

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Análisis del servicio ambiental de regulación mediante cuatro indicadores hidrológicos en la microcuenca del río Jordán (Páramo de Santurbán, Santander)

Diego Fernando Velasco Gutiérrez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Directora

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD (School of Agriculture, Food and Rural Development)

Codirectora

Sully Gómez Isidro

Doctora en Ingeniería - Posgrado de Recursos Hídricos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Programa Académico de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Declaración de uso de inteligencia artificial

Para la realización de este trabajo se hizo uso del programa ChatGPT de OpenAI (<https://chat.openai.com/>) para aplicar una corrección gramatical y de estilo. Las peticiones de información fueron las siguientes: corregir faltas ortográficas y de puntuación, resumir texto, analizar texto. El resultado de estas peticiones se usó para corregir errores de escritura, resumir partes del contenido y analizar la estructura y coherencia del texto, mejorando así la claridad y precisión del documento final.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico.....	13
3. Revisión Bibliográfica	15
3.1 Marco de Referencia	15
3.1.1 Ecosistemas de Páramo.....	15
3.1.2 Servicios Hidrológicos.....	16
3.1.3 Servicio de Regulación Hídrica	16
3.2 Estado del Arte.....	17
3.2.1 Hidrograma	17
3.2.2 Curva de Duración de Caudales.....	18
3.2.3 Coeficiente de Escorrentía	18
3.2.4 Constante de Recesión	19
4. Metodología	20
4.1 Recopilación y Análisis de Información de Precipitación y Caudales.	22
4.2 Cálculo de Indicadores de Regulación.....	25
4.2.1 Hidrograma	25
4.2.2 Curva de Duración de Caudales.....	29
4.2.3 Coeficiente de Escorrentía	30
4.2.4 Constante de Recesión	31

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

5. Resultados	33
5.1 Calidad y Homogeneización de las Series de Datos	33
5.2 Curva de Calibración	38
5.3 Cálculo de Indicadores de Regulación.....	42
5.3.1 Hidrograma	42
5.3.2 Curva de Duración de Caudales.....	48
5.3.3 Coeficiente de Escorrentía	50
5.3.4 Constante de Recesión	51
5.4 Análisis integrado del servicio de regulación hidrológica en la microcuenca del río Jordán.	54
Conclusiones	57
Recomendaciones	58
Bibliografía	60

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Lista de Tablas

Tabla 1	Ubicación Geográfica de los Equipos de Monitoreo	23
Tabla 2	Medidas de Tendencia Central y Dispersión de la Precipitación Diaria	36
Tabla 3	Medidas de Tendencia Central y Dispersión del Caudal Diario.....	40

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A Mapa Topográfico de la Microcuenca del Río Jordán

Apéndice B Equipo Baro-Diver Instalado en la Microcuenca del Río Jordán

Apéndice C Procedimiento de Adquisición de Datos Mediante Baro-Diver

Apéndice D Datos de Aforos Realizados en la Quebrada Jordán (2018-2020)

Apéndice E Análisis de datos de Precipitación y caudal

Apéndice F Reporte de información Hidrometeorológica de DHIME

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Lista de figuras

Figura 1 Delimitación área de estudio y ubicación de estaciones de monitoreo.	21
Figura 2 Precipitación Mensual Acumulada en las Estaciones Berlín, Picacho y Pozo Vetas.....	35
Figura 3 Diagrama de Caja y Bigotes de la Precipitación Diaria por Estación	37
Figura 4 Valores Anómalos y Faltantes en Datos de Nivel de Agua Registrados.....	38
Figura 5 Curva de Calibración para la Estación Baro-Diver	39
Figura 6 Diagrama de Caja y Bigotes de Caudal.....	41
Figura 7 Mapa de Polígonos de Thiessen para las Estaciones Pluviométricas.....	43
Figura 8 Hidrograma y Pluviograma de la Microcuenca del Río Jordán (Páramo de Berlín) para el Período Marzo 2018 - Enero 2020.....	44
Figura 9 Estacionalidad de la Precipitación Diaria Promedio	46
Figura 10 Separación de Flujo Directo y Flujo Base mediante el Algoritmo de Lyne y Hollick.	47
Figura 11 Curva de Duración de Caudales	49
Figura 12 Intervalos de Recesión de Duración de 7 días Seleccionados en el Hidrograma de Caudal de la microcuenca de río Jordán.....	52
Figura 13 Curva Maestra de Recesión para la microcuenca de río Jordán.....	53

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Resumen

Título: Análisis del servicio ambiental de regulación mediante cuatro indicadores hidrológicos en la microcuenca del río Jordán (Páramo de Santurbán – Santander)

Autor: Diego Fernando Velasco Gutiérrez

Palabras Clave: Servicios ecosistémicos hídricos, regulación hidrológica, microcuenca andina, páramo de Berlín, relación lluvia-caudal

Este proyecto analiza la regulación hídrica en la microcuenca del río Jordán, páramo de Berlín, aplicando indicadores hidrológicos como el hidrograma, la curva de duración de caudales, el coeficiente de escorrentía y la constante de recesión, utilizando datos de precipitación y caudal para el período 2018-2020, con el objetivo de evaluar la respuesta hidrológica ante eventos lluviosos y el mantenimiento de caudales base en épocas secas. Los resultados revelaron un régimen hidrológico bimodal característico de los Andes, con dos períodos húmedos y dos secos bien definidos. El análisis demostró una buena capacidad de regulación hídrica por parte del ecosistema de páramo, evidenciada en un coeficiente de escorrentía bajo (24.26%) que indica que tres cuartas partes del agua precipitada son infiltradas o almacenadas en el sistema. La constante de recesión de 0.027 días^{-1} y un tiempo de declinación de 37 días confirman la predominancia de acuíferos de descarga lenta que sustentan un caudal base estable, con una mediana de $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, se observaron picos de caudal extremos (hasta $3.803 \text{ m}^3/\text{s}$) durante eventos lluviosos intensos, revelando una capacidad limitada para amortiguar crecidas ante la saturación de los suelos. El método de filtrado digital mostró una sensibilidad considerable en la separación del caudal base (ICB entre 67.99% y 79.28%), destacando la complejidad de los procesos subterráneos y la necesidad de validar estos hallazgos con técnicas isotópicas e hidrogeológicas para una comprensión integral del sistema. Esta información es esencial para tomar decisiones orientadas a la conservación del ecosistema de páramo y la gestión sostenible del suelo en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Trabajo de Grado

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora Isabel Cristina Domínguez Rivera PhD (School of Agriculture, Food and Rural Development)

Codirectora Sully Gómez Isidro Doctora en Ingeniería - Posgrado de Recursos Hídricos

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Abstract

Title: Analysis of the Environmental Regulation Service Using Four Hydrological Indicators in the Jordan River Microcatchment (Santurbán Páramo – Santander)

Author: Diego Fernando Velasco Gutierrez

Keywords: hydrological ecosystem services, hydrological regulation, Andean micro-watershed, Berlín páramo, rainfall-discharge relationship

This project analyzes water regulation in the Jordán River microcatchment, páramo de Berlín, by applying hydrological indicators such as the hydrograph, flow duration curve, runoff coefficient, and recession constant, using rainfall and flow data for the period 2018-2020. The objective was to assess the hydrological response to rainfall events and the maintenance of base flows during dry seasons. The results revealed a bimodal hydrological regime, characteristic of the Andes, with two well-defined wet and two dry periods. The analysis showed a good water regulation capacity by the páramo ecosystem, evidenced by a low runoff coefficient (24.26%), indicating that three-quarters of the precipitated water was infiltrated or stored within the system. The recession constant of 0.027 days^{-1} and a recession time of 37 days confirmed the predominance of slow-discharge aquifers that sustain stable base flows, with a median of $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$. However, extreme peak flows (up to $3.803 \text{ m}^3/\text{s}$) were observed during intense rainfall events, revealing a limited capacity to buffer floods when soils become saturated. The digital filtering method showed considerable sensitivity in baseflow separation (BFI between 67.99% and 79.28%), highlighting the complexity of subsurface processes and the need to validate these findings with isotopic and hydrogeological techniques for a comprehensive understanding of the system. This information is essential for making decisions aimed at conserving the páramo ecosystem and the sustainable management of land within the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs).

Degree Work

Faculty of Physic mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Supervisor Isabel Cristina Domínguez Rivera PhD (School of Agriculture, Food and Rural Development) Co-supervisor Sully Gómez Isidro Doctor of Engineering - Graduate Program in Water Resources.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Introducción

Los páramos andinos son ecosistemas estratégicos, reconocidos no solo por su biodiversidad única, sino también por su papel fundamental en la regulación hídrica de la región. Colombia es un actor clave en su conservación, al albergar cerca del 50% de la superficie global de este frágil ecosistema (Rivera Ospina y Rodríguez Murcia, 2011). Desde una perspectiva socioecológica, estos territorios proporcionan lo que se conoce como servicios ecosistémicos: beneficios tangibles e intangibles que las personas obtienen de la naturaleza (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005; Camacho Valdez y Ruiz Luna, 2012). Entre ellos, los servicios hidrológicos ocupan un lugar protagónico, ya que están directamente vinculados con la dinámica del ciclo del agua (Buytaert et al., 2006). Uno de los más relevantes es el servicio de regulación hídrica, que se refiere a la capacidad del ecosistema para capturar el exceso de lluvia, almacenarla en el suelo y liberarla de forma paulatina y constante (Buytaert et al., 2007; Quintero, 2010). Gracias a este mecanismo natural, se mitigan inundaciones en épocas lluviosas y se mantienen caudales base durante los períodos secos, asegurando así la disponibilidad de agua a lo largo del año. Esta función análoga a una esponja natural es posible gracias a la estructura del suelo y la vegetación del páramo, cuyas propiedades hidrofísicas, como la alta porosidad y la capacidad de campo, favorecen la infiltración y el almacenamiento subterráneo (Arias Castellanos y Castellanos Prada, 2020; Buytaert et al., 2006). A pesar de su importancia para el abastecimiento de agua de millones de personas y para la economía de las comunidades locales, el servicio de regulación hidrológica en los ecosistemas de páramo se encuentra severamente amenazado por la expansión de la frontera agropecuaria y la minería, actividades que alteran la funcionalidad natural de estos frágiles ecosistemas (Quintero, 2010). La capacidad de regulación hídrica de los páramos se ve

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

disminuida significativamente por la conversión de la cobertura vegetal nativa, lo cual se evidencia a través del incremento de la escorrentía superficial, el descenso de la infiltración y la pérdida de estabilidad en los caudales base. Estos efectos ponen en peligro la capacidad de recuperación del ecosistema frente a fenómenos climáticos extremos y la disponibilidad de agua para las comunidades locales (Buytaert et al., 2007).

Dentro del Distrito de Manejo Integrado del Páramo de Berlín, la microcuenca del río Jordán emerge como una de las unidades hidrográficas más relevantes. Con una extensión de 137.65 Km², localizada en el municipio de Tona (Santander), esta zona desempeña un papel vital en el suministro hídrico regional, con una oferta anual de 18.4 millones de m³ de agua. El territorio mantiene predominante su cobertura natural de páramo, donde herbazales, pajonales y matorrales cumplen una función esencial en la regulación hídrica. Sin embargo, convive con actividades agropecuarias establecidas, particularmente el cultivo de cebolla junca que representa una importante actividad económica para las comunidades locales. Preocupa adicionalmente el potencial avance de la minería en la región, manifestado en solicitudes de concesión para extracción de oro y otros minerales que podrían comprometer la integridad del ecosistema (Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, 2007).

La transformación progresiva del suelo para usos agropecuarios reduce gradualmente la conectividad ecológica y afecta la capacidad del páramo para mantener sus funciones hidrológicas (Quintero, 2010). No obstante, debido a la carencia de datos hidrometeorológicos suficientes para su evaluación, el servicio de regulación hídrica no ha sido previamente cuantificado en la cuenca del río del Jordán. Ante esta situación, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿cómo evaluar el servicio ecosistémico de regulación hídrica en esta microcuenca, considerando datos disponibles de lluvia y caudal?

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Este estudio evalúa la regulación hídrica en la microcuenca del río Jordán empleando cuatro indicadores clave: el hidrograma, para analizar la respuesta de la cuenca a eventos de lluvia (Buytaert et al., 2006); la curva de duración de caudales, para entender la frecuencia y disponibilidad del agua a lo largo del tiempo (Ridolfi et al., 2018); el coeficiente de escorrentía, que relaciona la precipitación con el agua que escurre superficialmente (Gaspari et al., 2007); y la constante de recesión, que mide la tasa de liberación del agua almacenada en el subsuelo (Ladson et al., 2013).

Cuantificar estos indicadores es valioso porque transforma la capacidad funcional abstracta del ecosistema en datos concretos, permitiendo diagnosticar el estado de salud hidrológica y medir el impacto de las alteraciones antrópicas en este ecosistema estratégico (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el servicio ecosistémico de regulación hidrológica que provee la microcuenca del río Jordán en el páramo de Berlín Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Recopilar y procesar información de precipitación y caudales en la microcuenca del río Jordán.

Aplicar los indicadores hidrológicos de hidrograma, curva de duración de caudales, coeficiente de escorrentía y constante de recesión a la cuenca del río Jordán.

Analizar el servicio ambiental de regulación hídrica en la microcuenca del río Jordán con base en los indicadores hidrológicos estudiados.

2. Marco Teórico

Los servicios ecosistémicos (SE) son todas las aportaciones, tanto materiales como inmateriales, que la naturaleza proporciona al bienestar de los seres humanos. Este tipo de servicios se originan directamente a partir de las dinámicas, las estructuras y las funciones de los ecosistemas. La cuantificación de SE permite identificar su estado y plantear estrategias orientadas a la preservación y gestión sostenible de los ecosistemas (Camacho Valdez y Ruiz Luna, 2012).

