

Análisis de indicadores de regulación y suministro hidrológico de la cuenca del río Tona
(Bucaramanga, Colombia)

Karen Sofia Bautista Riaño, Deimer Alejandro Vargas Monsalve y María Fernanda
Zambrano Suárez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniería Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Doctor en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Profesor Planta – Escuela de Ingeniería Civil

Codirector

John Jairo Márquez Molina

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Profesor Planta – Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía, fortaleza y refugio en cada etapa de mi vida. Gracias por brindarme la sabiduría, la fe y la perseverancia necesarias para superar los desafíos y permitirme alcanzar este importante logro.

A mis padres, Carlos Alberto Bautista y Edit Liliana Riaño; a mi hermano, Diego Andrés Bautista; y a mi perrita de apoyo emocional, Abby, por su amor incondicional, apoyo constante y confianza en mí. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la disciplina y la perseverancia, y por ser pilares fundamentales en mi formación personal y profesional.

A mis familiares, especialmente a mi prima Paola Andrea Ibáñez y a mi tía Rosa Edilma Riaño, por su cariño y apoyo durante este proceso.

A mis compañeros de tesis y amigos, María Fernanda Zambrano y Deimer Vargas, por su compromiso, compañerismo y dedicación durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir este camino académico y contribuir al logro de esta meta.

A mis amistades: Daniela Rodríguez, Daniela Ortiz, Brayan Parra, Valeria Jaimes, María Jose Palacios, los hermanos García, Silvia y Felipe, Silvia Angarita y su familia, por acompañarme con palabras de aliento y apoyo en los momentos más difíciles.

Finalmente, me dedico este logro a mí misma, por no rendirme ante las dificultades y por continuar avanzando con determinación hacia mis sueños. Este trabajo representa años de esfuerzo, aprendizaje y crecimiento, y es la prueba de que la constancia, la fe y la dedicación permiten alcanzar las metas más importantes.

Karen Sofia Bautista Riaño

Dedicatoria

Este trabajo de grado está dedicado, en primer lugar, a mis padres, Eloisa Suárez Cala y Luis Zambrano Poveda, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional y por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia se alcanzan las metas más altas.

A mi hijo, Julián David, la mayor de mis inspiraciones, el motor de mis días y la razón principal para superarme constantemente. Este logro es, sobre todo para ti.

A mis hermanos, Luis Carlos, Andrés y de manera muy especial a Laura, por su complicidad, apoyo constante y por estar siempre presente en cada etapa de mi camino.

A toda mi familia, con un agradecimiento entrañable a mis tías Luz Mery Zambrano y Georgina Zambrano, por su constante respaldo, cariño sincero y por convertirse en un apoyo invaluable a lo largo de este proceso.

A esos grandes amigos que estuvieron presentes en este proceso desde el inicio de la carrera, compartiendo los primeros pasos de este sueño; en especial a mi amiga Michely Vargas, por su apoyo constante, su lealtad y su valiosa amistad a lo largo de los años.

Finalmente, a mis grandes amigos y compañeros de tesis, Sofía Bautista y Deimer Vargas, con quienes compartí el esfuerzo, los desvelos y el orgullo de ver materializado este gran logro académico.

María Fernanda Zambrano Suárez

Dedicatoria

A mi madre, Rocío del Pilar Monsalve Rincón, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por tu amor incondicional, tus sacrificios, tus enseñanzas y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Todo el esfuerzo que hoy se ve reflejado en estas páginas también es fruto de tu apoyo y dedicación; A mi padrastro, Orlando Murillo López, por acompañarme en este proceso, brindarme su respaldo y enseñarme, con su ejemplo, el valor de la responsabilidad y la perseverancia; A mi padre, Javier Vargas, por su apoyo, sus consejos y por contribuir a mi formación personal y profesional; A mis hermanos, Nicolás Javier Vargas Monsalve y Valeria Murillo Monsalve, quienes han sido una fuente constante de alegría, motivación y compañía. Espero que este logro sea también un ejemplo de que la dedicación y el esfuerzo siempre tienen recompensa.

A mis amigos, quienes hicieron de este recorrido una experiencia más llevadera y significativa. En especial, a Camila Rugeles, por su amistad sincera, su apoyo incondicional, sus palabras de ánimo y por estar presente en los momentos más importantes de este proceso. A mis compañeras de trabajo, María Fernanda Zambrano y Karen Sofía Bautista, por su apoyo, comprensión y motivación constante. Gracias por compartir conmigo esta etapa y por hacer más ameno el camino hacia la culminación de este logro. Finalmente, dedico esta tesis a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este proceso académico. Cada consejo, cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad.

Deimer Alejandro Vargas Monsalve

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por la fortaleza, sabiduría y perseverancia que nos permitieron culminar esta etapa de nuestra formación profesional.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, comprensión y confianza durante todo este proceso académico.

A la Universidad Industrial de Santander y al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), por la formación y el acompañamiento brindados durante el desarrollo de esta investigación.

Expresamos un especial agradecimiento al profesor Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, director de este trabajo de grado, y al profesor John Jairo Márquez Molina, codirector, por su orientación, disposición y valiosos aportes académicos, fundamentales para la realización de este estudio.

Asimismo, agradecemos al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) por el suministro de la información utilizada en esta investigación.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que contribuyeron de manera directa o indirecta al desarrollo y culminación satisfactoria de este trabajo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Hidrología de Ecosistemas de Alta Montaña.....	16
2.2 Servicios Ecosistémicos de Abastecimiento y Regulación Hídrica.....	16
2.3 Impacto del Cambio de Uso del Suelo.....	16
2.4 Investigaciones en Cuencas Andinas	17
2.5 Estudios sobre la Cuenca del Río Tona	17
2.6 Indicadores Hidrológicos	19
2.6.1 Indicadores de Regulación Hídrica	19
2.6.2 Indicadores de Suministro Hídrico.	19
3. Metodología	21
3.1 Fase I. Identificación de coberturas de suelo predominantes en cada una de las tres microcuencas pertenecientes a la cuenca del río Tona.	23
3.2 Fase II. Estudio del comportamiento hidrológico y climatológico de las tres microcuencas objeto de estudio	23

