945	3.472
308	23087660	Marinilla	75.712	4.507	4.217

Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

INDICE	CODIGO	AFLUENTE	ÁREA (Km ²)	CAUDAL EXACTO (m ³ /s)	CAUDAL ESTIMADO (m ³ /s)
309	23087670	Quebrada La Mosca	149.98	5.889	6.638
310	23087830	Negro	759.629	25.781	36.047
311	23107030	San Bartolome	299.346	10.117	11.921
312	23107040	Volcan	303.231	8.438	13.764
313	27037020	Tigui	12.928	128.509	0.765
314	25027120	San Jorge	1149.906	236.466	24.44
315	26247050	Taraza	944.39	92.368	70.361
316	26247010	Man	338.124	21.33	24.843
317	25017010	San Jorge	15.617	210.226	0.43
318	25027860	Ay Corozal	5.15	2.154	0.041
319	25027710	Ay Mancomojan	189.46	2.576	0.81
320	29037390	Cno Correa	5.574	108.782	0.065
321	29037400	Cno Correa	3.758	99.015	0.021
322	29037370	Canal Del Dique	3.758	421.826	0.021
323	29037450	Canal Del Dique	4.273	375.431	0.022
324	29037080	Canal Del Dique	3.735	465.261	0.001
325	29037360	Canal Del Dique	836.092	477.48	2.823

Tabla 1. Cálculo del caudal medio a partir del promedio de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM y del balance hídrico.

5 Análisis

La Tabla 2 exhibe el análisis de precisión de la estimación de caudal a través del empleo del balance hídrico a largo plazo desarrollado a partir de las funciones de Python creadas en esta investigación. Se presentan tanto el error absoluto como el error relativo, junto con el error absoluto promedio y el error relativo promedio, cada uno acompañado de su correspondiente desviación estándar.

Es esencial señalar que, dado que la medida de la media es particularmente susceptible a la influencia de valores atípicos, se ha adoptado la estrategia de calcular la media recortada. Esta métrica excluye el 10 por ciento más bajo y el 10 por ciento más alto de los datos, con el propósito de mitigar el efecto de valores extremos en los resultados.

Las estaciones limnimétricas y limnigráficas cuyos índices son 322, 323, 324 y 325, están ubicadas a lo largo del afluente conocido como el "Canal del dique", este es un canal artificial que conecta el río Magdalena con el mar Caribe. Por lo mismo, este canal presenta dos fuentes de ingreso de agua, un flujo de caudal por parte del río Magdalena y un flujo de escorrentía por parte de los terrenos circundantes que drenan sus aguas sobre el mismo.

En el marco de la metodología empleada para llevar a cabo el análisis del balance hídrico a largo plazo en el mencionado canal, se ha observado que dicha metodología solo contempla las aguas de escorrentía originadas en las áreas adyacentes. Este enfoque, considerado como un error estructural, omite la contribución del flujo de caudal procedente del río Magdalena, un componente de importancia significativa en la ecuación de balance de masas de este canal. Por consiguiente, es imperativo adoptar una metodología alternativa y más integral para el cálculo de los caudales en el Canal del Dique.

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
1	1.105	0.688	0.417	37.749
2	2.172	0.040	2.132	98.137
3	2.255	0.965	1.290	57.225
4	2.523	2.077	0.446	17.672
5	0.66	0.763	0.103	15.675
6	1.806	0.103	1.703	94.304