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Las funciones de regulación de los ecosistemas son clave, ya que permiten controlar y ajustar procesos ecológicos fundamentales, además de sustentar sistemas de vida mediante ciclos biogeoquímicos y mecanismos biológicos diversos (Camacho Valdez y Ruiz Luna, 2012). Los servicios de regulación de los ecosistemas de cada región son importantes, considerando que, debido al cambio climático, se espera un incremento en la frecuencia de eventos hidrológicos extremos. En especial, los ecosistemas de páramo poseen una gran capacidad de regulación de la oferta hídrica debido a su clima particular y a las capacidades del suelo y la vegetación (Durán-Suárez et al., 2011).

Los servicios hidrológicos dependen en gran parte de la capacidad de regulación, ya que, a mayor capacidad de regulación, mayores serán el caudal base y la duración del cauce con agua antes de secarse (Quintero, 2010). La evaluación de la capacidad de regulación puede hacerse mediante indicadores hidrológicos. Para caracterizar adecuadamente la complejidad y diversidad de los servicios hidrológicos, es necesario usar una serie de indicadores que, de manera conjunta, provean una descripción coherente de los procesos que ocurren en un ecosistema (Carvalho-Santos et al., 2014). Algunos indicadores utilizados para evaluar la regulación hidrológica son el hidrograma, la curva de duración de caudales (CDC), el coeficiente de escorrentía y la constante de recesión.

El hidrograma analiza la respuesta de la cuenca a eventos de lluvia. La curva de duración de caudales (CDC), generada con series históricas de los caudales diarios promedios, muestra la posibilidad de que un valor específico de caudal sea igualado o superado en un tiempo determinado. La relación entre el volumen de agua que fluye por la superficie a través del caudal del río y el volumen correspondiente a la precipitación se conoce como Coeficiente de escorrentía. El índice de flujo base se refiere a la relación entre el caudal total y el flujo base, y puede ser

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

empleado como un indicador de la capacidad de la cuenca para liberar agua durante sequías o como una medida de sostenibilidad del recurso hídrico (Puente, 2014).

3. Revisión Bibliográfica

3.1 Marco de Referencia

3.1.1 Ecosistemas de Páramo

Los páramos son ecosistemas de humedal ubicados en la región andina, en un rango altitudinal que se extiende desde el límite superior del bosque (aproximadamente 3500 m s.n.m.) hasta las nieves perpetuas (alrededor de 5000 m s.n.m.). Estos ecosistemas albergan especies de plantas endémicas adaptadas a condiciones ambientales específicas, como una elevada radiación ultravioleta, baja presión atmosférica y un régimen de precipitación generalmente moderado a alto, caracterizado por eventos de lluvia frecuentes, pero de baja intensidad (Bonilla y Quintero, 2020). La combinación de vientos fuertes y una topografía accidentada que genera efectos de sombra orográfica resultan en una alta variabilidad espacial de la precipitación y en importantes errores en su medición (Buytaert et al., 2006). Además, el suelo paramuno se distingue por su estructura liviana y altamente porosa, así como por su excepcional capacidad de almacenamiento de agua, superior a $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ bajo una tensión de -1500 kPa (Buytaert et al., 2006). Estas propiedades hidrofísicas, junto con la densa cobertura vegetal caracterizada por frailejones, pajonales y cojines, confirman su papel crucial en la regulación hídrica, actuando como una "esponja" natural que captura, almacena y libera gradualmente el agua hacia los sistemas hidrológicos.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

3.1.2 Servicios Hidrológicos

Se entiende por servicios hidrológicos a las ventajas que los ecosistemas ofrecen en cuanto a la regulación, almacenamiento y suministro de agua, asegurando la calidad, disponibilidad y distribución temporal de esta (Buytaert et al., 2007). Estos servicios se presentan en ecosistemas estratégicos como los páramos a través de la regulación paulatina de caudales, que previene inundaciones y sequías; el mantenimiento de la calidad del agua por medio de procesos naturales de filtración; y la retención hídrica en suelos orgánicos porosos (Hofstede, 1997). Es fundamental mantener estos servicios para garantizar la seguridad hídrica de muchas comunidades y actividades socioeconómicas que dependen de estos ecosistemas. En situaciones de cambio climático, donde la demanda de agua crece y la variabilidad hídrica se agudiza, estos servicios son especialmente importantes (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005).

3.1.3 Servicio de Regulación Hídrica

La regulación hídrica es la habilidad de los ecosistemas para acumular, filtrar y liberar agua de forma progresiva, lo que ayuda a mitigar situaciones hidrológicas extremas como las sequías y las inundaciones. Esta capacidad de capturar agua lluvia y luego retenerla y redistribuirla en el tiempo hacia ríos, quebradas y acuíferos, está determinada por características fundamentales de los suelos y la vegetación, como la profundidad, la materia orgánica o la porosidad (Buytaert et al., 2007). La cuantificación de esta capacidad de regulación puede realizarse mediante indicadores hidrológicos, cuyo análisis detallado se presenta en la sección de Estado del Arte.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

3.2 Estado del Arte

Los ecosistemas de páramo son considerados excepcionales reguladores hidrológicos, esta capacidad se origina de sus propiedades inherentes, como suelos orgánicos con alta porosidad y vegetación que ha sido capaz de adaptarse a la recolección de agua de niebla (Célleri Alvear et al., 2001). Esta capacidad regulatoria puede cuantificarse mediante indicadores hidrológicos como: i) el hidrograma, que es la señal que integra los distintos aportes de agua en el río. Para que este registro sea una herramienta válida en el estudio de los componentes del flujo, es indispensable una interpretación y diferenciación precisa de dichos aportes (Gómez Isidro, 2014); ii) la CDC que posibilita el análisis y la cuantificación de la estabilidad del flujo a lo largo del tiempo (Celis Vargas, 2022); iii) el coeficiente de escorrentía, que se obtiene dividiendo la escorrentía entre la precipitación y permite medir cuán eficaces son el almacenamiento y la infiltración del agua en la cuenca (Ochoa-Tocachi et al., 2016); y iv) la constante de recesión que posibilita el análisis de la habilidad de una cuenca para regular el agua entre los períodos seco y húmedo, permitiendo que el caudal se libere de manera controlada y lenta durante intervalos prolongados (Gómez Isidro y Gómez Ríos, 2016).

3.2.1 Hidrograma

La aplicación de un método de separación de flujos basado en el análisis del hidrograma permite discernir entre el caudal proveniente de la escorrentía superficial inmediata y el flujo base de origen subterráneo (Gómez Isidro, 2014). Por ejemplo, la investigación isotópica hecha en la cuenca del río Lebrija reveló que el flujo base representa el 71% de la escorrentía total, cifra que es mucho más alta que la reportada en otros ecosistemas. Este descubrimiento respalda la teoría de que los páramos operan como esponjas que liberan lentamente el agua y confirma su

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

extraordinaria capacidad reguladora. Valores altos de flujo base demuestran lo eficaces que son los procesos de infiltración y almacenamiento subterráneo propios de los suelos de ecosistemas de tipo páramo andino asegurando la existencia de agua en tiempos de escasas lluvias. Estos hallazgos subrayan la importancia esencial del páramo en la preservación de la estabilidad hidrológica a nivel regional (Gómez Isidro y Gómez Ríos, 2016).

3.2.2 Curva de Duración de Caudales

Una diferencia significativa entre las dos modalidades de intervención en los páramos se pone de manifiesto en los estudios comparativos. El pastoreo extensivo, que las comunidades locales han practicado durante mucho tiempo, tiene un efecto moderado en la regulación del agua (pendientes del CDC ≈ -0.53), preservando mayormente el funcionamiento del ecosistema. Por otro lado, el pastoreo intensivo produce un deterioro claro (pendientes de CDC ≈ -1.16) a causa de la compactación del suelo y, por lo tanto, la disminución en la capacidad de infiltración (Montenegro Díaz et al., 2019). Estos resultados indican que no toda acción humana es dañina en sí misma, sino que su efecto depende de la intensidad y de cómo se gestione. El reto consiste en hallar equilibrios que faciliten la preservación, a la vez, de los medios de vida de las comunidades y de la integridad funcional de estos ecosistemas vulnerables (Celis Vargas, 2022).

3.2.3 Coeficiente de Escorrentía

Los coeficientes de escorrentía bajos, es decir, menores que 0.3, indican una capacidad de infiltración alta. Estudios realizados en microcuencas de Ecuador muestran que los páramos preservados funcionan como esponjas naturales altamente eficaces. Cuando se encuentran intactos, el agua de lluvia que devuelven como escorrentía superficial es entre el 8% y el 13% (Ochoa-

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Tocachi et al., 2016). La mayoría del agua se filtra a gran profundidad, nutriendo los depósitos subterráneos que sostendrán los caudales en las estaciones secas. No obstante, este frágil sistema se quiebra si se modifica su cubierta vegetal. Sustituir el pajonal nativo por plantaciones de pino disminuye significativamente la producción hídrica superficial, lo que provoca una caída del coeficiente de escorrentía de 0.50 a 0.22 (Céleri Alvear et al., 2001). Estos estudios reflejan la disminución tangible de la habilidad del páramo para desempeñar su rol regulador. El cambio en el uso del suelo altera la capacidad de proporcionar los servicios hidrológicos para las comunidades río abajo.

3.2.4 Constante de Recesión

Las investigaciones sobre las curvas maestras de recesión en cuencas de Santander muestran que en los ecosistemas de páramo coexisten dos sistemas complementarios. Por un lado, existen flujos lentos ($\alpha < 0.01$ 1/día) que funcionan como reservas estratégicas y van liberando agua de manera gradual; por el otro, están los flujos rápidos ($\alpha > 0.01$ 1/día), que reaccionan a las lluvias fuertes. Esta función análoga a una esponja natural subterránea es lo que hace posible que estos ecosistemas sigan proporcionando agua de manera continua incluso en las épocas más secas (Gómez Isidro y Gómez Ríos, 2016).

En general, la investigación existente sugiere que los páramos que se conservan en su estado natural permiten que la lluvia se filtre lentamente hasta las profundidades, y en vez de permitir el escurrimiento superficial del agua, la almacenan en su interior para liberarla gradualmente durante los meses de sequía. Cuantificar la capacidad de regulación hídrica en estos ecosistemas es esencial para establecer medidas tendientes a su sostenibilidad en el largo plazo.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

4. Metodología

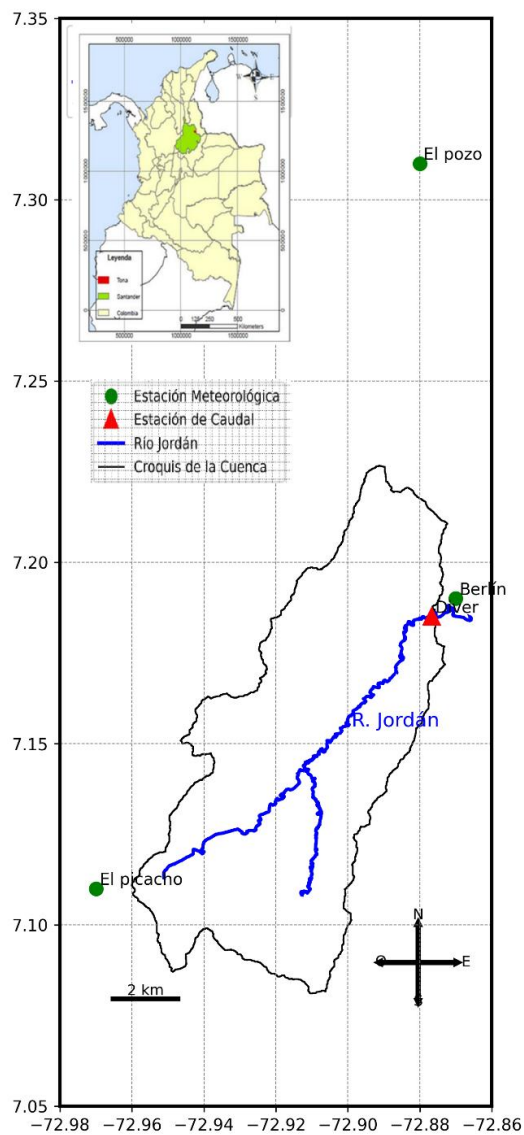
La caracterización del comportamiento de la regulación hídrica en la microcuenca del río Jordán, se hizo mediante una metodología organizada en cuatro fases principales: i) Recopilación y procesamiento de datos hidrometeorológicos; ii) Cálculo de indicadores de regulación hídrica; iii) Análisis integrado del servicio de regulación; y iv) Formulación de conclusiones y recomendaciones.

Para la aplicación de esta metodología, se definieron primero los límites espaciales del sistema de estudio. Este se desarrolló en la microcuenca del río Jordán, localizada en el flanco occidental del Distrito de Manejo Especial Páramo de Berlín, en el municipio de Tona, al norte del departamento de Santander. El río Jordán se origina en la vereda Parra-Juan Rodríguez a 3,700 m.s.n.m y desemboca en el río Chitagá, ubicado en Norte de Santander (Restrepo et al., 2008). El área de estudio tiene aproximadamente 77 km² y su punto de concentración se localiza en el casco urbano del corregimiento de Berlín. La delimitación de la microcuenca y la ubicación de las estaciones de monitoreo utilizadas en el estudio se ilustran en la Figura 1.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 1

Delimitación área de estudio y ubicación de estaciones de monitoreo.



Nota. Ubicación Geográfica de los Equipos de Monitoreo.