3.3 Fase III. Estimación de indicadores de regulación y suministro de agua en las microcuencas objeto de estudio.	25
4. Resultados	26
4.1 Coberturas de suelo predominante en cada una de las tres microcuencas pertenecientes a la cuenca del río Tona	26
4.2 Comportamiento hidrológico y climatológico de las microcuencas objeto de estudio	30
4.2.1 Comportamiento de precipitación (Hietograma)	30
4.2.2 Comportamiento hidrológico (Hidrogramas)	31
4.2.3 Comportamiento hidrológico y oferta pluviométrica	33
4.3 Cálculo de los indicadores de regulación y suministro hídrico.	35
4.3.1 Indicadores de Regulación Hídrica	36
4.3.2 Indicadores de Suministro Hídrico.....	38
5. Conclusiones	42
Referencias Bibliográficas	44
Apéndices.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Indicadores de regulación y suministro hidrológico.....	20
Tabla 2. Características morfométricas e hidrológicas de las cuencas Carrizal, Golondrinas y Armania.....	22
Tabla 3. Coberturas de suelo predominante en las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Armania.	27
Tabla 4. Densidad de drenaje de las microcuencas Carrizal, Golondrinas y Armania.	34
Tabla 5. Resultados de los indicadores de regulación y suministro hidrológico.	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de localización de la cuenca del Rio Tona.	21
Figura 2. Mapa de cobertura de suelo predominante de la cuenca del Río Tona.	26
Figura 3. Precipitación media mensual multianual de las microcuencas: Arnania, Carrizal y Golondrinas.....	30
Figura 4. Caudal medio mensual multianual de las microcuencas: Arnania, Carrizal y Golondrinas.	32
Figura 5. Relación Precipitación–Caudal medio mensual multianual para las microcuencas Arnania, Carrizal y Golondrinas.	33
Figura 6. Curva de Duración de Caudal (CDC) de las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arnania.....	40

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Análisis cuantitativo de antecedentes hidrológicos en cuencas andinas	47
Apéndice B. Método de ponderación de áreas por isoyetas	48
Apéndice C. Evidencia de vacíos en la información de las estaciones meteorológicas	50
Apéndice D. Evidencia de la Estación Piedras Blancas con todos los datos completos	51
Apéndice E. Procesamiento, organización y consolidación de datos para caudal.....	52
Apéndice F. Cuantificación y Tratamiento de Anomalías (Registros en Cero y Valores Negativos)	54
Apéndice G. Análisis de consistencia hidrometeorológica e impacto en la estimación de indicadores	56

Resumen

Título: Análisis de indicadores de regulación y suministro hidrológico de la cuenca del río Tona (Bucaramanga, Colombia).*

Autor: Karen Sofia Bautista Riaño, Deimer Alejandro Vargas Monsalve, María Fernanda Zambrano Suárez.**

Palabras Clave: regulación hídrica, suministro hídrico, cobertura del suelo, microcuencas, cuenca del río Tona, servicios ecosistémicos.

Descripción: Este estudio analizó los indicadores de regulación y suministro hídrico de las microcuencas Carrizal, Golondrinas y Armania, pertenecientes a la cuenca del río Tona (Bucaramanga, Colombia), para evaluar la influencia de las coberturas del suelo sobre el comportamiento hidrológico. Para ello, se empleó información de coberturas del suelo, registros históricos de precipitación correspondientes al periodo 2004-2025 y series de caudal registradas entre junio de 2023 y mayo de 2026, suministradas por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb). La metodología comprendió la caracterización morfométrica de las microcuencas, el control de calidad y completado de series de precipitación mediante interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW), la depuración de registros hidrométricos y el cálculo de indicadores climáticos e hidrológicos de regulación y suministro. Los resultados evidenciaron un régimen pluviométrico bimodal característico de la región andina y diferencias en la respuesta hidrológica de las microcuencas. Golondrinas presentó una menor pendiente de la curva de duración de caudales ($R2FDC = 0.31$) respecto a Carrizal ($R2FDC=0.41$) y Armania ($R2FDC=0.43$), lo que indica una mayor capacidad de regulación hídrica. Al relacionar las coberturas del suelo con las características morfométricas y la respuesta hidrológica de las microcuencas, se evidenció que Golondrinas, con más del 43 % de cobertura boscosa, presentó una respuesta hidrológica más estable; Carrizal mostró una condición intermedia, con cerca del 40 % de cobertura forestal y un 26,24 % de pastos limpios; mientras que Armania, donde aproximadamente el 75 % del territorio corresponde a coberturas agropecuarias y las coberturas boscosas representan alrededor del 10 % del área, evidenció una mayor variabilidad hidrológica. Finalmente, se concluye que las características de cobertura del suelo y la configuración física de las microcuencas desempeñan un papel determinante en la regulación y el suministro hídrico de la cuenca alta del río Tona, aportando información útil para la planificación y gestión sostenible del recurso hídrico.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. John Jairo Marquez Molina

Abstract

Title: Analysis of Water Regulation and Water Supply Indicators in the Tona River Basin (Bucaramanga, Colombia)*

Author: Karen Sofia Bautista Riaño, Deimer Alejandro Vargas Monsalve, María Fernanda Zambrano Suárez.**

Key Words: water regulation, water supply, land cover, micro-watersheds, Tona River basin, ecosystem services.

Description: This study analyzed the indicators of water regulation and supply of the Carrizal, Golondrinas and Arnanía micro-catchment, belonging to the Tona river basin (Bucaramanga, Colombia), with the purpose of evaluating the influence of land cover on hydrological behavior. To do this, information on land cover, historical rainfall records corresponding to the period 2004-2025 and flow series recorded between June 2023 and May 2026, provided by the of Bucaramanga Metropolitan Water Utility (amb) were used. The methodology included the morphometric characterization of the micro-basins, the quality control and completion of rainfall series by Weighted Inverse Distance (WDI) interpolation, the cleaning of hydrometric records and the calculation of climatic and hydrological indicators of regulation and supply. The results showed a bimodal rainfall regime characteristic of the Andean region and differences in the hydrological response of the micro-basins. Golondrinas presented a lower slope of the flow duration curve ($R2FDC=0.31$) compared to Carrizal ($R2FDC=0.41$) and Arnanía ($R2FDC=0.43$), which indicates a greater capacity for water regulation. When relating the land cover with the morphometric characteristics and the hydrological response of the micro-watersheds, it was evidenced that Golondrinas, with more than 43% forest cover, presented a more stable hydrological response; Carrizal showed an intermediate condition, with about 40% forest cover and 26.24% clean pastures; while Arnanía, where approximately 75% of the territory corresponds to agricultural cover and forest cover represents about 10% of the area, showed greater hydrological variability. Finally, it is concluded that the characteristics of land cover and the physical configuration of the micro-basins play a determining role in the regulation and water supply of the upper basin of the Tona River, providing useful information for the planning and sustainable management of water resources.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. John Jairo Marquez Molina