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
7	1.102	0.331	0.771	69.939
8	2.838	12.465	9.627	339.201
9	9.746	16.715	6.969	71.505
10	0.275	0.436	0.161	58.515
11	2.549	2.680	0.131	5.151
12	1.277	2.425	1.148	89.874
13	0.234	0.451	0.217	92.784
14	1.428	2.686	1.258	88.072
15	5.371	12.171	6.800	126.614
16	5.203	10.337	5.134	98.682
17	0.654	0.911	0.257	39.296
18	12.065	9.749	2.316	19.193
19	19.449	15.700	3.749	19.276
20	26.851	19.243	7.608	28.336
21	44.451	160.826	116.375	261.804
22	1.864	1.588	0.276	14.832
23	3.278	0.916	2.362	72.068
24	41.423	30.602	10.821	26.124
25	0.425	0.209	0.216	50.717
26	0.229	0.217	0.012	5.188
27	8.617	8.884	0.267	3.103
28	37.315	40.000	2.685	7.196
29	71.984	66.883	5.101	7.086
30	11.119	15.225	4.106	36.929
31	22.908	25.592	2.684	11.716
32	80.686	76.624	4.062	5.034
33	78.008	2.589	75.419	96.681
34	138.639	0.135	138.504	99.902
35	0.232	0.217	0.015	6.414
36	0.055	0.054	0.001	1.626
37	0.497	1.213	0.716	144.081
38	2.98	3.399	0.419	14.060
39	2.148	0.251	1.897	88.307
40	0.17	1.053	0.883	519.656
41	0.396	0.314	0.082	20.696
42	32.677	99.110	66.433	203.301
43	11.913	13.018	1.105	9.272
44	234.933	0.404	234.529	99.828
45	261.175	0.268	260.907	99.897

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
46	305.726	1348.884	1043.158	341.207
47	75.468	0.183	75.285	99.757
48	90.349	141.548	51.199	56.668
49	181.001	143.812	37.189	20.546
50	131.648	143.760	12.112	9.200
51	66.058	33.088	32.970	49.911
52	67.47	33.095	34.375	50.948
53	30.466	4.291	26.175	85.914
54	5.405	4.088	1.317	24.362
55	6.974	4.088	2.886	41.379
56	124.425	237.872	113.447	91.177
57	3.966	3.722	0.244	6.156
58	13.766	9.367	4.399	31.959
59	1.006	0.995	0.011	1.106
60	480.249	33.412	446.837	93.043
61	8.934	6.222	2.712	30.352
62	17.867	14.596	3.271	18.306
63	81.495	110.504	29.009	35.596
64	182.901	1.770	181.131	99.032
65	5.417	0.104	5.313	98.071
66	3.681	5.176	1.495	40.627
67	2.96	58.169	55.209	1865.177
68	0.903	0.119	0.784	86.796
69	1.726	0.890	0.836	48.415
70	1.161	61.425	60.264	5190.685
71	91.213	0.415	90.798	99.545
72	20.779	5.697	15.082	72.583
73	12.337	0.153	12.184	98.761
74	72.915	12.110	60.805	83.391
75	289.308	0.409	288.899	99.859
76	149.839	1.194	148.645	99.203
77	51.983	0.063	51.920	99.879
78	1061.014	15.502	1045.512	98.539
79	1089.619	0.122	1089.497	99.989
80	4.317	4.166	0.151	3.503
81	4913.47	0.465	4913.005	99.991
82	369.199	0.109	369.090	99.971
83	760.044	0.218	759.826	99.971
84	4847.343	0.141	4847.202	99.997

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
85	9.169	0.033	9.136	99.642
86	3.009	0.037	2.972	98.759
87	3.777	0.080	3.697	97.871
88	2.118	0.016	2.102	99.223
89	2.488	0.022	2.466	99.125
90	2.705	0.011	2.694	99.579
91	875.199	0.751	874.448	99.914
92	13.739	27.601	13.862	100.892
93	2.685	1.756	0.929	34.601
94	15.9	15.554	0.346	2.178
95	24.922	33.278	8.356	33.528
96	26.307	33.720	7.413	28.178
97	16.843	24.620	7.777	46.172
98	17.027	64.710	47.683	280.043
99	0.936	0.028	0.908	97.004
100	6.651	12.924	6.273	94.315
101	0.492	1.108	0.616	125.221
102	38.633	0.036	38.597	99.906
103	2.297	3.706	1.409	61.347
104	8.49	13.097	4.607	54.261
105	23.317	19.042	4.275	18.336
106	79.03	1358.581	1279.551	1619.070
107	0.666	0.087	0.579	86.892
108	26.532	34.822	8.290	31.247
109	21.568	20.863	0.705	3.269
110	25.716	25.593	0.123	0.480
111	63.996	0.155	63.841	99.758
112	212.165	279.540	67.375	31.756
113	8.381	7.216	1.165	13.895
114	84.449	92.672	8.223	9.737
115	298.486	2.227	296.259	99.254
116	4.3	2.941	1.359	31.615
117	8.498	4.422	4.076	47.967
118	6.586	6.653	0.067	1.021
119	2.239	1.926	0.313	13.980
120	1.79	1.728	0.062	3.462
121	2.629	0.050	2.579	98.092
122	4.637	2.279	2.358	50.852
123	58.45	44.442	14.008	23.966