A continuación, se describe la metodología de cada una de las fases.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

4.1 Recopilación y Análisis de Información de Precipitación y Caudales.

Se recopilaron datos de precipitación a partir de las estaciones climáticas principales Berlín, El Picacho y El Pozo, gestionadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Los datos de caudales del río Jordán fueron obtenidos a partir de registros recogidos por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad Industrial de Santander (UIS), capturados mediante un TD-DIVER y un BARO-DIVER de la firma VANNESSEN INSTRUMENTS, situados en el río Jordán en el corregimiento de Tona. Estos dispositivos estaban configurados para registrar cada media hora la altura del agua, lo que permitió calcular el caudal de salida de la microcuenca.

Los equipos BARO-DIVER y TD-DIVER recopilaron datos entre el 24 de marzo de 2018 al 1 de febrero de 2020. Además, se descargaron los datos de precipitación para las 3 estaciones meteorológicas del portal institucional del IDEAM en el mismo rango de tiempo.

El punto de cierre, TD-DIVER-BARO-DIVER, es donde se mide el caudal que sale de la cuenca. Las estaciones más cercanas son BERLÍN (1.11 km), PICACHO EL (13.49 km) y VETAS-EL POZO (14.42 km).

Las características técnicas y ubicación de las estaciones de monitoreo empleadas en el estudio se presentan en la Tabla 1. Cada estación cuenta con un código único del IDEAM que garantiza la trazabilidad y estandarización de los datos dentro del sistema nacional de información hidrometeorológica, siendo fundamental para la consistencia y verificación de la información recopilada.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Tabla 1*Ubicación Geográfica de los Equipos de Monitoreo*

Estación	Longitud	Latitud	Resolución (horas)	Tipo de estación	Altura (m.s.n.m)
BERLÍN [37015020]	-72.87	7.19	24	Climática Principal	3214
VETAS-EL POZO [23190450]	-72.88	7.31	24	Pluviométrica	3220
PICACHO EL [23190300]	-72.97	7.11	24	Pluviométrica	3310
TD-DIVER- BARO-DIVER	-72.87	7.18	0.5	Limnigráfica	3214

Nota. La información sobre coordenadas geográficas fue recolectada del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

A los datos recopilados se les aplicaron las pruebas de calidad siguiendo la guía de prácticas climatológicas de la OMM (World Meteorological Organization, 2018), incluyendo verificación de formato, integridad y rangos válidos. Para la reconstrucción de datos faltantes se implementó Kriging ordinario mediante la biblioteca PyKrig en Python, utilizando un variograma lineal con parámetros por defecto. El ajuste del modelo se validó mediante inspección visual de la coherencia con la distribución espacial de los datos. Este método de interpolación geoestadística se basa en el principio de dependencia espacial, donde la similitud entre observaciones disminuye con la distancia (Comunidad Geo RGB, 2023). El proceso incluyó la modelación de un variograma para

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

cuantificar la estructura de correlación espacial y el cálculo de pesos óptimos que producen el mejor estimador lineal (Garnier Villarreal, 2022). Para garantizar la total transparencia y trazabilidad, los datos originales descargados del IDEAM se encuentran en el Apéndice F, mientras que el Apéndice E contiene la base de datos procesada que incluye los valores de precipitación obtenidos mediante Python, debidamente marcados con banderas que identifican cada valor como medido o interpolado.

Una vez que se obtuvo una serie temporal continua y homogénea, sin anomalías y con sus períodos faltantes reconstruidos, se calcularon las estadísticas descriptivas centrales y de dispersión para describir el régimen hidrológico general. Para los diagramas de caja de precipitación y caudal se utilizaron valores diarios, ya que esta escala temporal permite capturar la variabilidad hidrológica completa de la cuenca, incluyendo tanto eventos extremos puntuales como la dinámica de recesión entre eventos de precipitación, aspectos que suelen suavizarse en promedios mensuales. Esta aproximación es particularmente adecuada para ecosistemas de páramo, donde la regulación hídrica se caracteriza por respuestas rápidas a la precipitación seguida de liberación gradual (Buytaert et al., 2006).

Se utilizaron métodos de interpolación aprobados por la guía de prácticas meteorológicas (World Meteorological Organization, 2018) para el control de calidad y homogeneización de series hidrológicas para corregir las anomalías específicas detectadas en la serie de nivel y reconstruir los intervalos con datos nulos. A través de una interpolación lineal simple, se subsanaron las anomalías aisladas que fueron identificadas antes. Se eligió este método por su efectividad para intervalos específicos donde la variación del caudal es escasa y las estaciones cercanas no están accesibles para asegurar que la serie siga sin añadir distorsiones importantes

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

(World Meteorological Organization, 2018). En el caso de los períodos con datos perdidos de manera continua, se empleó una interpolación cúbica spline, que posibilita mantener la suavidad y la tendencia natural de la serie hidrológica, reduciendo al mínimo la varianza artificial entre puntos vecinos a través de la herramienta Python (Python Software Foundation, 2023).

Para establecer la relación entre el caudal y el nivel del agua en el río, se creó una curva de calibración o de gasto, a partir de 9 aforos realizados por alumnos del grupo GPH entre el 24 de marzo del 2018 y el 2 de enero del 2020.

La Ecuación 1 muestra la curva de calibración que permite transformar el nivel medido en la estación con el caudal de la quebrada.

$$Q = ae^{bH} \quad (1)$$

Donde:

Q: caudal

a, b: parámetros de ajuste

H: nivel

4.2 Cálculo de Indicadores de Regulación

4.2.1 Hidrograma

Para determinar la precipitación promedio en la microcuenca del río Jordán, se aplicó el método de los polígonos de Thiessen (Carrascal Vega, 2014) utilizando las tres estaciones pluviométricas disponibles: Berlín, El Pozo y El Picacho (IDEAM, 2018). Las coordenadas de las estaciones meteorológicas provienen de los registros oficiales del IDEAM, mientras que la ubicación de la estación de caudal (TD-DIVER-BARO-DIVER) se georreferenció mediante

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Google Earth (Google, 2023). Todas las estaciones fueron validadas y representadas espacialmente en Google Earth para unificar el sistema de referencia. El procedimiento consistió en generar una triangulación de Delaunay entre las estaciones y trazar las mediatrices perpendiculares de cada segmento, cuya intersección definió polígonos irregulares que representan el área de influencia de cada estación. La implementación se realizó mediante la biblioteca `scipy.spatial` de Python (Python Software Foundation, 2023), obteniendo como resultado un mapa de la microcuenca subdividido en los polígonos de influencia y el cálculo de la precipitación promedio ponderada por dichas áreas. Después, se calculó la precipitación media como promedio ponderado de las lecturas de las estaciones. El factor de ponderación para cada estación fue la relación entre el área de su polígono y el área total de la cuenca (Torcivia et al., 2022). Esta perspectiva, aunque supone una uniformidad espacial que puede no mostrar con total precisión los complicados efectos orográficos, ofrece una estimación sólida, imparcial y metodológicamente clara de la precipitación satisfaciendo las normas sugeridas para el análisis hidrológico en cuencas que cuentan con redes de monitoreo limitadas (Cruz Roa et al., 2018). Se elaboró un hidrograma en Microsoft Excel para visualizar la variación temporal del caudal en el punto de concentración de la microcuenca. Los caudales promedio diarios se obtuvieron aplicando una curva de calibración a los registros de nivel de agua medidos durante el período de estudio. El análisis conjunto del hidrograma con el pluviograma permitió identificar visualmente los períodos de recesión hidrológica para el cálculo de la constante de recesión, así como proporcionar la serie de caudal necesario para la posterior separación de flujos mediante el algoritmo de Lyne y Hollick. Esta representación gráfica constituyó la base para aplicar métodos de análisis complementarios que cuantifican la capacidad de regulación hídrica del ecosistema de páramo.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Para separar hidrogramas en sus componentes de flujo rápido (respuesta de alta frecuencia asociada a la escorrentía superficial) y flujo base (respuesta de baja frecuencia vinculada al aporte subterráneo), se implementó el algoritmo de Lyne y Hollick, un método numérico de un único parámetro que calcula de manera recursiva el flujo base en el tiempo t como una combinación entre una fracción del flujo base en $t-1$ y una proporción de la diferencia entre el caudal total en t y $t-1$, controlada por el parámetro de suavizado k (generalmente entre 0.9 y 1) (Ladson et al., 2013).

El algoritmo se aplicó en múltiples pasos para optimizar resultados y minimizar distorsiones: El algoritmo se presenta en la Ecuación 2.

$$q_t = Kq_{t-1} + \frac{1+K}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \quad (2)$$

Donde:

q_t : escorrentía superficial filtrada en un tiempo t

$q(t-1)$: escorrentía superficial filtrada en un tiempo anterior

K : factor de agotamiento

Q_t : caudal total registrado en el hidrograma en un tiempo t

$Q(t-1)$: caudal total registrado en el hidrograma en un tiempo anterior

Para entender mejor el comportamiento del páramo de Berlín, se probaron dos valores distintos del parámetro K (0.925 y 0.98), lo que permitió observar cómo cambia la separación de flujos según la velocidad de recesión que se asuma. La elección de estos valores obedece a que 0.925 representa el valor convencional ampliamente usado, mientras que 0.98 se basó en

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

recomendaciones recientes para cuencas con características similares a las del páramo (Ladson et al., 2013). El algoritmo aplicado hace posible la estimación del caudal de escorrentía superficial filtrada (q_t) en cada período de tiempo, tomando como punto de partida el caudal total que se encuentra registrado en el hidrograma (Q_t). El algoritmo se basa en que el flujo superficial tiene una respuesta con un cierto desfase y atenuación. Para modelar este comportamiento, el algoritmo combina la mitad de la variación más reciente del caudal total con una proporción del valor anterior de escorrentía [q_{t-1}], que es regulada por el factor de agotamiento K (Ladson et al., 2013). El factor K , que oscila entre 0 y 1, funciona como un factor esencial que regula la rapidez con la cual se reduce el hidrograma. Cuando su valor se aproxima a 1, se observa una recesión más lenta es decir con mayor impacto del flujo subsuperficial (Ladson et al., 2013). Este comportamiento evidenciaría la habilidad de los acuíferos para soltar agua de forma sostenida y paulatina, una cualidad especialmente importante en ecosistemas de páramo. El flujo base es un indicador de la sostenibilidad del recurso hídrico en la cuenca, y cuando su porcentaje es elevado, significa que hay más sostenibilidad, siempre y cuando no esté influido por el efecto de la contaminación antrópica (Gómez Isidro y Gómez Ríos, 2016).

En la práctica, se aplicó este algoritmo de separación de flujos mediante un proceso de tres pasos que permitió refinar progresivamente los resultados. Primero, se ejecutó el filtrado en el sentido natural del tiempo, luego se aplicó de manera inversa (del final al inicio de la serie), y finalmente se repitió el filtrado en el sentido original. Esta estrategia de triple iteración ayudó a minimizar distorsiones y a obtener una señal más limpia del flujo superficial.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

4.2.2 Curva de Duración de Caudales

La CDC muestra la correlación entre la amplitud de los caudales y su frecuencia de excedencia, lo que revela el porcentaje temporal en que se iguala o supera un caudal específico a lo largo del período analizado (Prieto Jimenez y Reyes Rodriguez, 2020). Para construir la CDC, los caudales se organizaron en orden decreciente y se graficaron contra las probabilidades de excedencia correspondientes, que fueron obtenidas utilizando el método de posición de trazado de Weibull (Ridolfi et al., 2018). Este método calcula la probabilidad de excedencia para cada valor ordenado i según la Ecuación 3.

$$d_i = p(Q > q_i) = P_i = \frac{i}{N + 1} \quad (3)$$

La probabilidad de que un caudal futuro Q sobrepase un valor observado q_i es igual a la duración d_i . La posición del dato en la serie ordenada se usa para calcular esta probabilidad a través del método de Weibull ($i/(N+1)$), siendo i el número de orden del dato y N el total de observaciones.

Para construir la Curva de Duración de Caudales (CDC) se utilizó la totalidad de los datos de caudal medio diario recopilados entre 2018 y 2020. Los caudales se ordenaron de mayor a menor en una hoja de cálculo de Excel, asignándoles un número de posición (i) donde $i=1$ correspondió al caudal máximo e $i=702$ al mínimo, este último representando el total de registros procesados. La probabilidad de que cada caudal fuera igualado o superado se determinó mediante la fórmula de Weibull (Ridolfi et al., 2018).

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Finalmente, estos pares de valores de caudal en relación con el porcentaje de tiempo fueron llevados a un gráfico de Excel, lo que permitió visualizar la relación entre el caudal y su frecuencia de excedencia para el posterior análisis del régimen hidrológico.

4.2.3 Coeficiente de Escorrentía

El coeficiente de escorrentía (C) es un parámetro adimensional fundamental que relaciona la escorrentía superficial con la precipitación total recibida en una cuenca. Sin embargo, su determinación presenta incertidumbre debido a la influencia de múltiples factores como el tipo de suelo, la pendiente del terreno, las condiciones de superficie y la cobertura vegetal (Gaspari et al., 2007). En términos prácticos, valores cercanos a cero indican alta capacidad de infiltración, típica de zonas con vegetación densa, mientras que valores elevados reflejan predominio de escorrentía superficial, asociada a suelos arcillosos, pendientes empinadas o escasa cobertura vegetal. Por el contrario, suelos arenosos y terrenos planos favorecen la infiltración, generando coeficientes más bajos. Este índice, que varía entre cero y uno, se emplea ampliamente para caracterizar la respuesta hidrológica de una cuenca, evaluar su capacidad de regulación hídrica y fundamentar estrategias de gestión sostenible de recursos hídricos.