Introducción

Los ecosistemas de alta montaña son cruciales, no solo como fuentes vitales de agua Kohler & Maselli, (2009) y reservorios de biodiversidad Foggin, (2016), sino por su rol imprescindible en la gestión hídrica para el bienestar y desarrollo económico regional Buytaert et al., (2006). Sin embargo, la tala de árboles y el aumento de la producción agrícola y ganadera extensiva han transformado estos territorios Kohler & Maselli, (2009); Ruiz et al., (2008). En la cuenca del río Tona, el uso del suelo refleja esta presión, incluyendo amplias áreas de cultivos agrícolas (café, plátano, frijol, entre otros), pastizales y bosques plantados (Pino Pátula), según el Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, (CDMB) (s.f.). Actualmente, la cuenca se divide casi equitativamente en Tierras de Producción (53.3%) y Tierras de Protección y de Especial Importancia Ambiental (46.7%) (CDMB, s.f.).

La cuenca del río Tona, a través de sus principales microcuencas como Golondrinas, Carrizal y Arnanía, posee una importancia estratégica vital al ser la principal fuente que garantiza el abastecimiento de agua potable para los municipios de Bucaramanga, Floridablanca y Girón por un período proyectado de 25 años. Su embalse asociado, además, ofrece un potencial significativo para el turismo y la ecología en la región Casas Parra, (2014).

Dada la presión antropogénica por el cambio de uso del suelo y su valor estratégico para el suministro de agua del área metropolitana, la capacidad de regulación hídrica de la cuenca puede verse afectada en el futuro. La ausencia de un análisis histórico y detallado de los indicadores de regulación y suministro del recurso hídrico impide identificar con precisión las tendencias, los riesgos y los cambios en la disponibilidad de agua. Esta limitación restringe la capacidad de las

autoridades y gestores para formular políticas de conservación efectivas y basadas en evidencia Quintero Cárdenas & Rondón Chavarrío, (2023).

El presente trabajo se justifica por su alta relevancia práctica y académica, enfocándose en el análisis histórico de los indicadores de regulación y suministro de la cuenca del río Tona. El valor fundamental de la investigación radica en la generación de insumos técnicos y evidencia empírica necesarios para una gestión sostenible y la conservación activa de este cuerpo hídrico estratégico. En este contexto, la presente investigación analizó los indicadores de regulación y suministro hídrico de las microcuencas Carrizal, Golondrinas y Armania, mediante el análisis de coberturas del suelo, registros históricos de precipitación y caudal, con el fin de identificar diferencias en su comportamiento hidrológico y aportar información para la gestión y conservación del recurso hídrico.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar los indicadores de regulación y suministro hídrico en la cuenca del río Tona a partir de la evaluación de la variabilidad de los regímenes de precipitación y caudal, con el propósito de identificar tendencias y riesgos asociados a la disponibilidad del recurso.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar las coberturas de suelo predominante en cada una de las tres microcuencas pertenecientes a la cuenca del río Tona.

Determinar el comportamiento de variables hidrológicas y climatológicas de las tres microcuencas objeto de estudio.

Determinar los indicadores de regulación y suministro de agua en las tres microcuencas objeto estudio.

2. Marco Teórico

2.1 Hidrología de Ecosistemas de Alta Montaña

Los ecosistemas de alta montaña, como los páramos, son vitales para la gestión hídrica, sirviendo como "torres de agua" que proveen servicios ecosistémicos de provisión y regulación Llambí et al., (2019). Su capacidad para retener y liberar agua de manera gradual es esencial para mitigar los efectos de las variaciones climáticas y garantizar un suministro constante.

2.2 Servicios Ecosistémicos de Abastecimiento y Regulación Hídrica

La literatura reconoce el abastecimiento hídrico como el servicio de provisión que se refiere a la cantidad de agua disponible para el uso humano. Por su parte, la regulación hídrica es un servicio de soporte que mide la capacidad de una cuenca para amortiguar los caudales extremos, liberando agua durante los períodos secos y reteniendo el exceso durante los períodos de lluvia intensa Arango-Carvajal et al., (2025). La alteración de la vegetación y el uso del suelo pueden impactar directamente estos servicios cruciales.

2.3 Impacto del Cambio de Uso del Suelo

La demanda social por recursos ha generado cambios significativos en la cobertura vegetal y el uso del suelo en las sensibles regiones montañosas Arango-Carvajal et al., (2025). La investigación ha demostrado que estas transformaciones, incluyendo la deforestación y la expansión de actividades agrícolas y ganaderas, alteran la hidrología de las cuencas, afectando la regulación del agua y aumentando el riesgo de desabastecimiento Celis Vargas, (2022). El uso de modelos hidrológicos y la teledetección son herramientas clave para evaluar estos impactos y comprender la dinámica de los cambios de cobertura vegetal en los ecosistemas Moreno-Pájaro et al., (2025).

2.4 Investigaciones en Cuencas Andinas

La literatura ha abordado ampliamente el impacto del cambio de uso del suelo en cuencas de alta montaña. Estudios como el de Cepeda Arias et al, (2024) han analizado los cambios en la regulación del caudal en cuencas andinas con retroceso de glaciares, lo que indica la sensibilidad de estos ecosistemas al cambio ambiental.

De manera similar, Celis Vargas, (2022) llevó a cabo un análisis sobre cómo el cambio en el uso y la cobertura del suelo afecta los servicios de suministro y regulación del agua en los ecosistemas de páramo, utilizando el método de cuencas pareadas. Los hallazgos mostraron reducciones significativas en la disponibilidad de agua, con un 55,6 % menos en el abastecimiento y un 32,2 % menos en la regulación, en aquellas áreas hidrográficas que han sufrido intervenciones humanas de tan solo el 15% del territorio, lo que evidencia la gran vulnerabilidad de los páramos ante la alteración de sus coberturas.

Otros detalles más específicos de este estudio pueden ser revisados al final de este documento (Apéndice A).

2.5 Estudios sobre la Cuenca del Río Tona

Existen investigaciones específicas sobre la cuenca del río Tona, aunque con enfoques distintos al propuesto. Por ejemplo, el trabajo de grado de Casas Parra, (2014) se centró en la caracterización geomecánica de los túneles del Proyecto Regulación del Río Tona, lo que evidencia la importancia del proyecto de infraestructura, pero no aborda la hidrología de la cuenca en sí misma.