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
124	2.724	2.794	0.070	2.559
125	9.509	77.218	67.709	712.055
126	1.775	1.520	0.255	14.362
127	4.219	0.172	4.047	95.933
128	1.982	3.118	1.136	57.331
129	1.35	1.277	0.073	5.392
130	18.542	0.023	18.519	99.877
131	17.653	55.807	38.154	216.132
132	16.355	0.286	16.069	98.251
133	9.912	10.842	0.930	9.386
134	19.931	41.302	21.371	107.226
135	17.164	41.294	24.130	140.583
136	15.648	43.555	27.907	178.342
137	12.803	0.078	12.725	99.394
138	6.816	0.208	6.608	96.943
139	11.265	4.153	7.112	63.135
140	2.239	1.115	1.124	50.218
141	13.236	0.024	13.212	99.815
142	8.072	7.290	0.782	9.694
143	24.953	9.545	15.408	61.750
144	43.199	20.274	22.925	53.067
145	16.331	43.881	27.550	168.700
146	20.361	14.856	5.505	27.036
147	39.934	4.806	35.128	87.965
148	0.657	6.076	5.419	824.854
149	0.719	0.235	0.484	67.273
150	2.508	2.705	0.197	7.848
151	3.446	99.465	96.019	2786.399
152	2.42	1.465	0.955	39.456
153	3.26	3.695	0.435	13.349
154	1.215	1.168	0.047	3.887
155	95.651	96.173	0.522	0.546
156	6.79	7.054	0.264	3.895
157	58.097	0.054	58.043	99.907
158	7.33	3.274	4.056	55.328
159	0.771	1.173	0.402	52.192
160	5.702	10.903	5.201	91.207
161	1.03	0.635	0.395	38.335
162	2.724	2.146	0.578	21.221

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
163	0.332	4.771	4.439	1337.028
164	4.794	4.714	0.080	1.663
165	4.928	4.519	0.409	8.293
166	16.145	13.384	2.761	17.102
167	9.75	13.001	3.251	33.344
168	17.356	16.650	0.706	4.070
169	3.569	3.260	0.309	8.652
170	5.206	4.398	0.808	15.523
171	0.586	0.037	0.549	93.751
172	45.861	50.432	4.571	9.967
173	173.643	340.702	167.059	96.208
174	16.619	17.066	0.447	2.692
175	3.279	4.075	0.796	24.268
176	0.948	1.011	0.063	6.648
177	6.147	0.117	6.030	98.102
178	28.825	44.816	15.991	55.476
179	56.67	763.913	707.243	1248.002
180	0.423	0.036	0.387	91.499
181	17.196	9.225	7.971	46.356
182	50.797	105.506	54.709	107.702
183	73.136	46.615	26.521	36.263
184	32.759	48.159	15.400	47.009
185	11.559	3.754	7.805	67.521
186	8.012	8.392	0.380	4.738
187	28.575	0.198	28.377	99.306
188	6.151	4.228	1.923	31.269
189	16.088	19.754	3.666	22.790
190	8.178	7.121	1.057	12.930
191	49.363	58.846	9.483	19.210
192	1.841	0.391	1.450	78.763
193	17.974	17.495	0.479	2.664
194	52.396	90.918	38.522	73.521
195	0.626	0.333	0.293	46.819
196	9.017	0.196	8.821	97.827
197	11.685	5.609	6.076	51.999
198	5.963	0.611	5.352	89.758
199	13.375	12.605	0.770	5.760
200	5.241	6.993	1.752	33.430
201	13.062	18.653	5.591	42.805