Para determinar el coeficiente de escorrentía en la microcuenca del río Jordán se utilizó la precipitación promedio de la cuenca, según lo descrito en la sección 4.2.1. Posteriormente, cada valor de precipitación [mm] se convirtió a volumen [m³] considerando el área total de la cuenca ($77.07 \times 10^6 \text{ m}^2$), aplicando el factor de conversión adecuado. Paralelamente, se transformaron las mediciones de caudal [m³/s] en volumen de escorrentía multiplicando por el factor 86,400 segundos/día, lo que permitió obtener el agua que efectivamente escurría por el cauce cada día. Cabe destacar que este cálculo integra los valores diarios de precipitación y caudal a lo largo de

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

todo el período de estudio (2018-2020), acumulándolos para obtener los volúmenes totales que reflejan el comportamiento hidrológico integral de la cuenca. El coeficiente de escorrentía (C) se calculó entonces como la relación entre el volumen total escurrido (Ve) y el volumen total precipitado (Vp) (Ratzlaff, 1994). La ecuación 4 presenta el cálculo del coeficiente de escorrentía de una cuenca.

$$C = \frac{Ve}{Vp} \quad (4)$$

4.2.4 Constante de Recesión

El hidrograma de caudal exhibe una estructura de tres fases, una fase de ascenso, condicionada por la intensidad y distribución de la lluvia; una cresta, que marca el final de la escorrentía directa; y una fase de descenso que corresponde al periodo de recesión donde predomina la liberación progresiva de agua almacenada en la cuenca (Gómez Isidro y Gómez Ríos, 2016).

La metodología para determinar la constante de recesión siguió estas etapas: en un principio, se identificaron y eligieron cinco intervalos de recesión hidrológica en el registro de caudales, con el fin de asegurar que cada periodo tuviera una duración mínima de 7 días para poder capturar correctamente las propiedades del vaciado de los almacenamientos. Para identificar periodos de recesión válidos, se seleccionaron segmentos de caudal con drenaje subterráneo dominante, sin influencia de precipitación reciente. Estos segmentos deben cumplir criterios esenciales como la ausencia de lluvias significativas durante todo el período, un antecedente seco suficiente para garantizar la desaparición completa de la escorrentía superficial, independencia

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

temporal entre eventos seleccionados y un comportamiento lineal en escala semilogarítmica que refleje la contribución del flujo base (Cimorelli y Moccia, 2023). Los tramos iniciales posteriores al pico de caudal fueron descartados por representar escorrentía superficial, priorizándose las fases tardías de recesión donde la pendiente se estabiliza, lo que indica el drenaje gradual de los almacenamientos subterráneos. Para cada uno de estos intervalos, se trazó en escala semilogarítmica la conexión entre el tiempo (t) y el logaritmo del caudal $\ln(Q)$. El uso del modelo exponencial simple para describir el proceso de recesión fue validado gracias a la observación de una relación lineal en estas gráficas. Este comportamiento lineal corrobora que el análisis se llevó a cabo en condiciones hidrológicas inalteradas, lo cual es esencial para calcular los parámetros de recesión con precisión.

Se determinó la constante de recesión (k) como la pendiente de la línea en el gráfico semilogarítmico con unidades de (1/día) y el índice de recesión (α) como el inverso de este valor ($\alpha = 1/k$) (Gómez y Guzmán, 2011) con unidad (días). Por último, al analizar en conjunto y superponer los cinco períodos de recesión escogidos, se creó la curva maestra de recesión (CMR), que describe integralmente el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Jordán.

La constante de recesión (k) cuantifica la tasa de disminución del caudal durante períodos sin lluvia. Se calculó como el valor absoluto de la pendiente de la regresión lineal entre el logaritmo natural del caudal $\ln(Q)$ y el tiempo (t) para cada intervalo de recesión seleccionado. La pendiente negativa de esta relación corresponde directamente a la constante k según la Ecuación 5.

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (5)$$

Donde k representa la constante de recesión, Q_0 es el caudal inicial al comienzo de la recesión y Q_t es el caudal en un momento específico (t). Cabe resaltar que se usó K para filtro

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Lyne-Hollick y k para constante de recesión. El parámetro K del filtro de Lyne y Hollick fue tomado de la literatura especializada, ya que representa un factor de suavizado empírico independiente de la constante de recesión hidrológica k .

Este procedimiento permite expresar de manera cuantitativa la reacción hidrológica de la cuenca, en cuanto a su capacidad para almacenar aguas subterráneas y para liberarlas después (Prieto Jimenez y Reyes Rodriguez, 2020). Se escogieron solamente intervalos de recesión sin precipitaciones durante la fase descendente del hidrograma, porque incluso las lluvias más pequeñas pueden modificar el patrón de drenaje natural y poner en entredicho la suposición de vaciado de almacenamientos (Cimorelli y Moccia, 2023). Para determinar visualmente su adecuación, se graficaron los segmentos filtrados.

5. Resultados

5.1 Calidad y Homogeneización de las Series de Datos

Los resultados de la evaluación de calidad de las series de precipitación fueron diferentes entre las estaciones analizadas. Las estaciones PICACHO EL (23190300) y BERLÍN (37015020) exhibieron una integridad de datos ideal, ya que el registro abarcaba todos los 702 días previstos y no había valores ausentes. Además, los exámenes de coherencia corroboraron que no había repeticiones sospechosas de valores (más de 30 ocurrencias) en ninguna y tampoco datos que estuvieran fuera del rango físico razonable para una estación de páramo, lo que ratifica la consistencia interna y fiabilidad de sus series temporales.

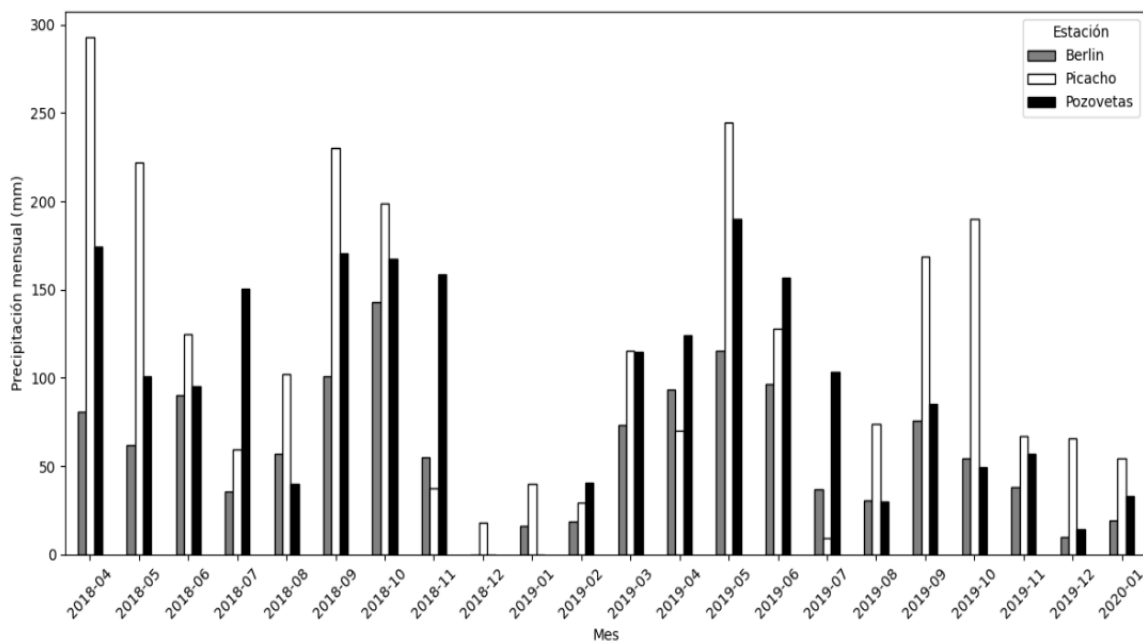
En cambio, la estación EL POZO (23190450) mostró una diferencia importante al no contar con todos los registros de octubre de 2018 (del día 1 al 31), lo que sugiere un lapso de

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

pérdida de datos o una interrupción en la medición entre octubre y noviembre de ese año. Por esta razón, a pesar de que la correlación histórica con la estación EL POZO en octubre fue baja ($r < 0.5$), se utilizó un modelo de Kriging Ordinario con las coordenadas de las estaciones existentes. Esta aproximación, aunque se aleja de las sugerencias ideales de la OMM para interpolación, se hizo exploratoriamente por la falta de datos en la región. La biblioteca PyKrige de Python fue utilizada para desarrollar el modelo y se resaltaron sus hallazgos para evidenciar la elevada incertidumbre asociada y advertir acerca de su uso cauteloso en análisis futuros. Esta perspectiva asegura la transparencia del método y advierte a los usuarios acerca del nivel incrementado de incertidumbre relacionado con esta interpolación, lo cual satisface las pautas de la OMM que dan prioridad a la trazabilidad y la honestidad en el informe de datos estimados.

La variación mensual de la precipitación revela patrones de distribución estacional diferenciados, como se muestra en la Figura 2, con períodos lluviosos bien definidos que coinciden con el régimen bimodal característico de la región andina.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 2*Precipitación Mensual Acumulada en las Estaciones Berlín, Picacho y Pozo Vetas*

Nota. El gráfico se elaboró a partir de datos brutos de precipitación proporcionados por el IDEAM.

El análisis estadístico de la precipitación diaria, resumido en la Tabla 2, confirma la predominancia de días secos en todas las estaciones, evidenciada por medianas de 0 mm. Los promedios bajos (1.9-3.8 mm/día) junto con coeficientes de variación superiores a 1.7 reflejan la alta irregularidad de las lluvias, mientras que el marcado sesgo positivo destaca la influencia de eventos puntuales intensos sobre un régimen predominantemente seco, característico del ecosistema de páramo.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Tabla 2*Medidas de Tendencia Central y Dispersión de la Precipitación Diaria*

Estación	Media (mm/día)	Mediana (mm/día)	Desviación estándar (mm/día)	Coefficiente de variación	Curtosis	Asimetría
Berlín	1.9	0.2	4.2	2.1	15.5	3.5
Picacho	3.8	0	6.8	1.7	5.9	2.3
Vetas	3.0	0	6.1	2	8.3	2.6

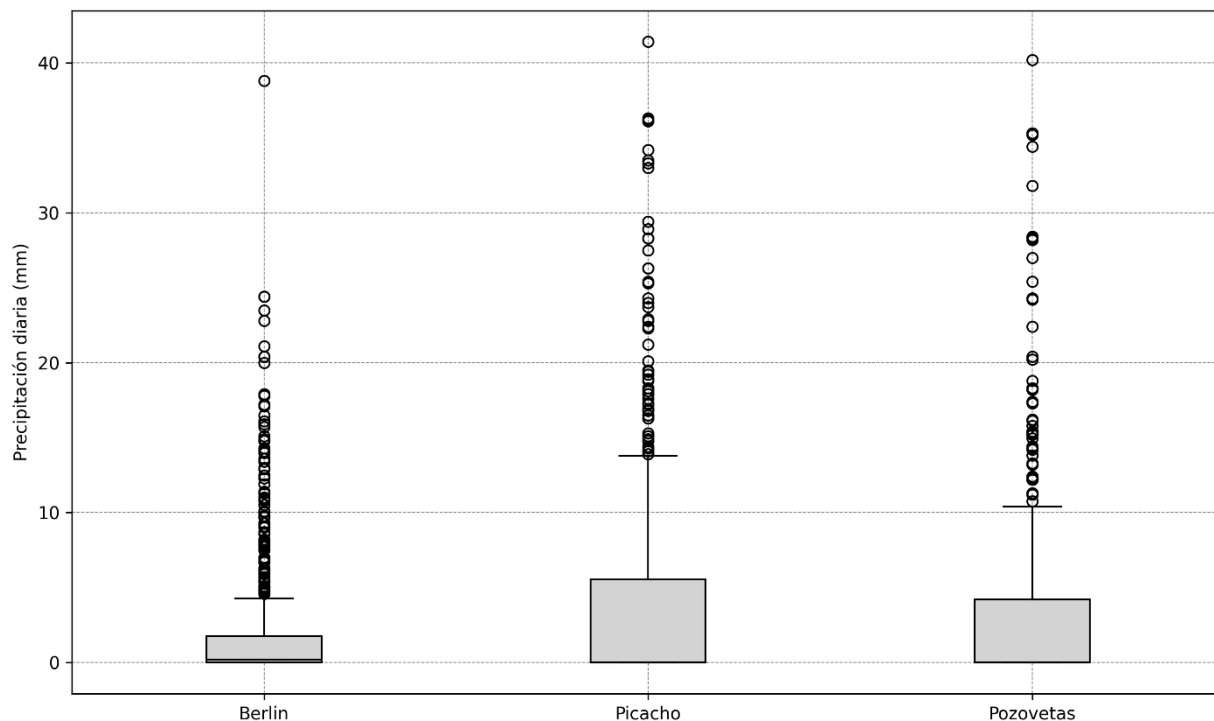
Nota. Los datos fueron procesados a partir de información recolectada por el sistema de monitoreo local.

Por su parte, la Figura 3 revela mediante diagramas de caja la frecuente presencia de valores extremos en todas las estaciones, particularmente notorios en Picacho y Pozo Vetas. Estos eventos de precipitación excepcionales confirman visualmente la ocurrencia de lluvias intensas que, aunque esporádicas, caracterizan el régimen hidrológico del páramo y explican la asimetría observada en los datos de la Tabla 2.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 3

Diagrama de Caja y Bigotes de la Precipitación Diaria por Estación



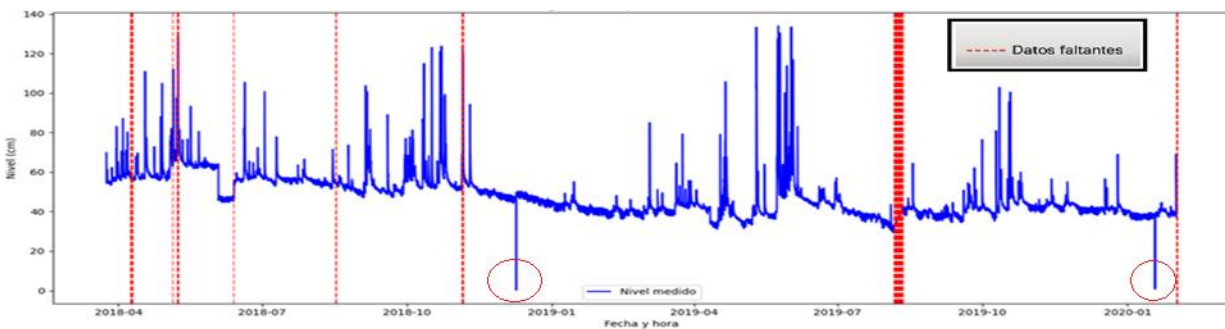
Nota. El diagrama se elaboró a partir de datos brutos de precipitación proporcionados por el IDEAM.