La literatura académica regional ha avanzado en la comprensión hidrológica del territorio a partir del análisis del uso del suelo y la cobertura vegetal. Diversos autores y entidades locales CDMB, (2019); IDEAM, (2019) han señalado que la conversión de bosques andinos y zonas de

páramo hacia usos agropecuarios altera los patrones de infiltración y acelera los flujos de escorrentía directa. No obstante, la mayoría de estos antecedentes abordan la cuenca a una escala macro o se concentran prioritariamente en la estimación del transporte de sedimentos hacia la infraestructura de almacenamiento (Embalse de Bucaramanga) y potabilización.

En este contexto, sigue existiendo una falta de información sobre cómo estos cambios, junto con la presión de proyectos de infraestructura, afectan de forma particular la regulación y el suministro de agua en la cuenca, un aspecto que se pretende explorar en esta investigación.

Las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Armania son cruciales, ya que constituyen los tres principales drenajes que abastecen la parte baja de la cuenca del río Tona y tienen un papel estratégico en el suministro de agua al área metropolitana de Bucaramanga. El amb realiza captaciones por gravedad sobre estos afluentes, con una capacidad conjunta estimada en aproximadamente 1.2 a 1.4 m³/s Carrillo Peña, (2018). Este caudal se complementa con el Embalse de Bucaramanga, que almacena entre 17.6 y 18 millones de metros cúbicos y regula un caudal adicional de 1.0–1.2 m³/s para garantizar la resiliencia hídrica de la región amb, (2016). La infraestructura incluye además estaciones de monitoreo en los tres afluentes, lo que permite el seguimiento de los caudales y el aporte de cada subcuenca Carrillo Peña et al, (2018). No obstante, diversos estudios advierten que la continuidad de este suministro depende de la conservación de la cobertura vegetal y de un manejo integral de las microcuencas, ya que la deforestación o el cambio de uso del suelo pueden alterar la producción hídrica y afectar los rendimientos en temporada seca Villamizar et al., (2019); Hernández Muñoz, D. A. (2025).

La situación actual, tal como se desprende de la literatura revisada CDMB, (2019); IDEAM, (2019), es que, si bien se reconoce la importancia estratégica de la cuenca del Río Tona para el abastecimiento del área metropolitana, y se han identificado los efectos negativos del

cambio de uso del suelo, existe una brecha crítica en el conocimiento. No se ha realizado un análisis sistemático y a largo plazo de los indicadores de regulación y suministro hídrico para las microcuencas clave (Golondrinas, Carrizal y Arnanía).

Esta investigación justifica y plantea una solución directa a esta limitación. Al analizar la evolución histórica de los principales indicadores hidrológicos (Tabla 1), este trabajo no solo generará una línea base de conocimiento esencial, sino que también proporcionará la evidencia empírica necesaria para que las autoridades y gestores pasen de una gestión reactiva a una proactiva.

2.6 Indicadores Hidrológicos

En el marco de la evaluación de servicios ecosistémicos hídricos, las variables y métricas analíticas se dividen estrictamente según su función física en la cuenca, clasificándose en indicadores de regulación e indicadores de suministro hidrológico.

2.6.1 Indicadores de Regulación Hídrica

Los indicadores de regulación hídrica miden la capacidad del sistema (interacción suelo, vegetación y geología) para amortiguar la variabilidad del ciclo hidrológico. Su objetivo es evaluar la eficiencia de la cuenca para retener el agua durante los eventos de precipitación y liberarla gradualmente en las temporadas secas.

2.6.2 Indicadores de Suministro Hídrico.

Los indicadores de suministro determinan el volumen neto y la disponibilidad cuantitativa de agua que produce una unidad hidrográfica en un periodo de tiempo determinado. Estas métricas responden de forma directa a la cantidad total de recurso generado por la cuenca para el abastecimiento o sostenimiento ecológico.

La selección de los indicadores se fundamentó en metodologías empleadas en investigaciones previas desarrolladas en ecosistemas altoandinos y de páramo Celis Vargas, (2022), así como en la disponibilidad y calidad de la información suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb).

Con base en los criterios expuestos anteriormente, se estructuró la selección definitiva de los indicadores hidrológicos empleados para la evaluación de impactos, los cuales se detallan en la (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores de regulación y suministro hidrológico.

	Denominación	Unidad	Id.	Descripción
Indicadores Hidroclimatológicos	Análisis de hietogramas	N/A	AHOETO	Evalúa la distribución, magnitud y variabilidad de la precipitación mensual y anual.
	Análisis de hidrogramas	N/A	AHIDRO	Evalúa la distribución, magnitud y variabilidad del caudal mensual y anual.
	Densidad de drenaje	Km/Km ²	Dd	Mide la longitud de canales por área, reflejando la eficiencia del relieve para desalojar la escorrentía.
Indicadores de Suministro	Caudal máximo diario	m ³ /s	QMAX	Corresponde al flujo diario máximo, registrado en el período monitoreado.
	Caudal mínimo diario	m ³ /s	QMIN	Corresponde al flujo diario mínimo, registrado en el período monitoreado.
	Caudal unitario	L/s/Km ²	q	Estandariza el rendimiento hídrico específico, permitiendo comparar cuencas de distinto tamaño.
	Curva de duración de caudal	N/A	CDC	Curva que indica el porcentaje de tiempo en el cual, los caudales fueron igualados o excedidos con respecto a un valor específico.
Indicadores de Regulación	Índice de estacionalidad de caudal	N/A	SINDX	Mide qué tan concentrado está el caudal en ciertos meses del año.
	Variabilidad del caudal	N/A	QVAR	Mide el grado de estabilidad y la frecuencia de fluctuaciones abruptas en el régimen diario.
	Porcentaje de días con caudal cero	N/A	DAYPO	Evalúa la persistencia y continuidad del flujo, detectando tramos intermitentes o efímeros.
	Pendiente de la curva de duración de caudal	N/A	R2FDC	Pendiente que se asocia al tercio medio de la CDC.
	Coficiente de variación o de variabilidad	N/A	PVAR	Es una medida de la variabilidad o dispersión de la precipitación respecto a su promedio y permite evaluar qué tan irregular es la lluvia.
	Índice de estacionalidad de precipitación	N/A	SINDX	Mide qué tan concentrada está la precipitación a lo largo del año, y ver si la lluvia está distribuida o concentrada en pocos meses.

Nota: Elaboración propia adoptado de Celis Vargas, (2022).