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
202	11.651	10.746	0.905	7.769
203	7.703	6.245	1.458	18.931
204	2.374	2.206	0.168	7.089
205	16.333	28.962	12.629	77.319
206	6.022	6.202	0.180	2.984
207	29.328	31.789	2.461	8.392
208	6.855	4.676	2.179	31.791
209	3.7	5.161	1.461	39.480
210	2.311	3.800	1.489	64.440
211	56.747	77.822	21.075	37.139
212	4.341	4.029	0.312	7.190
213	2.798	2.678	0.120	4.283
214	9.951	0.242	9.709	97.565
215	47.518	50.795	3.277	6.895
216	9.179	6.834	2.345	25.553
217	4.52	2.991	1.529	33.829
218	44.247	0.853	43.394	98.072
219	4.932	4.725	0.207	4.189
220	8.627	7.314	1.313	15.216
221	24.267	54.861	30.594	126.072
222	39.547	37.794	1.753	4.432
223	22.178	17.101	5.077	22.891
224	4.565	6.240	1.675	36.699
225	8.478	7.252	1.226	14.459
226	18.684	6.012	12.672	67.823
227	6.066	0.133	5.933	97.809
228	4.081	4.615	0.534	13.075
229	4.653	4.751	0.098	2.103
230	15.366	22.339	6.973	45.382
231	5.352	0.137	5.215	97.443
232	21.443	23.561	2.118	9.877
233	35.415	0.741	34.674	97.907
234	5.417	4.028	1.389	25.636
235	5.823	0.026	5.797	99.555
236	0.535	0.241	0.294	54.883
237	4.273	3.199	1.074	25.146
238	15.567	20.810	5.243	33.680
239	1.329	1.831	0.502	37.766
240	0.362	0.327	0.035	9.804

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
241	0.618	0.021	0.597	96.551
242	0.729	0.144	0.585	80.246
243	29.223	0.384	28.839	98.685
244	11.185	8.385	2.800	25.031
245	27.491	23.841	3.650	13.279
246	19.203	354.937	335.734	1748.339
247	5.461	8.391	2.930	53.646
248	5.608	8.410	2.802	49.965
249	16.885	317.980	301.095	1783.210
250	4.151	0.139	4.012	96.654
251	5.41	8.492	3.082	56.966
252	4.825	7.158	2.333	48.356
253	3.796	5.832	2.036	53.635
254	7.426	11.001	3.575	48.141
255	6.665	1.397	5.268	79.045
256	13.731	28.606	14.875	108.332
257	21.169	18.836	2.333	11.019
258	31.737	11.804	19.933	62.807
259	5.378	3.257	2.121	39.430
260	3.919	1.874	2.045	52.193
261	1.029	0.798	0.231	22.447
262	8.054	0.798	7.256	90.092
263	21.513	23.883	2.370	11.017
264	24.706	0.039	24.667	99.841
265	6.007	7.050	1.043	17.367
266	2.21	3.765	1.555	70.358
267	7.629	7.080	0.549	7.194
268	0.796	0.739	0.057	7.198
269	4.847	9.294	4.447	91.756
270	3.379	1.934	1.445	42.761
271	0.271	0.119	0.152	56.073
272	0.973	0.001	0.972	99.873
273	2.122	1.428	0.694	32.719
274	96.46	110.899	14.439	14.969
275	12.474	16.566	4.092	32.801
276	3.214	3.536	0.322	10.018
277	4.435	0.288	4.147	93.517
278	11.742	10.693	1.049	8.932
279	2.489	4.671	2.182	87.655

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
280	44.085	33.821	10.264	23.281
281	26.101	25.631	0.470	1.802
282	1.273	0.332	0.941	73.948
283	5.27	25.681	20.411	387.298
284	5.953	21.272	15.319	257.338
285	4.549	4.548	0.001	0.022
286	10.638	9.536	1.102	10.362
287	4.179	5.459	1.280	30.620
288	17.103	13.223	3.880	22.689
289	7.169	7.909	0.740	10.328
290	8.407	6.837	1.570	18.671
291	26.93	22.409	4.521	16.787
292	8.11	13.467	5.357	66.054
293	55.839	57.128	1.289	2.309
294	52.486	65.993	13.507	25.735
295	86.96	0.163	86.797	99.813
296	253.047	1200.565	947.518	374.443
297	27.951	0.624	27.327	97.766
298	187.363	204.989	17.626	9.407
299	55.696	44.473	11.223	20.151
300	404.684	418.038	13.354	3.300
301	7.316	9.279	1.963	26.837
302	18.098	20.247	2.149	11.875
303	2.876	2.872	0.004	0.144
304	43.323	52.317	8.994	20.761
305	6.036	5.034	1.002	16.595
306	7.29	13.762	6.472	88.775
307	2.945	3.472	0.527	17.901
308	4.507	4.217	0.290	6.433
309	5.889	6.638	0.749	12.717
310	25.781	36.047	10.266	39.822
311	10.117	11.921	1.804	17.829
312	8.438	13.764	5.326	63.121
313	128.509	0.765	127.744	99.405
314	236.466	24.440	212.026	89.665
315	92.368	70.361	22.007	23.826
316	21.33	24.843	3.513	16.468
317	210.226	0.430	209.796	99.795
318	2.154	0.041	2.113	98.109

Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio

INDICE	CAUDAL EXACTO (m3/s)	CAUDAL ESTIMADO (m3/s)	EA (m3/s)	ER (%)
319	2.576	0.810	1.766	68.549
320	108.782	0.065	108.717	99.940
321	99.015	0.021	98.994	99.979
322	421.826	0.021	421.805	99.995
323	375.431	0.022	375.409	99.994
324	465.261	0.001	465.260	100.000
325	477.48	2.823	474.657	99.409
		MEDIA	76.086	117.120
		MEDIA RECORTADA (10% - 10%)	9.665	53.206
		DESV. EST	412.87	392.70

Tabla 2. Error absoluto y error relativo en la estimación del caudal medio.

Como puede observarse en la tabla anterior, la media recortada para el error absoluto es igual a 9.665 m³/s, lo que constituye un error considerable, especialmente en el contexto de las estaciones limnigráficas y limnimétricas objeto de nuestro análisis, las cuales suelen caracterizarse por su tamaño relativamente reducido. Esta imprecisión en las estimaciones puede dar lugar a consecuencias significativas, tales como una toma de decisiones inadecuada en la gestión de recursos hídricos, una planificación deficiente de infraestructuras hidráulicas, o incluso un impacto negativo en la evaluación de riesgos asociados a eventos climáticos extremos

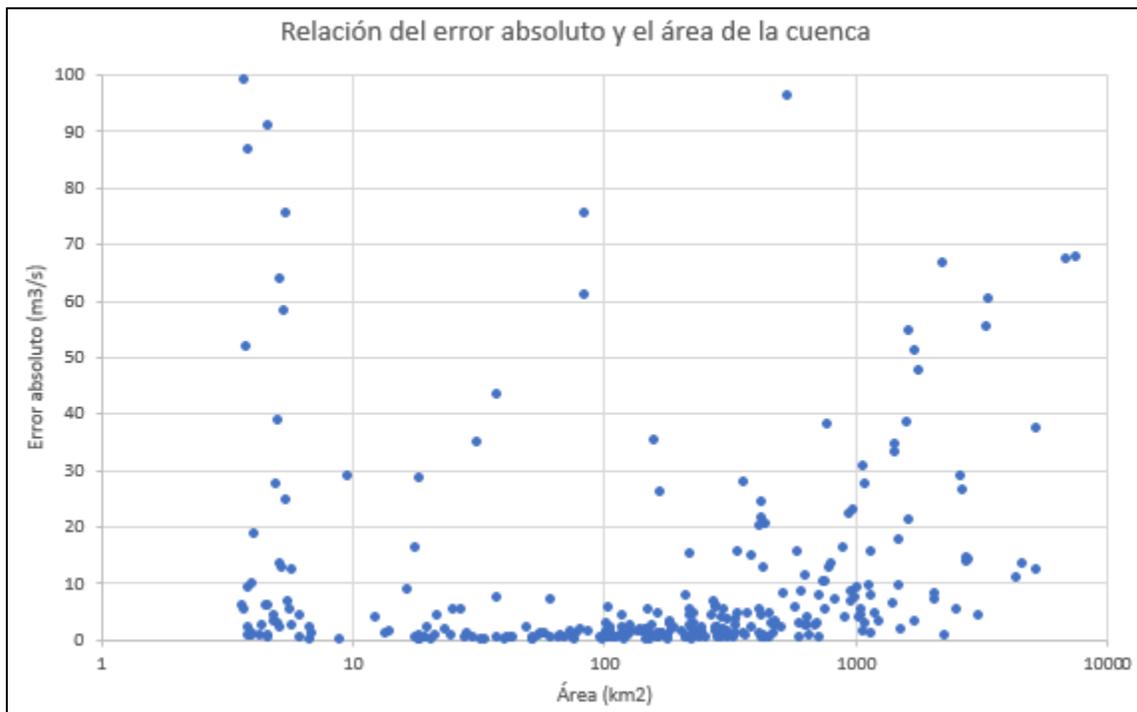
Es importante destacar que la media recortada para el error relativo se sitúa en un valor del 53.206%. Esto señala que, en términos generales, las estimaciones de caudales tienden a diferir en un 50% más o un 50% menos en comparación con los valores reales observados. A pesar de que esta discrepancia es motivo de preocupación, es relevante resaltar que las estimaciones de caudales generalmente se mantienen en una escala de magnitud similar a los caudales reales.