El control de calidad de los datos de nivel identificó interrupciones significativas en el registro de niveles de agua. La Figura 4 presenta la distribución temporal de datos faltantes y anómalos en los registros de nivel de agua, identificando dos períodos principales de interrupción. El análisis revela un evento crítico en agosto de 2019 con hasta 48 datos consecutivos faltantes, además de otros períodos de menor intensidad. Estos vacíos en la serie temporal fueron completados mediante los procedimientos de control de calidad e interpolación establecidos en la metodología, de acuerdo con los protocolos recomendados por la OMM (2018)

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 4

Valores Anómalos y Faltantes en Datos de Nivel de Agua Registrados



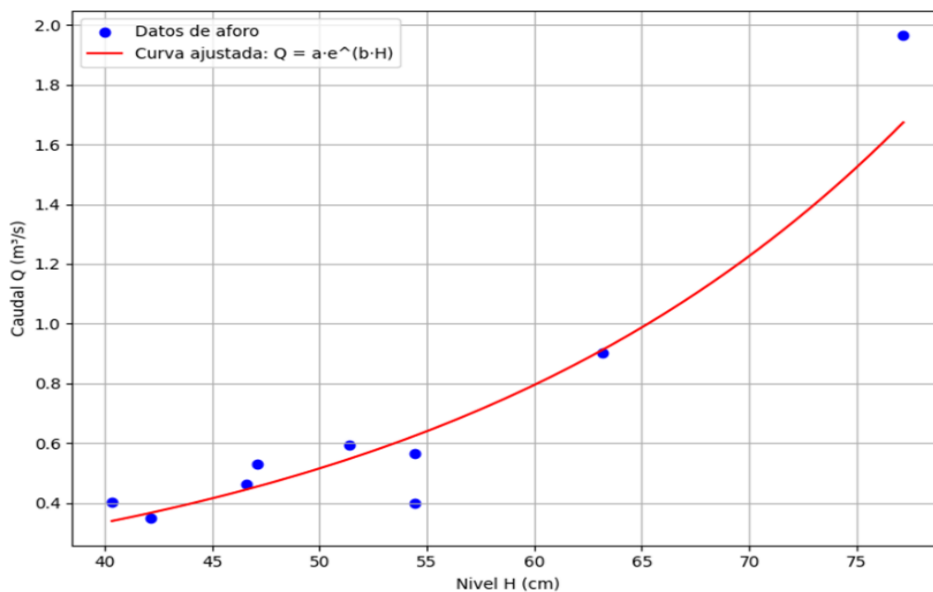
Nota. Estudiantes del Grupo de Investigación en Hidrología (GPH) de la UIS recolectaron los datos.

Cabe destacar que los valores extremos identificados coinciden con las fechas de descarga de datos realizadas por el grupo GPH, por lo que fueron excluidos del cálculo de promedios para evitar distorsiones en los resultados.

5.2 Curva de Calibración

El caudal se calculó a partir de la serie temporal depurada de nivel de agua mediante la curva de calibración o de gasto, definida por los coeficientes $a = 0.059$ y $b = 0.043$. La relación entre las mediciones directas de caudal y las variables hidráulicas utilizadas para su estimación indirecta se presenta en la Figura 5.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 5*Curva de Calibración para la Estación Baro-Diver*

Nota. La curva se elaboró a partir de datos de caudal diario recolectados por estudiantes del Grupo de Investigación en Hidrología (GPH) de la UIS.

El análisis de caudal revela una distribución claramente asimétrica. La mediana es inferior a la media, lo que indica una fuerte asimetría positiva en la que la mayoría de los días presenta valores bajos o moderados, mientras que algunos eventos extremos, posiblemente causados por lluvias intensas o escorrentía rápida, elevan significativamente el promedio. Esta concentración de datos en valores bajos, combinada con una alta curtosis, confirma la presencia de picos de caudal esporádicos pero significativos que caracterizan el régimen hidrológico. El análisis de las medidas de tendencia central y dispersión de los caudales medios diarios en la microcuenca del río Jordán durante el período 2018-2020 están recopiladas en la Tabla 3.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Tabla 3*Medidas de Tendencia Central y Dispersión del Caudal Diario*

Medida	Valor	Unidad
Media	0.523	m ³ /s
Mediana	0.420	m ³ /s
Moda	0.396	m ³ /s
Desviación estándar	0.310	m ³ /s
Rango intercuartílico (IQR)	0.298	m ³ /s
Asimetría	4.365	adimensional
Curtosis	32.777	adimensional

Nota. Los valores calculados corresponden a los datos brutos de caudal procesados para el periodo de estudio.

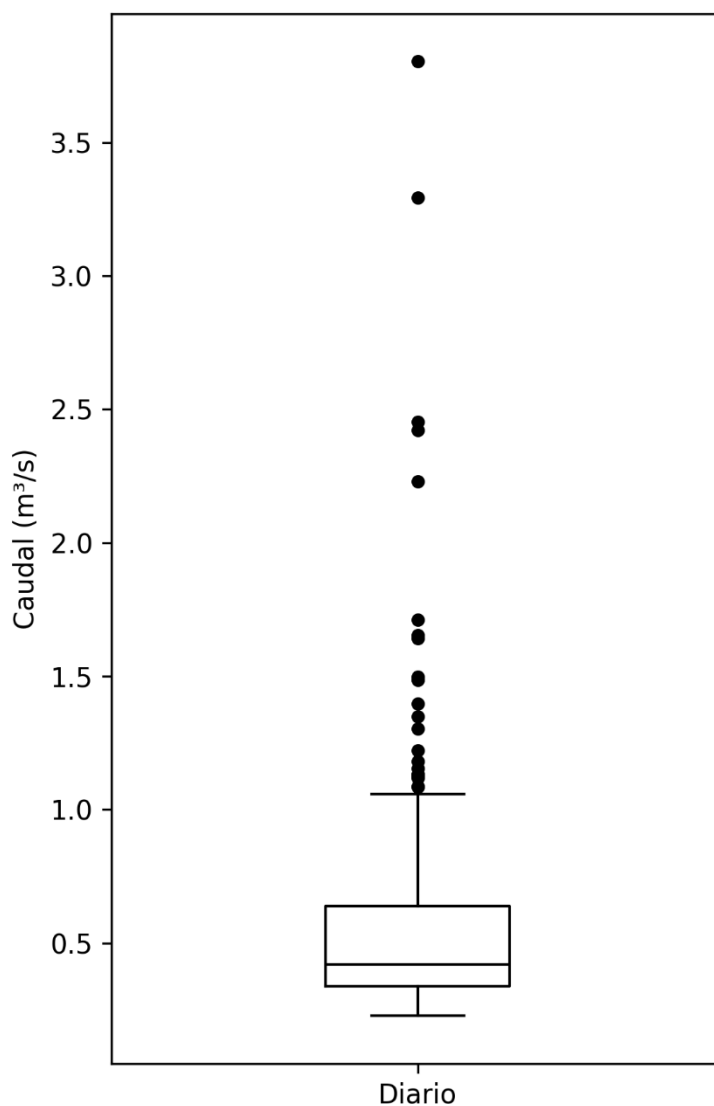
El gráfico de cajas y bigotes revela una distribución asimétrica con tendencia positiva. La mediana (0.420 m³/s) se ubica más cerca del primer cuartil, lo que indica que el caudal se mantiene bajo o moderado la mayoría de los días. Los 23 valores atípicos identificados, correspondientes a eventos extremos como crecidas súbitas, contrastan con el reducido rango intercuartílico (IQR = 0.298 m³/s), lo que refleja que los datos se agrupan predominantemente en valores bajos. Esta combinación de alta variabilidad entre los valores mínimo y máximo (0.227 a 3.803 m³/s) con la concentración de datos en rangos estrechos es característica de cuencas con regulación natural propia de ecosistemas de páramo (Buytaert et al., 2006). La distribución estadística del caudal

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

diario durante el período de estudio se representa mediante el diagrama de caja de la Figura 6, el cual muestra la variabilidad y valores extremos del régimen hidrológico de la microcuenca.

Figura 6

Diagrama de Caja y Bigotes de Caudal



Nota. Los datos de caudal fueron recolectados por estudiantes del Grupo de Investigación en Hidrología (GPH) de la UIS.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

5.3 Cálculo de Indicadores de Regulación

5.3.1 *Hidrograma*

Tras delimitar los polígonos de influencia de cada estación y ajustarlos al área total de la cuenca (77.07 km²), se obtuvieron las áreas representativas: 59.08 km² para Berlín, 0.69 km² para El Pozo y 17.30 km² para El Picacho. La precipitación media se calculó ponderando los registros de lluvia de cada estación según su área correspondiente, lo que permite obtener una estimación espacialmente balanceada de la lluvia en la cuenca, considerando la distribución heterogénea de las estaciones.

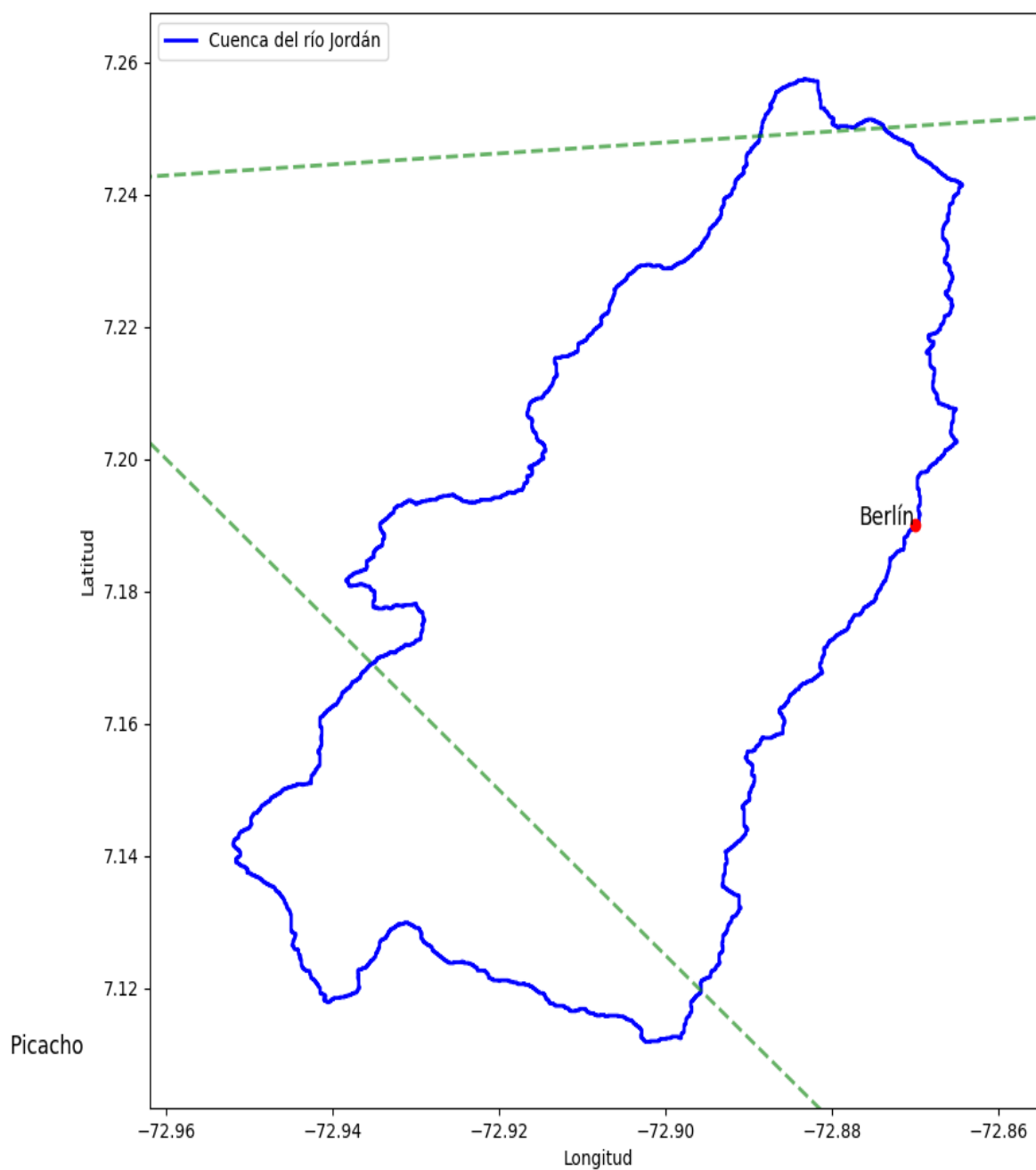
El régimen hidrológico se caracteriza por una alta variabilidad temporal, con fluctuaciones frecuentes que reflejan la respuesta inmediata del sistema a eventos climáticos. Se observan picos rápidos de caudal asociados a lluvias intensas, los cuales contrastan con períodos prolongados de caudal sostenido, alimentado por aportes subterráneos y mecanismos de almacenamiento natural. Esta dinámica evidencia un equilibrio entre la escorrentía superficial rápida y la descarga regulada por acuíferos.