3. Metodología

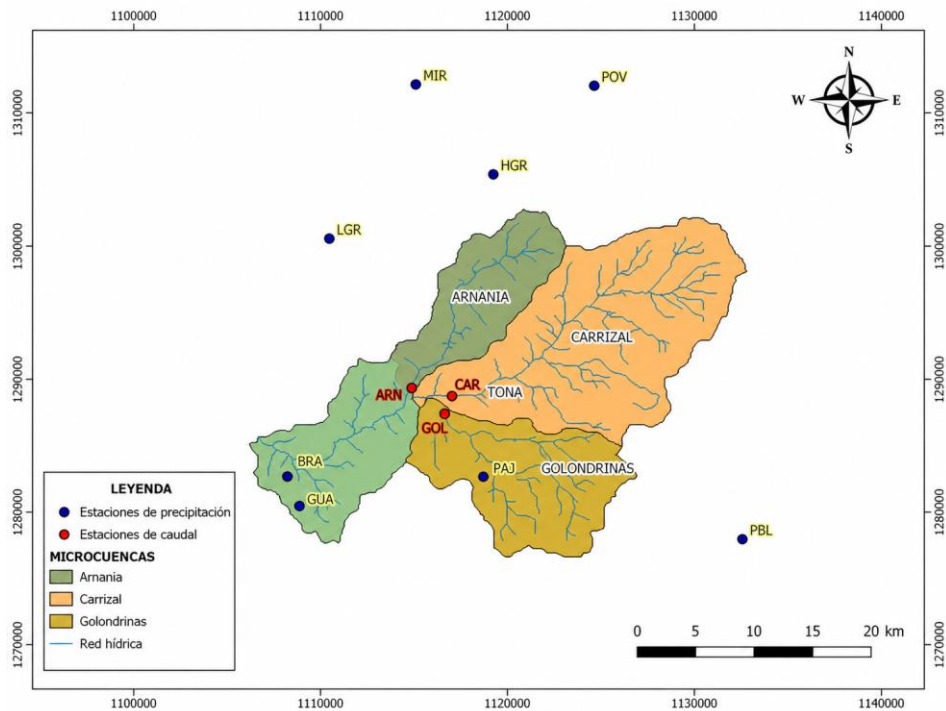
El análisis espacial y temporal se centró específicamente en el comportamiento hidrológico de tres de sus microcuencas principales: Golondrinas, Carrizal y Arania (ver figura 1).

Para el desarrollo del componente climatológico, se integró la información de ocho estaciones de precipitación distribuidas en el área de influencia, administradas por el amb: Miraflores, Huerta Grande, Povedas, Piedras Blancas, El Brasil, El Pajal, La granja y Gualilo. A partir de los registros históricos de estas estaciones, se aplicó el método de ponderación de áreas por isoyetas para generar las superficies de precipitación correspondientes a cada microcuenca en el período estudiado (Apéndice B).

Por otra parte, la caracterización de la oferta superficial y el análisis de caudales se respaldó en los registros de las estaciones hidrométricas automáticas ubicadas en los puntos de aforo de las microcuencas objeto de estudio.

En la (Figura 1) se detalla la delimitación de la cuenca de estudio, la distribución espacial de las tres microcuencas seleccionadas y la ubicación geográfica tanto de las estaciones de precipitación como de las estaciones de caudal utilizadas.

Figura 1. Mapa de localización de la cuenca del río Tona.



Notas: Elaboración propia a partir de información geográfica suministrada por el amb, basada en el trabajo de grado de Castro Saavedra y Vargas Tirado (2025).

MIR: Miraflores; POV: Povedas; HGR: Huerta Grande; LGR: La Granja; BRA: Brasil; GUA: Gualilo; PAJ: Pajal; PBL: Piedras Blancas.

ARN: Arnania; GOL: Golondrinas; CAR: Carrizal.

Por otra parte, la Tabla 2 presenta las principales características morfométricas de las microcuencas Carrizal, Golondrinas y Arnania. Estos atributos físicos constituyen la base para comprender las diferencias en su respuesta hidrológica.

Tabla 2. Características morfométricas e hidrológicas de las cuencas Carrizal, Golondrinas y Arnania.

	CARRIZAL	GOLONDRINAS	ARNANIA
Área [Km ²]	82.95	45.65	30.03
Perímetro [km]	45.92	33.62	27.99

Longitud de cauce [km]	90.27	44.01	26.87
Q_prom [m³/s]	1.23	0.95	0.72

La presente investigación se efectuó en tres fases consecutivas y complementarias:

3.1 Fase I. Identificación de coberturas de suelo predominantes en cada una de las tres microcuencas pertenecientes a la cuenca del río Tona.

En esta primera fase se empleó información geográfica y de coberturas de suelo correspondiente a la cuenca del río Tona, suministrada por el amb y basada en el trabajo de grado de Castro Saavedra y Vargas Tirado (2025). Esta información permitió identificar las coberturas predominantes de las microcuencas objeto de estudio, las cuales constituyeron la base para comprender la influencia de estas en los procesos de regulación hídrica analizados durante las etapas posteriores del proyecto de investigación.

3.2 Fase II. Estudio del comportamiento hidrológico y climatológico de las tres microcuencas objeto de estudio

El tratamiento y la consolidación de la información climatológica correspondiente a precipitación se iniciaron con una auditoría técnica de los datos diarios y mensuales del período comprendido entre enero de 2004 y diciembre de 2025, suministrados por el amb para las estaciones meteorológicas del área de influencia: Miraflores, Piedras Blancas, Povedas, El Pajal, Huerta Grande, La Granja, Gualilo y El Brasil.

Al evidenciarse vacíos de información crítica y registros faltantes significativos en la serie de tiempo, los cuales variaron desde dos meses hasta más de tres años según la estación, se implementó un proceso de completado de datos para garantizar la continuidad y consistencia de las series (Apéndice C). Los vacíos de información se completaron mediante interpolación por Distancia Inversa Ponderada (IDW) utilizando el software SPELLmap y las coordenadas de las

estaciones pluviométricas en el sistema coordinado MAGNA-SIGRAS/ Colombia Bogota zone identificado como EPSG-3116. El procedimiento permitió consolidar series históricas continuas para el cálculo de los indicadores hidrológicos. (Apéndice D)

A partir de la serie completada y mediante el Método de Ponderación por Isoyetas, se calculó la precipitación media mensual multianual para las microcuencas objeto de estudio. Con base en estos valores espaciales, se determinaron los indicadores hidroclimáticos asociados a la regulación y el suministro hídrico, específicamente el Índice de Estacionalidad de la Precipitación (SINDX) y el Índice de Variabilidad de la Precipitación (PVAR), con el propósito de evaluar cuantitativamente la distribución temporal y la dispersión del régimen pluvial en las áreas de estudio.