Es decir, a pesar de la variabilidad en las estimaciones, estas no experimentan desviaciones extremas que sean al menos diez veces superiores o inferiores a los caudales reales. Aunque el error relativo es substancial, la diferencia relativa entre estimaciones y valores reales se mantiene dentro de una escala razonable, evitando desviaciones drásticas que podrían ser aún más problemáticas desde una perspectiva práctica y de gestión.

En la Figura 1, se presenta una relación entre el error absoluto en la estimación del caudal medio de estaciones limnigráficas o limnimétricas y el área de la cuenca hidrográfica definida por

los módulos de Python desarrollados para esta investigación. En esta representación gráfica, se observa que el error absoluto aparentemente no muestra una dependencia significativa del tamaño del área de la cuenca analizada. En la mayoría de los casos, excluyendo los valores atípicos, los errores absolutos se sitúan en un rango de 0 a 10 m³/s. No obstante, se observa una excepción en los casos de las cuencas más extensas, donde los errores tienden a superar este rango.

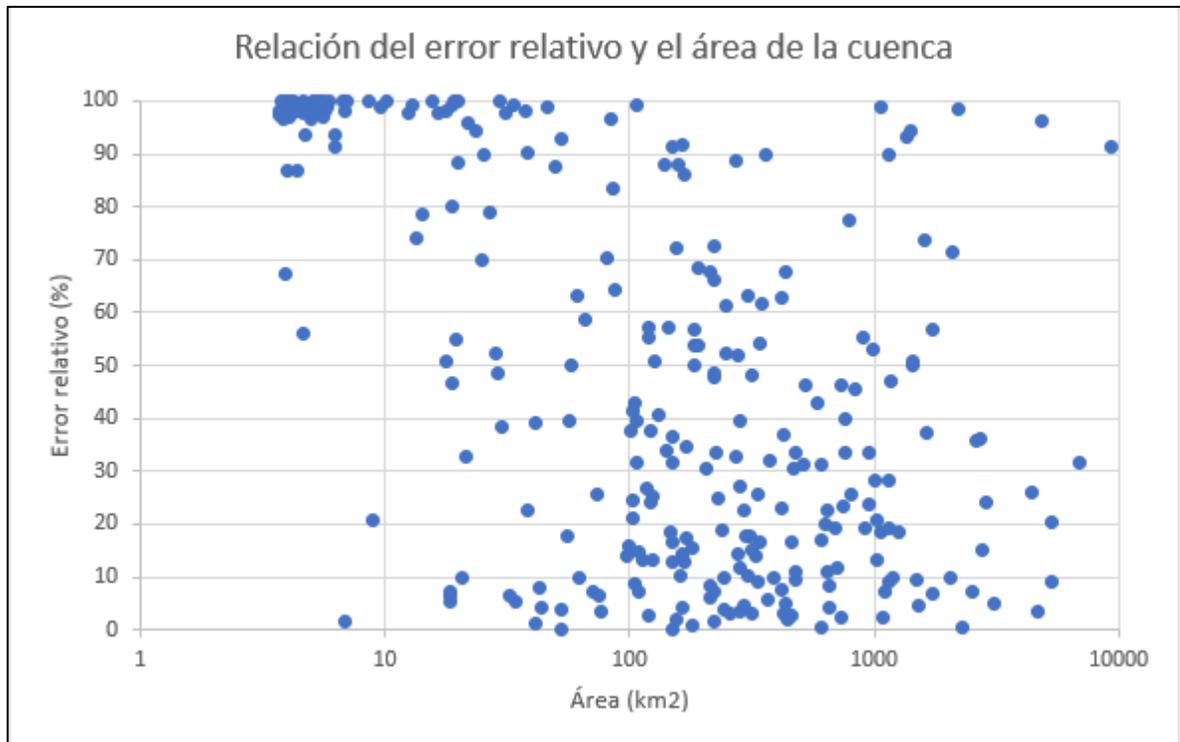
Figura 1. Relación del error absoluto y el área de la cuenca.