La delimitación mediante el método de Thiessen definió las áreas de influencia de las estaciones pluviométricas en la microcuenca, con valores de 59.08 km² para Berlín, 0.69 km² para El Pozo y 17.30 km² para El Picacho, como se representa en la Figura 7.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 7

Mapa de Polígonos de Thiessen para las Estaciones Pluviométricas



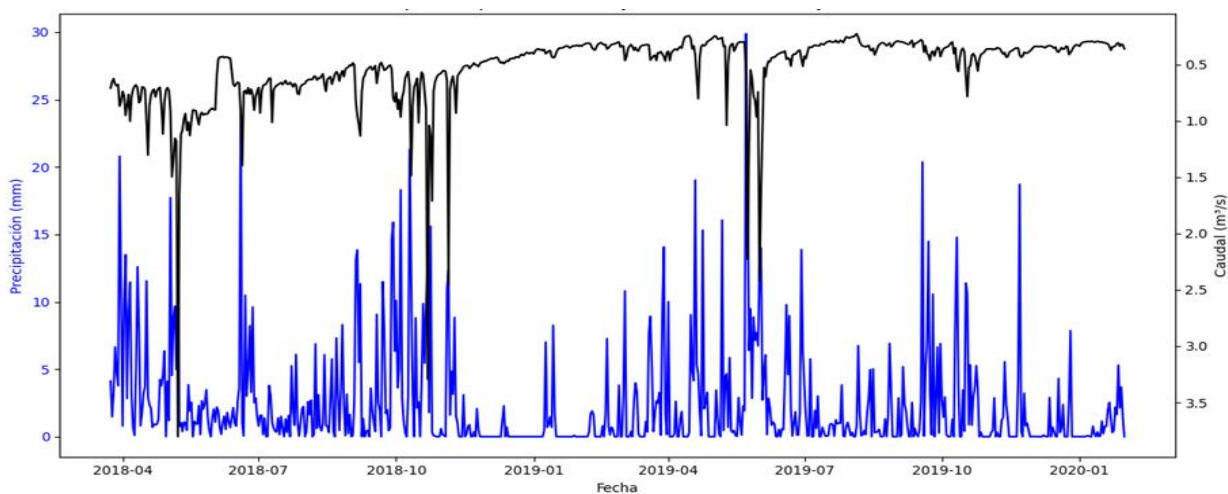
Nota. Los polígonos se generaron a partir de las coordenadas de las estaciones pluviométricas operadas por el IDEAM y el GPH-UIS.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

La relación temporal entre precipitación y caudal en la microcuenca del río Jordán durante el período de estudio queda evidenciada en la Figura 8, donde el hidrograma (línea negra) muestra la variación del caudal medio diario en la estación de medición, contrastando con el pluviograma (barras azules) que representa la precipitación promedio diaria calculada mediante el método de los polígonos de Thiessen con datos de las estaciones Berlín, El Pozo y El Picacho.

Figura 8

Hidrograma y Pluviograma de la Microcuenca del Río Jordán (Páramo de Berlín) para el Período Marzo 2018 - Enero 2020



Nota. Los datos de precipitación los proporcionó el IDEAM (2023), y los datos de caudal los midieron estudiantes del Grupo GPH-UIS.

En algunos meses se observó un aumento notable en la precipitación, lo que sugiere la presencia de un período lluvioso bien definido. Estos patrones generalmente coinciden con los

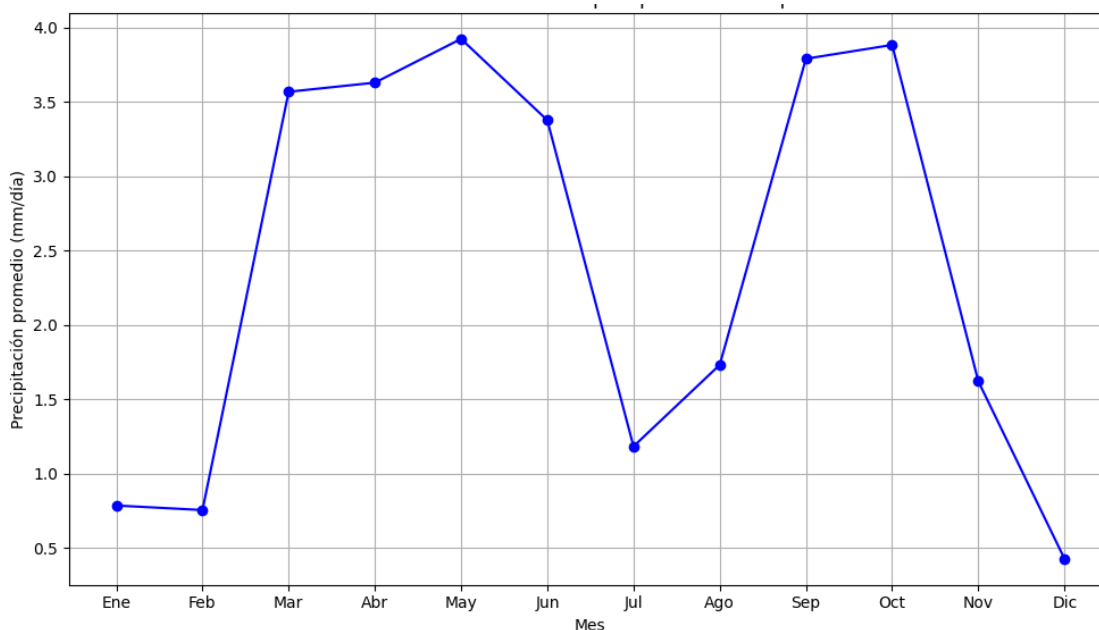
REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

meses de abril a mayo y octubre a noviembre, característicos de las dos temporadas de lluvias en la región andina colombiana.

Los meses con menor precipitación fueron enero, febrero y julio, los cuales corresponden a las temporadas secas conocidas localmente. La estacionalidad de las lluvias afecta directamente la variabilidad del caudal, aunque con ciertas modificaciones y restricciones debido a factores como la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la topografía. Este patrón confirma el clima bimodal típico de la región andina, caracterizado por la presencia de dos estaciones lluviosas y dos estaciones secas cada año (Restrepo et al., 2008). Se observa una respuesta hidrológica rápida ante eventos de precipitación, con picos de caudal que siguen estrechamente a los máximos pluviométricos.

El patrón estacional de la precipitación en la microcuenca, calculado como el promedio diario para cada mes a partir de todos los datos del período 2018-2020, queda evidenciado en la Figura 9. Los valores representan la precipitación promedio esperada en un día de cada mes, confirmando los períodos húmedos (marzo-mayo y septiembre-noviembre) y secos (enero-febrero y julio) característicos del régimen bimodal andino.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 9*Estacionalidad de la Precipitación Diaria Promedio*

Nota. El promedio de la cuenca se calculó mediante el método de los polígonos de Thiessen, utilizando datos diarios de precipitación agrupados por mes de proporcionados por el IDEAM.

Existe una sensibilidad significativa del Índice de Caudal Base (ICB) al parámetro K. Este índice, que representa la proporción del volumen de flujo base respecto al caudal total, mostró valores notablemente diferentes según el parámetro seleccionado. Para $K = 0.98$, el ICB calculado es de 67.99%, mientras que para $K = 0.925$ el valor aumenta a 79.28%. Esta variación de 11.29 puntos porcentuales evidencia la alta dependencia del resultado respecto al valor de filtrado elegido.

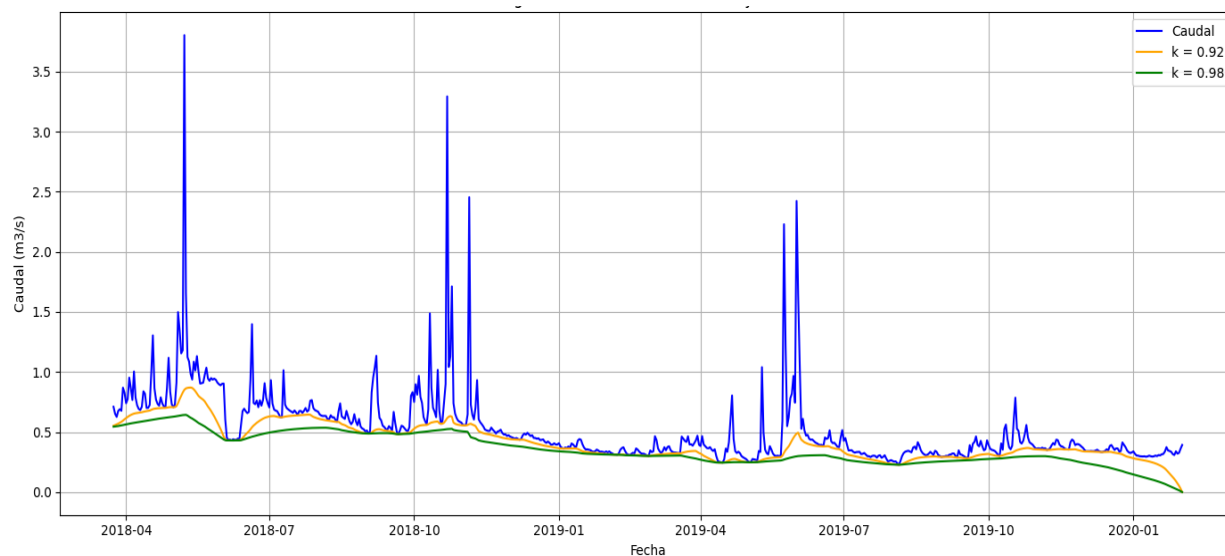
Esta dependencia se ilustra en la Figura 10, donde se compara la separación de los componentes del hidrograma (flujo directo y flujo base) mediante el algoritmo de Lyne y Hollick

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

para los dos factores de agotamiento. La gráfica permite analizar visualmente cómo la variación del parámetro K afecta la estimación del flujo base, reforzando los resultados numéricos del ICB. microcuenca.

Figura 10

Separación de Flujo Directo y Flujo Base mediante el Algoritmo de Lyne y Hollick



Nota. La separación se realizó aplicando el algoritmo de Lyne y Hollick (1979) con dos valores del parámetro de filtro ($K = 0.98$ en verde, $K = 0.92$ en amarillo) a los datos de caudal medidos por el GPH-UIS.

La selección del factor K es crítica para la separación de caudales. Si bien el valor tradicional de 0.925 ha sido ampliamente utilizado, estudios sugieren que $K = 0.98$ produce resultados más consistentes con mediciones empíricas (Ladson et al., 2013). En este estudio se calcularon ambos valores para contrastar los resultados, lo que reveló limitaciones estructurales en el método de filtrado digital: las series derivadas no capturan los procesos físicos subyacentes en

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

su forma, temporalidad o magnitud, lo que debilita las inferencias cuantitativas (Ladson et al., 2013).

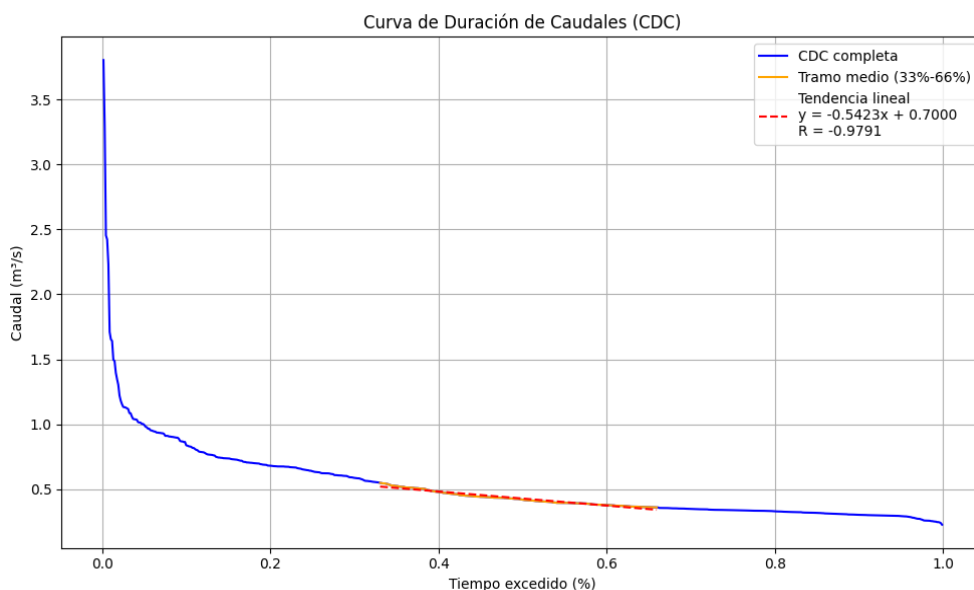
Si bien los valores obtenidos constituyen una primera aproximación útil cuando se contextualizan con otros indicadores hidrológicos, deben interpretarse como estimaciones preliminares que requieren validación mediante técnicas complementarias (por ejemplo, isótopos estables), las cuales actualmente están fuera del alcance de este estudio. Los resultados del índice de caudal base son consistentes con el estado del arte, especialmente el valor de 79.28% ($K=0.925$), el cual se alinea con la alta capacidad de regulación hídrica esperada en ecosistemas de páramo. La marcada discrepancia entre ambos valores de K (0.925 y 0.98) refuerza la necesidad de validar estos hallazgos con métodos complementarios para una interpretación más robusta.

5.3.2 Curva de Duración de Caudales

En el río Jordán, el Q_{90} correspondiente al caudal que se supera el 90% del tiempo y está asociado a condiciones de tiempo seco fue de $0.303 \text{ m}^3/\text{s}$. El Q_{50} , indicador de condiciones medias fue de $0.419 \text{ m}^3/\text{s}$. El Q_{10} , que caracteriza los caudales altos, que se superan solo el 10% del tiempo y están asociados a eventos lluviosos o períodos húmedos fue de $0.838 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Curva de Duración de Caudales (CDC) caracteriza la variabilidad hidrológica de la microcuenca al representar el porcentaje de tiempo en que un caudal específico es igualado o excedido durante el período estudiado, como se observa en la Figura 11.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 11*Curva de Duración de Caudales*

Nota. La curva se elaboró a partir de datos de caudal diario procesados por el Grupo de Investigación (GPH-UIS).