La caracterización hidrológica se realizó utilizando los registros de caudal suministrados por el amb para las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arnanía. La información correspondió a series de alta resolución temporal obtenidas mediante estaciones automáticas de monitoreo, con intervalos de registro de uno (1) y diez (10) minutos. Debido al volumen de información disponible en el período comprendido desde el 23 de junio de 2023 hasta el 11 de mayo de 2026, se llevó a cabo un proceso de organización, depuración y consolidación de las bases de datos previo a su análisis evidenciado en el (Apéndice E).

Posteriormente, se ejecutó un proceso de control de calidad orientado a identificar valores atípicos, inconsistencias y posibles errores de medición. La homogeneidad y coherencia física de los registros fueron evaluadas mediante análisis estadísticos exploratorios y la revisión detallada de las series temporales. Los registros hidrométricos fueron consolidados a escala diaria con el fin de obtener series homogéneas para el análisis hidrológico y la determinación de indicadores.

Durante este proceso se identificaron anomalías en los registros por la presencia recurrente de valores negativos en los caudales calculados. Debido a que estos valores carecen de validez física, se consideró la exclusión de estos asociados a problemas de medición, calibración o procesamiento de la información (Apéndice F), además los resultados presentan inconsistencias precipitación-caudal, cuyas limitaciones e implicaciones técnicas se detallan en el Apéndice G.

Finalmente, las series de precipitación y caudal validadas constituyeron la base para el cálculo de los indicadores de regulación y suministro hídrico desarrollados en la fase siguiente de la investigación.

3.3 Fase III. Estimación de indicadores de regulación y suministro de agua en las microcuencas objeto de estudio.

Una vez consolidada y validada la información hidro climática, se procedió al cálculo de los indicadores de regulación y suministro hídrico aplicables a las microcuencas objeto de estudio (Tabla 1).

Los indicadores fueron calculados a partir de las series diarias de precipitación y caudal previamente validadas durante la Fase II.

Posteriormente, se realizó un análisis integral de los indicadores obtenidos para las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Armania. Este análisis permitió identificar patrones de comportamiento hidrológico, niveles de regulación natural, estabilidad de los caudales y capacidad de suministro del recurso hídrico. Finalmente, los resultados fueron interpretados en conjunto con las características de cobertura del suelo identificadas en la Fase I y con las condiciones hidroclimáticas determinadas en la Fase II, lo que permitió establecer relaciones entre la dinámica hidrológica observada y las condiciones ambientales predominantes en cada microcuenca.

4. Resultados

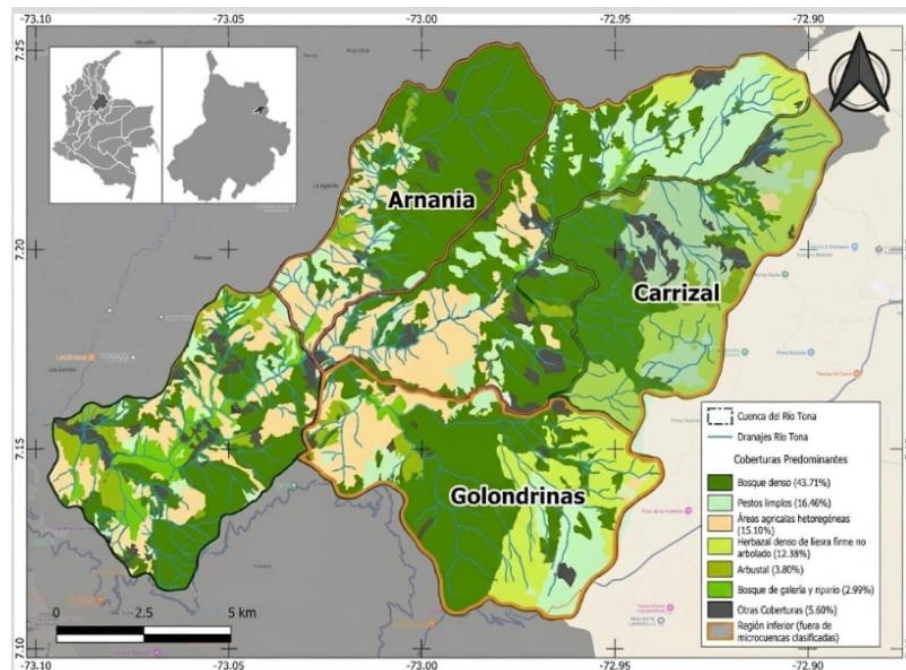
En este apartado se presentan los resultados obtenidos del análisis de las coberturas del suelo, el comportamiento hidrológico y los indicadores de regulación y suministro hídrico considerados en la investigación (Tabla 1). Inicialmente, se describe la distribución de las coberturas de la cuenca del río Tona y de las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arnanía. Posteriormente, se analiza el comportamiento de la precipitación y el caudal, para finalmente presentar e interpretar los indicadores hidrológicos calculados, relacionándolos con las características físicas y de cobertura del suelo de cada microcuenca.

Los resultados presentan inconsistencias precipitación-caudal, cuyas limitaciones e implicaciones técnicas se detallan en el Apéndice G.

4.1 Coberturas de suelo predominante en cada una de las tres microcuencas pertenecientes a la cuenca del río Tona

La Figura 2 y la Tabla 3 muestran que en la cuenca del río Tona predominan las coberturas naturales, representadas principalmente por bosque denso (43.71 %) y herbazal denso (12.38 %), aunque también se identifican áreas destinadas a actividades agropecuarias.

Figura 2. Mapa de cobertura de suelo predominante de la cuenca del Río Tona generado con imágenes del año 2025.



Nota: El gráfico representa las coberturas de suelo predominantes en la cuenca del río Tona e identifica las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arnania. Tomado de Castro Saavedra y Vargas Tirado (2025).

Para caracterizar la distribución del uso del suelo en las unidades de estudio, la Tabla 3 sintetiza los tipos de cobertura vegetal y antrópica predominantemente identificados en las microcuencas de Arnania, Golondrinas y Carrizal.

Tabla 3. Coberturas de suelo predominante en las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arnania.