En la Figura 2. Se observa que el error medio se eleva significativamente en las cuencas de menor tamaño, llegando a superar el 99%. Este fenómeno indica que, en el contexto de las cuencas con áreas inferiores a 30 km², el balance hídrico efectuado en el marco de esta investigación no puede considerarse confiable.

En contraste, las cuencas de tamaño mediano y grande exhiben una disminución progresiva en el error relativo a medida que aumenta el tamaño de la cuenca. De hecho, en varias de las cuencas de mayor envergadura, el error relativo tiende a aproximarse a cero. Además, basándonos en el análisis de la media recortada, podemos inferir que la mayoría de las cuencas de mayor extensión presentan un error relativo que se sitúa por debajo del umbral del 50%.

Figura 2. Relación entre el error relativo y el área de la cuenca.



6 Conclusiones

La estimación del caudal medio en las cuencas de menor tamaño ha revelado resultados que exhiben una falta de precisión y coherencia con las condiciones reales. Esta discrepancia puede atribuirse a diversas posibilidades, entre las cuales destacan tres principales: en primer lugar, la delimitación de las cuencas pequeñas por parte de los módulos de Python creados en esta investigación pudo haber fallado; en segundo lugar, la ausencia de estaciones pluviométricas o pluviográficas en estas cuencas puede haber limitado la disponibilidad de datos precisos sobre precipitación; en tercer lugar, es plausible que la aplicación de la metodología de Turc para el cálculo de la evapotranspiración no sea la óptima en el contexto de cuencas de dimensiones tan reducidas.

A pesar de que en términos generales los errores absolutos y relativos son notables, es importante destacar que las estimaciones de los caudales medios en las cuencas de tamaño mediano y grande se ubican en una magnitud cercana a la de sus caudales reales correspondientes. Esto significa que no se observan discrepancias que sean de un orden de magnitud significativamente mayor o menor, es decir, los caudales medios estimados no son más de diez veces mayor, ni más de diez veces menor que sus contrapartes reales. Este resultado puede considerarse satisfactorio y sugiere que, a pesar de las limitaciones, las estimaciones se acercan de manera adecuada a la realidad en estas categorías de cuencas

La metodología del kriging, apoyada por los datos proporcionados por las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), parece captar de manera precisa la distribución espacial de la precipitación en la cuenca hidrográfica Magdalena Cauca.

Referencias

- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DECAFÉ - Cenicafé. CHINCHINÁ. COLOMBIA. Archivos de información climática 1950-2004. Disciplina de Agroclimatología, Chinchiná, Cenicafé. 2004.
- Chaves, B., & Jaramillo, A. (1998). Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. Cenicafé.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill Education.
- IDEAM, zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, noviembre de 2013, Bogotá, D. C., Colombia
- Linsley, Kohler & Paulhus (2016). Hidrología para ingenieros. Segunda edición.
- Londoño Ciro, L. & Valdés Quintero, J. (2012), Geoestadística aplicada, generación de mapas de interpolación para el estudio de fenómenos distribuidos espacialmente.
- Pérez Porto, J. & Gardey, A. (2018). Hidráulica - Qué es, definición y concepto. Definiciones. Última actualización el 2 de noviembre de 2021. Recuperado el 2 de mayo de 2023 de <https://definicion.de/hidraulica/>
- Poveda Jaramillo, G. (2001). Estimación de caudales mínimos para Colombia mediante regionalización y aplicación de la curva de recesión de caudales. Medellín.
- Remenieras, G. (1974) Tratado de Hidrología Aplicada. Técnicos Asociados S.A. Segunda edición. Barcelona.
- Velez, M. (2000). Hidrología para ingenieros. Medellín.
- Wackernagel, H. (1995). Multivariate geostatistics an introduction with applications