El análisis de la CDC revela que la tendencia de la mediana hidrológica, definida como el caudal comprendido entre el percentil 33% y 66% del tiempo de excedencia, presenta una pendiente de -0.542. Este valor, representado por la línea roja ajustada, indica una tasa moderada de disminución del caudal a medida que aumenta el porcentaje de tiempo de excedencia. La suavidad relativa de esta pendiente sugiere una transición gradual y estable entre caudales medios-altos y medios-bajos, lo cual es característico de un régimen hidrológico con buena regulación natural (Prieto Jimenez y Reyes Rodriguez, 2020). En tales sistemas, la aportación de agua al cauce se mantiene relativamente constante durante gran parte del año, reflejando la influencia de almacenamientos subterráneos o subsuperficiales que mitigan la variabilidad extrema entre períodos húmedos y secos (Buytaert et al., 2006). Este valor se sitúa dentro del rango característico de sistemas

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

naturales con regulación hidrológica efectiva y es similar al documentado para pastoreo extensivo (pendientes de CDC ≈ -0.53). Esto sugiere que, si bien existe actividad antrópica en la cuenca, su intensidad no ha generado el deterioro evidente asociado al pastoreo intensivo, el cual muestra pendientes mucho más pronunciadas (≈ -1.16) como resultado de la compactación de suelos y la consecuente reducción en la capacidad de infiltración (Celis Vargas, 2022).

Aunque esta información sugiere una cuenca de páramo que mantiene un caudal base estable ($Q_{90} = 0.303 \text{ m}^3/\text{s}$), lo cual garantiza el suministro ininterrumpido de agua a las comunidades, la relación Q_{10}/Q_{90} de 2.76 indica que, aunque sigue siendo una fuente fiable para el agua, su habilidad para amortiguar condiciones extremas está disminuyendo.

5.3.3 Coeficiente de Escorrentía

El coeficiente de escorrentía calculado para la cuenca de estudio fue de 24.26%. Se obtuvo de la relación entre el volumen total escurrido ($V_e = 30.75$ millones de m^3) y el volumen total precipitado ($V_p = 126.77$ millones de m^3) durante el período completo de estudio (2018-2020). Estos volúmenes resultan de integrar temporalmente los registros diarios de precipitación y caudal para los 702 días analizados. Este valor señala que, en promedio, aproximadamente una cuarta parte de la precipitación total recibida en la cuenca contribuye directamente al caudal superficial, mientras que el 75.74% restante es retenido mediante procesos de infiltración, evaporación, interceptación vegetal y almacenamiento en el suelo y acuíferos. Este resultado es característico de cuencas con moderada capacidad de retención hídrica, donde factores como la cobertura vegetal, la permeabilidad del suelo y la topografía favorecen la recarga subterránea y reducen la escorrentía superficial directa (Buytaert et al., 2006).

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Un coeficiente en este rango sugiere un equilibrio favorable entre la disponibilidad de agua para escurrimiento y la conservación de recursos hídricos en el sistema natural (Harswal, 2021). Por otro lado, el coeficiente de escorrentía calculado (24.26%) se sitúa en un rango intermedio entre los extremos reportados en la literatura (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Esto indica que la cuenca del río Jordán presenta una capacidad de retención hídrica moderada, posiblemente influenciada por características mixtas de cobertura vegetal o suelos parcialmente alterados. Si bien no alcanza los valores muy bajos ($<13\%$) típicos de páramos prístinos y bien conservados, tampoco se acerca a los valores elevados ($>50\%$) asociados a procesos de degradación severa (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

5.3.4 Constante de Recesión

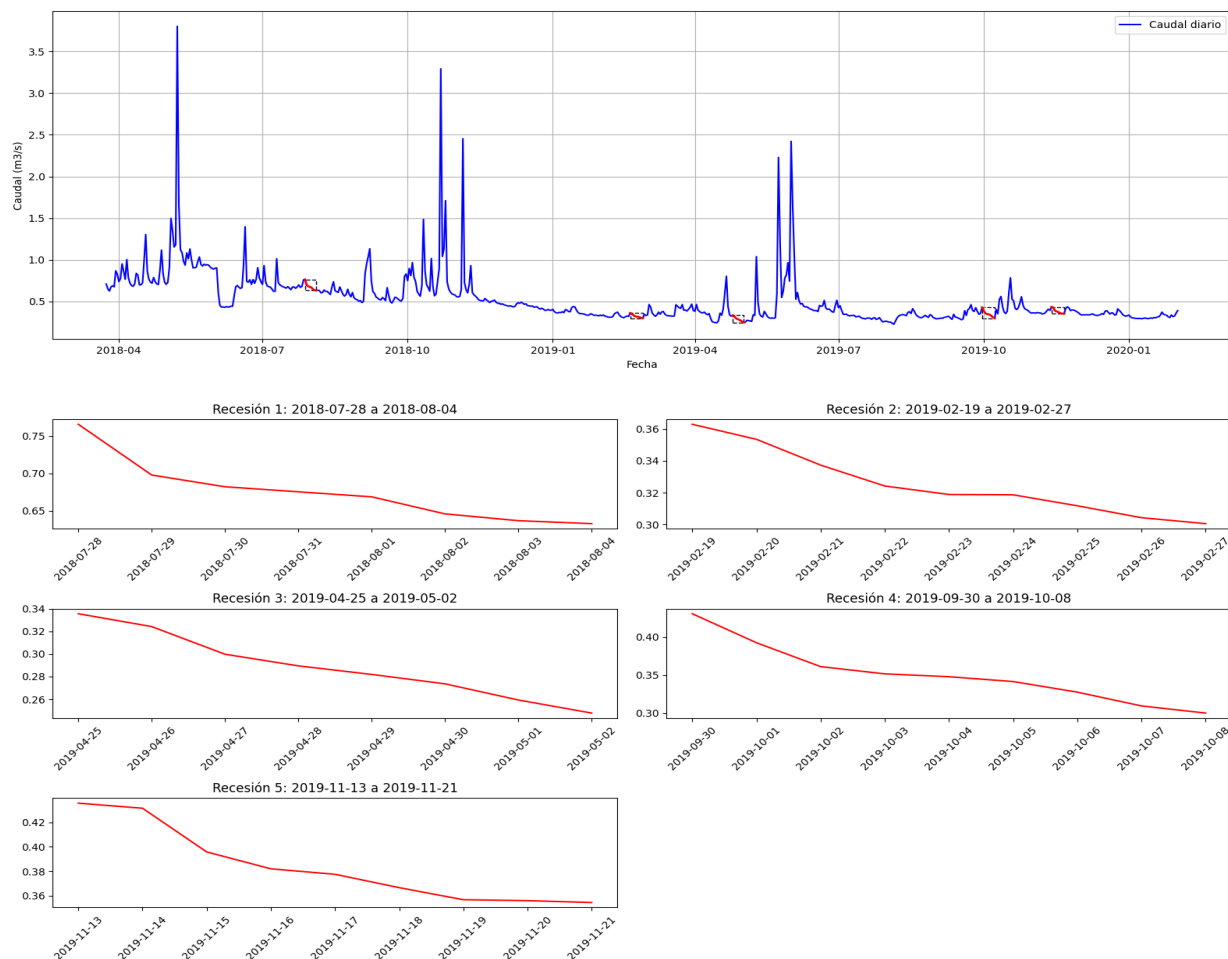
El valor obtenido para la constante de recesión (k) fue de 0.027 (1/día). El índice de recesión (α) fue de 37 días, lo que refleja la lenta respuesta hidrológica de la cuenca. El R^2 calculado fue de 0.753.

Los intervalos de recesión seleccionados en el hidrograma de caudal para caracterizar el comportamiento de descarga del flujo base tras eventos de precipitación se presentan en la Figura 12.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Figura 12

Intervalos de Recesión de Duración de 7 días Seleccionados en el Hidrograma de Caudal de la microcuenca de río Jordán



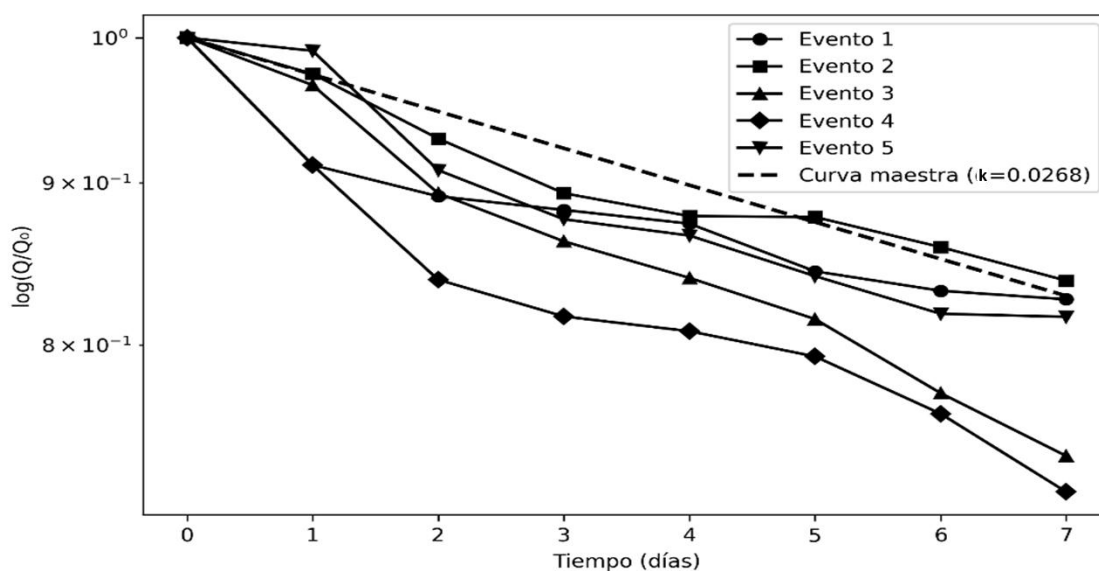
Nota. Los intervalos se seleccionaron mediante el criterio de pendiente a partir de datos de caudal medidos por el GPH-UIS. Cada intervalo corresponde a periodos de recesión representativos, excluyendo perturbaciones por lluvias recientes.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

La curva maestra de recesión para la microcuenca, que resume el comportamiento de los periodos de recesión analizados y muestra la tasa de agotamiento del almacenamiento subterráneo, se presenta en la Figura 13.

Figura 13

Curva Maestra de Recesión para la microcuenca de río Jordán



Nota. La curva maestra se derivó a partir de los intervalos de recesión seleccionados en los hidrogramas de caudal medidos por el grupo GPH-UIS.

Los valores de la constante de recesión y el índice de recesión obtenidos indican que el caudal base tarda alrededor de 37 días en reducirse significativamente después de un evento de precipitación. El valor de (α) evidencia que la cuenca actúa como un regulador natural eficaz, mitigando los efectos de las sequías al liberar el agua almacenada de manera gradual y sostenida. Este valor es crucial para predecir el comportamiento del río durante periodos de estiaje y para la gestión de recursos hídricos a largo plazo.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Aunque las recesiones analizadas duran aproximadamente 7 días, son útiles para entender eventos puntuales en el comportamiento del flujo base (Mathias, 2024); para estudios más amplios tales como la gestión de recursos hídricos o la caracterización hidrogeológica, se recomienda usar recesiones más largas que reflejen mejor la variabilidad estacional y permitan estimaciones más precisas (Gómez Isidro, 2014).

El valor de $k = 0.027$ (1/día) confirma una tasa lenta de agotamiento del almacenamiento subterráneo (Celis Vargas, 2022). Este se clasifica como una respuesta moderadamente rápida, similar a los flujos subsuperficiales locales reportados para la cuenca del río Suratá ($k = 0.032$ (1/día)); Gómez-Isidro y Gómez-Ríos, 2016). Esto sugiere una contribución significativa de acuíferos someros o suelos poco profundos. El R^2 calculado de 0.7531 muestra que, aunque el modelo lineal es una buena aproximación, deberían considerarse otros modelos como el exponencial en futuros estudios.

El comportamiento de estos parámetros sugiere una importante capacidad de regulación hidrológica en la cuenca, probablemente asociada a la lenta liberación de agua desde acuíferos, lo que mitiga los efectos de las sequías y mantiene flujos base estables durante períodos prolongados sin precipitación (Gómez Isidro & Gómez Ríos, 2016).

5.4 Análisis integrado del servicio de regulación hidrológica en la microcuenca del río Jordán

El análisis de los indicadores seleccionados para evaluar el servicio hidrológico de regulación hídrica en la microcuenca del río Jordán proporciona información cuantitativa previamente inexistente que permite conocer la capacidad del ecosistema para acumular, filtrar y

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

liberar agua de forma progresiva y sus posibilidades de mitigar situaciones hidrológicas extremas como las sequías y las inundaciones.

La evaluación de hidrogramas evidenció el modelo bimodal típico de los Andes colombianos. Aunque el hidrograma refleja una rápida reacción hidrológica ante las precipitaciones también presenta un caudal base sostenido en el tiempo que muestra la habilidad del sistema para regularse.