Coberturas para el año 2025	Arnania		Golondrinas		Carrizal	
	Área por Cobertura [km2]	Área por Cobertura [%]	Área por Cobertura [km2]	Área por Cobertura [%]	Área por Cobertura [km2]	Área por Cobertura [%]
Arbustal denso	0.79	2.63%	0.53	1.16%	1.39	1.68%
Arbustal	NA	NA	0.65	1.42%	0.47	0.57%
Bosque de galería y ripario	0.04	0.13%	0.52	1.13%	0.7	0.84%
Bosque denso	1.94	6.47%	17.84	39.08%	21.26	25.63%
Bosque denso bajo	1.06	3.53%	1.51	3.30%	8.15	9.83%
Bosque abierto	NA	NA	NA	NA	2.51	3.02%
Bosque denso alto	NA	NA	0	0.01%	1.36	1.64%

Bosque fragmentado	0.07	0.24%	NA	NA	NA	NA
Cultivos permanentes arborescentes - Café	0.46	1.52%	NA	NA	NA	NA
Herbazal	0.26	0.88%	0.18	0.40%	0.27	0.32%
Herbazal abierto	NA	NA	NA	NA	0.33	0.40%
Herbazal abierto arenoso	NA	NA	0.42	0.93%	0.25	0.30%
Herbazal denso	0.10	0.35%	0.06	0.14%	NA	NA
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	NA	NA	5.16	11.31%	0.67	0.81%
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	NA	NA	6.71	14.69%	11.45	13.81%
Instalaciones Recreativas	0.02	0.08%	NA	NA	NA	NA
Mosaico de cultivos	18.81	62.63%	0.45	0.99%	0.42	0.51%
Mosaico de cultivos y espacios naturales	0.04	0.12%	0	0.01%	3.54	4.27%
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3.81	12.68%	3.75	8.22%	4.56	5.49%
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.13	0.42%	0.43	0.95%	NA	NA
Mosaico de pastos y cultivos	0.57	1.88%	0.3	0.66%	1.24	1.49%
Hortalizas					0.02	0.03%
Pastos arbolados	0.47	1.56%	0.28	0.60%	1.57	1.89%
Pastos enmalezados	0.32	1.05%	0.14	0.30%	0.06	0.08%
Pastos limpios	1.15	3.83%	6.55	14.36%	21.77	26.24%
Plantación de coníferas	NA	NA	0.11	0.24%	0.11	0.13%
Plantación de latifoliadas	NA	NA	NA	NA	0.44	0.53%
Plantación forestal	NA	NA	NA	NA	0.04	0.04%
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	NA	NA	0.02	0.04%	NA	NA
Ríos (50 m)	NA	NA	NA	NA	0.21	0.26%
Tejido urbano continuo	NA	NA	0.03	0.07%	0.15	0.18%

Notas: NA: No aplica.

El análisis de la Tabla 3 evidencia diferencias en el grado de intervención y conservación entre las microcuencas.

Armania presentó la mayor transformación antrópica en el año 2025, con predominio del mosaico de cultivos (62.63%), seguido del mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (12.68 %). En conjunto, estas coberturas representan cerca del 75 % de la superficie de la microcuenca.

En contraste, las coberturas boscosas nativas, conformadas principalmente por bosque denso, apenas alcanzan aproximadamente el 10% del área.

Golondrinas presentó el mayor predominio de coberturas naturales. El bosque denso constituye la cobertura principal (39.08%), seguido del bosque denso bajo (3.30%) y del bosque de galería y ripario (1.13 %), alcanzando conjuntamente más del 43 % del área de la microcuenca. Además, se identificaron coberturas de herbazal denso de tierra firme no arbolado (14.69 %) y pastos limpios (14.36 %), las cuales conforman una matriz con alta cobertura vegetal, favoreciendo procesos de infiltración, almacenamiento temporal del agua y regulación hidrológica.

Carrizal presentó una condición intermedia entre conservación e intervención antrópica. Las coberturas predominantes correspondieron a pastos limpios (21.77 km²; 26.24 %) y bosque denso (21.26 km²; 25,63 %). Al incorporar las demás categorías boscosas —bosque denso bajo (9.83 %), bosque abierto (3.02 %) y bosque denso alto (1.64 %)— la cobertura forestal representa cerca del 40 % del área total. Esta combinación de coberturas forestales y pecuarias configura una matriz territorial mixta que condiciona los procesos de infiltración, escorrentía superficial y respuesta hidrológica.

En conjunto, las tres microcuencas presentan un gradiente de intervención claramente diferenciado. Arania concentra la mayor presión agropecuaria, Golondrinas conserva la mayor proporción de coberturas naturales y Carrizal representa una condición intermedia donde coexisten áreas forestales y de pastoreo. Estas diferencias constituyen un elemento fundamental para interpretar los indicadores de regulación y suministro hídrico analizados en las siguientes secciones.

4.2 Comportamiento hidrológico y climatológico de las microcuencas objeto de estudio

Como condición inicial para el desarrollo del balance hídrico y la modelación de los indicadores en la cuenca alta del río Tona, se realizó una estricta auditoría y control de calidad a las series de tiempo de las estaciones de control.

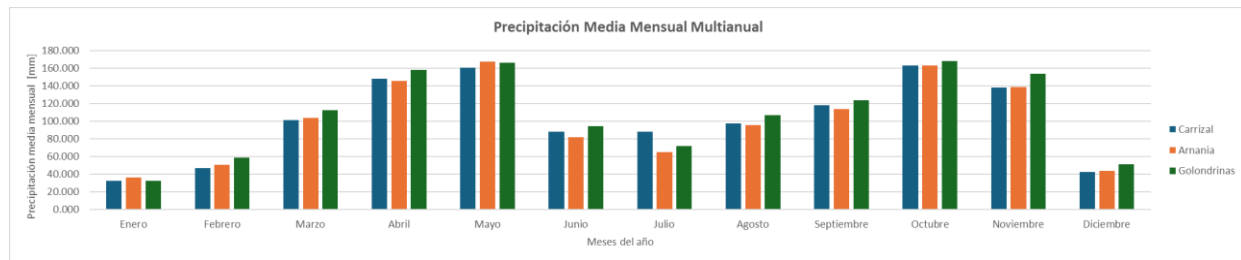
La inspección detallada de sus registros reveló anomalías físicas incompatibles con la naturaleza del sistema lótico, estas inconsistencias delatan fallas críticas de orden instrumental, o posible descalibración severa de las curvas de gasto (nivel-caudal) en la estación de control o errores sistemáticos en la transmisión de los datos brutos.