El análisis de la Curva de Duración de Caudales reveló un Q_{90} de $0.303 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que confirma la existencia de un caudal base estable típico de cuencas de páramo y garantiza un suministro constante de agua para las comunidades. Sin embargo, la relación Q_{10}/Q_{90} de 2.76, junto con una pendiente suave en la mediana hidrológica (-0.5423), sugiere que, si bien el sistema mantiene una transición estable entre periodos húmedos y secos, presenta una moderada variabilidad en su régimen hidrológico. Esto indica que, aunque la cuenca sigue siendo una fuente confiable de agua, su capacidad para amortiguar condiciones extremas podría estar limitada en comparación con otros páramos menos perturbados.

El coeficiente de escorrentía calculado (24.26%) muestra que solamente una cuarta parte de la precipitación se convierte en escorrentía directa mientras el 75.74% restante se retiene a través de la infiltración, la evaporación y el almacenamiento, lo que pone de manifiesto la capacidad efectiva de la cuenca para retener agua.

Por medio de la Curva Maestra de Recesión, se pudo determinar un período de decrecimiento de alrededor de 38 días y una constante de recesión (k) que es igual a 0.025 (1/día). Estos datos muestran una liberación del agua almacenada que es sostenida y gradual, lo cual es característico de las propiedades de retención del suelo de páramo. La evaluación a través del filtro de Lyne y Hollick reveló un Índice de Caudal Base en rango entre el 67.99 % y el 79.28 %, lo cual

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

confirmó que el flujo base se presenta con mayor frecuencia que el flujo directo. Sin embargo, la sensibilidad de estos resultados al parámetro de filtrado indica que en investigaciones futuras será necesario complementarlos con métodos isotópicos.

Los resultados indican que la microcuenca presenta una capacidad de regulación hídrica significativa, caracterizada por procesos de almacenamiento y liberación gradual de agua, lo cual es consistente con el comportamiento de ecosistemas de páramo. No obstante, se identificaron indicios de estrés en el sistema, evidenciados por una relación Q_{10}/Q_{90} de 2.76 y un coeficiente de escorrentía del 24.26%, valores que, si bien confirman la persistencia de la función reguladora, se sitúan en un rango intermedio que sugiere una moderada afectación antrópica comparado con un páramo intacto en que el coeficiente puede oscilar entre el 8 y el 13%. Este coeficiente, superior al documentado para páramos prístinos, indica que una porción considerable de la precipitación se convierte en escorrentía superficial, probablemente debido a alteraciones en la cobertura del suelo que reducen su capacidad de infiltración. Estos hallazgos resaltan la vulnerabilidad del ecosistema y la necesidad de implementar acciones de conservación preventiva para evitar su degradación irreversible y el incremento exponencial de los costos asociados a su restauración en el futuro.

Si bien el estudio logró caracterizar el servicio de regulación hídrica, es importante reconocer ciertas limitaciones. La estimación del flujo base mediante el filtro digital de Lyne y Hollick mostró una alta sensibilidad al parámetro de filtrado (K), lo que introduce un grado de incertidumbre en la separación de componentes de escorrentía. Asimismo, la homogeneización de datos de precipitación mediante Kriging, si bien fue la mejor alternativa disponible, no captura por completo la alta variabilidad espacial de la lluvia en el páramo. Finalmente, el periodo de estudio (2018-2020) puede no ser representativo de la variabilidad hidroclimática de largo plazo de la microcuenca. Estas consideraciones no invalidan los resultados, pero sugieren que las conclusiones

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

deben interpretarse dentro de este marco contextual y destacan la necesidad de continuar con el monitoreo para reducir incertidumbres.

Conclusiones

Esta investigación analizó el servicio ecosistémico de regulación hidrológica en la microcuenca del río Jordán (Berlín, Santander), produciendo información técnica esencial para determinar qué decisiones tomar respecto a la gestión sostenible y a la conservación del territorio.

Se consolidó una base de datos de precipitación y caudal confiable para la microcuenca en el periodo de estudio (2018-2020), tras un proceso riguroso de control de calidad, homogeneización y establecimiento de una curva de calibración.

La aplicación de los indicadores de regulación permitió caracterizar numéricamente la capacidad hidrológica de la microcuenca, obteniendo valores clave como: un porcentaje de flujo base del 79.28% tras la separación del hidrograma, un Q90 de 0.303 m³/s en la curva de duración de caudales, un coeficiente de escorrentía del 24.26% y una constante de recesión de 0.027 (1/día).

El análisis integral de los indicadores hidrológicos demostró que la microcuenca provee un servicio de regulación efectivo. Los resultados obtenidos se sitúan en un rango que confirma su estado intervenido, comparado con un páramo intacto, mostrando una función de regulación superior a la documentada para páramos intervenidos, aunque sin alcanzar el óptimo potencial regulatorio característico de páramos prístinos.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Recomendaciones

A partir de los hallazgos y limitaciones identificadas en el presente estudio, se sugieren las siguientes perspectivas de trabajo futuro para fortalecer la evaluación de los servicios ecosistémicos hidrológicos en la microcuenca del río Jordán y en ambientes de páramo: Acompañar el aislamiento de caudales con técnicas que se fundamenten en trazadores isotópicos. Es crucial validar estos resultados a través de técnicas isotópicas (por ejemplo, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) o métodos hidrogeológicos, debido a la sensibilidad que tiene el algoritmo de Lyne y Hollick con respecto al parámetro α , lo cual provoca una variación en el Índice de Caudal Base (ICB). Esto posibilitaría una medición más sólida y basada en la física del flujo base, lo que disminuiría la incertidumbre vinculada a los filtros numéricos.

Con una red de sensores que están repartidos en el espacio, robustecer el sistema de monitoreo. Para registrar la gran variabilidad espacial de las precipitaciones y la respuesta hidrológica, se podrían colocar más pluviógrafos en diferentes rangos de altitud y más sensores de caudal y nivel en los principales afluentes. Esto permitiría la modelación de balances hídricos distribuidos y el ajuste de curvas de gasto particulares para sectores diversos de la cuenca.

Analizar explícitamente el impacto del uso del suelo sobre las métricas de regulación hídrica. Sería útil combinar los valores de la constante de recesión, el coeficiente de escorrentía y el ICB con mapas precisos que muestran la cobertura vegetal y cómo se utiliza el suelo. Este estudio posibilitaría determinar de qué manera actividades como la agricultura impactan en la capacidad de regulación, brindando insumos para el manejo del territorio y la preservación de áreas críticas.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Progresar hacia una perspectiva socio hidrológica. Investigaciones futuras podrían combinar métodos cualitativos y cuantitativos para comprender cómo las comunidades locales valoran y perciben el servicio de regulación hídrica. Esto mejoraría las estrategias de gobernanza del agua y los planes de manejo, al incluir tanto el conocimiento técnico como el local.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Bibliografía

- Aguirre, J. F., Cadena Iñíguez, J., Ramírez Valverde, B., Trejo Téllez, B. I., Juárez Sánchez, J. P. y Morales Flores, F. J. (2016). Diversificación de cultivos en fincas cafetaleras como estrategia de desarrollo. *Acta Universitaria*, *26*(1), 30-38.
<https://doi.org/10.15174/au.2016.833>
- Arias Castellanos, D. M. y Castellanos Prada, E. J. (2020). Capacidad de regulación hídrica de suelos de páramo: una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *11*(2), 45-58. <https://doi.org/10.22490/21456453.3665>
- Bonilla, M. y Quintero, J. (2020). Ecosistemas de páramo: características y servicios ecosistémicos. En M. Bonilla y J. Quintero (Eds.), *Páramos de Colombia* (pp. 15-30). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B. y Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Revista de Geografía*, *4*(2), 45-60.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G. y Deckers, J. (2007). Los servicios hidrológicos de los páramos: una revisión. *Hidrología y Sistemas de Información Geográfica*, *12*(3), 210-225.
- Camacho Valdez, V. y Ruiz Luna, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Bio Ciencias*, *1*, 3-15.
<http://revistabiociencias.uan.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/19/17>
- Carvalho-Santos, C., Honrado, J. P. y Hein, L. (2014). Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale. *Ecological Complexity*, *20*, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2014.09.001>

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

- Célleri Alvear, R., Crespo, P. y Feyen, J. (2001). Análisis comparativo de la respuesta hidrológica en microcuencas andinas con diferente cobertura vegetal. *Revista de Geografía*, *15*(2), 45-60.
- Celis Vargas, J. (2022). *Impacto del uso del suelo en la regulación hídrica de ecosistemas de páramo* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/>
- Cimorelli, L. y Moccia, B. (2023). Dimensional analysis of literature formulas to estimate the critical time scale for basin hydrological response. *Journal of Hydrology*, *625*, 130100. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130100>
- Comunidad GeoRGB. (2023). *Kriging ordinario en 5 pasos: Una guía definitiva*. <https://giscourse.online/kriging-ordinario-en-5-pasos-una-guia-definitiva/>
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2007). *Propuestas de áreas protegidas en la región de páramos: Ecosistema compartido jurisdicciones de la CDMB (Santander) – CORPONOR (Norte de Santander)*. Autor.
- Cruz-Roa, O. L., Olaya-Marín, E. J. y Barrios, J. M. (2018). Estimación de datos faltantes de lluvia mensual a través de la asimilación de información satelital y pluviométrica en una cuenca andina tropical. *Idesia (Arica)*, *36*(3). <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001601>
- Durán-Suárez, L. R., Terneus-Jácome, H. E., Gavilán-Díaz, R. A. y Posada-García, J. A. (2011). Composición y estructura de un ensamble de plantas acuáticas vasculares de una represa altoandina (Santander), Colombia. *Actualidades Biológicas*, *33*(94), 45-60.
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. (2005). *Ecosistemas y bienestar humano: Humedales y agua. Síntesis*. World Resources Institute.

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

- Garnier Villarreal, M. (2022). Introducción al análisis geoestadístico de datos en geociencias: teoría y aplicación. *Revista Geológica de América Central*, *67*, 1-20.
<http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v67i0.51474>
- Gaspari, F., Marlats, R. y Senisterra, G. (2007). Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, *39*(1), 21-28.
- Gómez Isidro, S. (2014). *Aguas subterráneas en zonas de montaña y trazadores ambientales*. Universidad Industrial de Santander.
- Gómez Isidro, S. y Gómez Ríos, V. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia). *DYNA*, *83*(196), 213-222.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>
- Google. (2023). *Google Earth* (Versión 9.175.0.1) [Software]. <https://www.google.com/earth/>
- Harswal, V. (2021). *Importancia del desarrollo de las cuencas hidrográficas en la GRH*. Water For People. <https://thewashroom.waterforpeople.org/es/importancia-del-desarrollo-de-las-cuencas-hidrograficas-en-la-grh/>
- Hofstede, R. (1997). *La importancia hídrica del páramo y aspectos de su manejo*. Conferencia Electrónica "Estrategias para la Conservación y Desarrollo Sostenible de Páramos y Punas en la Ecorregión Andina: Experiencias y Perspectivas".
<http://infoandina.mtnforum.org>
- IDEAM. (2018). *Datos hidrometeorológicos de las estaciones Berlín, El Pozo y El Picacho* [Conjunto de datos]. <https://www.ideam.gov.co/>

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

- Ladson, A. R., Brown, R., Neal, B. y Nathan, R. (2013). A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter. *Australian Journal of Water Resources*, *17*(1), 25-34. <https://doi.org/10.7158/W12-028.2013.17.1>
- Mathias, S. A. (2024). Hydrology and frequency analysis. En *Hydraulics, hydrology and environmental engineering* (Cap. 11). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41973-7_11
- Montenegro Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A. y Céleri, R. (2019). Impact of tussock grasses removal on soil water content dynamics of a tropical mountain hillslope. *Ecohydrology*, *12*(6), e2146. <https://doi.org/10.1002/eco.2146>
- Nieto, L. y Cardona, C. (2015). Impacto de la minería en ecosistemas de páramo: una revisión sistemática. *Revista de Ingeniería y Ambiente*, *22*(3), 45-58.
- Ochoa-Tocachi, B. F., Bardales, J. D. y Buytaert, W. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, *30*(22), 4074-4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- OpenAI. (2023). *ChatGPT* (versión 4) [Modelo de lenguaje grande]. <https://chat.openai.com>
- Prieto Jimenez, D. L. y Reyes Rodriguez, F. O. (2020). *Análisis del efecto del uso del suelo sobre la capacidad de retención y regulación hídrica en microcuencas de páramo. Caso de estudio: Berlín (Santander)* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS. <https://repositorio.uis.edu.co/>
- Puente, A. (2014). Indicadores hidrológicos para la evaluación de servicios ecosistémicos. *Revista de Recursos Hídricos*, *15*(2), 34-45.
- Python Software Foundation. (2023). *Python* (Versión 3.11) [Software]. <https://www.python.org/>

REGULACIÓN HIDROLÓGICA MICROCUENCA JORDÁN

Quintero, J. (2010). *Servicios ecosistémicos de regulación hídrica en páramos colombianos*.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Ratzlaff, J. R. (1994). Mean annual precipitation, runoff, and runoff ratio for Kansas, 1971-1990.

Transactions of the Kansas Academy of Science, *97*(3/4), 94-101.

<https://doi.org/10.2307/3627776>

Restrepo, J., Suárez, C. A. y Álvarez, M. Y. (2008). *Plan integral de manejo del Distrito de*

Manejo Integrado de los recursos naturales "Páramo de Berlín". Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

Ridolfi, E., Kumar, H. y Bárdossy, A. (2018). A methodology to estimate flow duration curves at partially ungauged basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(8), 4287-4303.

<https://doi.org/10.5194/hess-22-4287-2018>

Rivera Ospina, D. y Rodríguez Murcia, C. E. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Torcivia, C. E. G., Rios, N. N. y Angillieri, M. Y. E. (2022). Morphometric characterization of the Talacasto river basin, Central Precordillera, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *74*(1).

<https://doi.org/10.18268/BSGM2022v74n1a300921>

World Meteorological Organization. (2018). *Guía de prácticas climatológicas* (No. 100).

<https://www.wmo.int/>