Como paso preliminar a la evaluación de los índices de regulación y suministro, es indispensable comprender cómo interactúan la fuerza de las lluvias, la respuesta del caudal y la estructura física de la red de canales en el territorio. Para ello, en esta sección se consolidan y analizan los hietogramas (comportamiento de la precipitación), los hidrogramas (variación de los caudales en el tiempo) y la densidad de drenaje de las microcuencas.

4.2.1 Comportamiento de precipitación (Hietograma)

A partir de los registros históricos presentados en la Tabla 3, se evidenció un régimen pluviométrico bimodal característico de la región andina colombiana. Las fases de máxima inflexión positiva corresponden a los trimestres de marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre, con techos de precipitación que oscilan entre los 100 mm y 170 mm. Este comportamiento es fundamental para comprender la dinámica de regulación hídrica de la cuenca, ya que los periodos de recarga condicionan directamente la disponibilidad de caudales base durante las épocas de menor precipitación (enero-febrero y junio-julio).

Figura 3. *Precipitación media mensual multianual de las microcuencas: Arnania, Carrizal y Golondrinas.*



Nota. Elaboración propia a partir de las series históricas de precipitación suministradas por el amb correspondientes al periodo 2004–2025.

4.2.2 Comportamiento hidrológico (Hidrogramas)

La distribución mensual multianual de la estación Carrizal (Figura 4) evidencia un comportamiento bimodal que identifica dos periodos de altos caudales con un pico durante el año de hasta $76.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de mayo y una baja de hasta $15.2 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de agosto. Esto asociado a una influencia directa de la variabilidad climatológica regional observada previamente donde los periodos de marzo-mayo y septiembre-noviembre corresponden a periodos de lluvia, lo que permitió reconocer los periodos en que se posee mayor o menor disponibilidad hídrica para la gestión del recurso.

Además, la respuesta hidrológica de la microcuenca se encuentra influenciada por la distribución de sus coberturas de suelo. De acuerdo con la clasificación Corine Land Cover (CLC), predominan pastos limpios y bosques densos que corresponden a un 56.77% del área de la microcuenca lo que favorece a los procesos de precipitación, infiltración y regulación de la escorrentía. Además, contribuye a la conservación de caudales base durante periodos secos e incrementar la escorrentía superficial en periodos de alta precipitación.

La distribución mensual de los caudales en la microcuenca Golondrinas (Figura 4) presenta un comportamiento que no coincide completamente con el régimen pluviométrico observado para la cuenca del río Tona, ya que los mayores caudales se registran entre mayo y agosto, mientras que

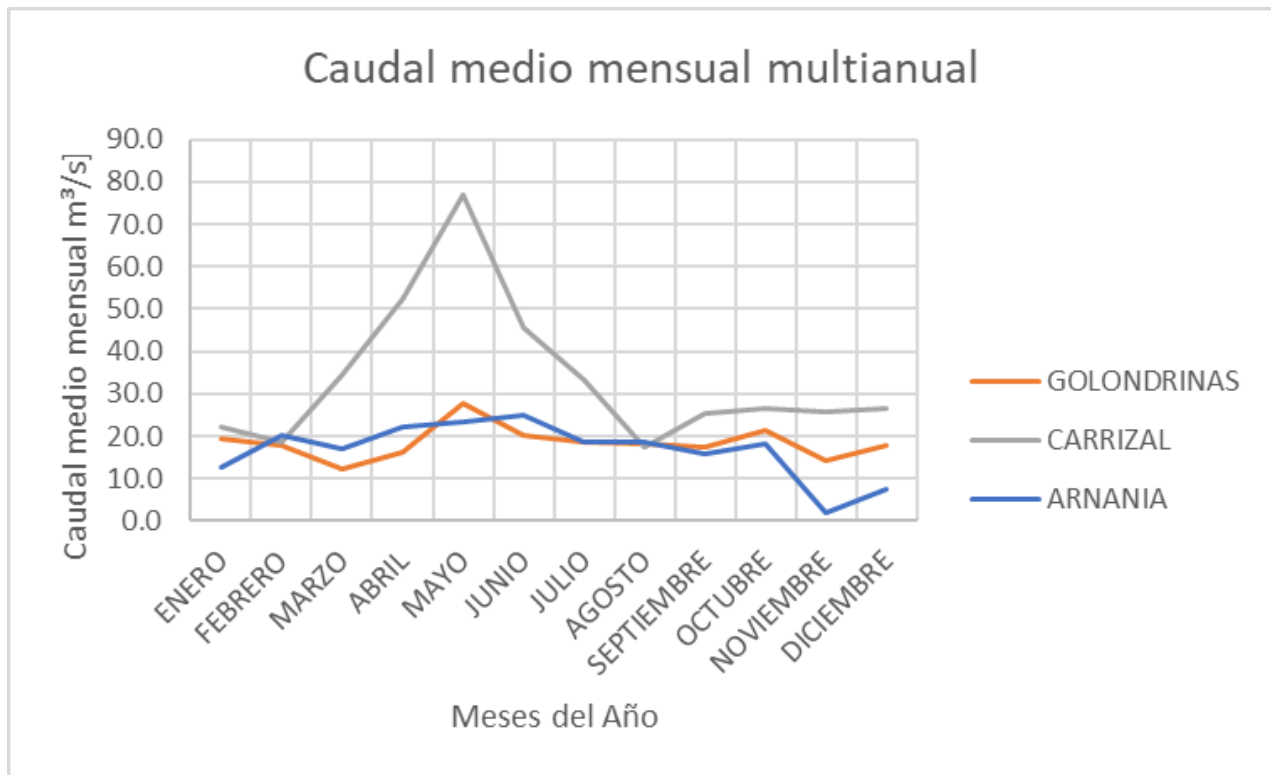
los máximos de precipitación ocurren durante los periodos marzo-mayo y septiembre-noviembre. Esta discrepancia sugiere la existencia de posibles inconsistencias en la serie hidrométrica o de factores adicionales que influyen en la respuesta hidrológica de la microcuenca, por lo que los resultados deben interpretarse con cautela.

De igual manera se observa que en la clasificación CLC de la subcuenca Golondrinas se encuentra como predominante una cobertura de bosque denso y pastos limpios que corresponden al 54.33% entre otras coberturas Herbazales que contribuyen a la regulación y mantenimiento de caudales base durante periodos secos lo que señala una capacidad de esta para amortiguar variaciones de caudal relacionadas a la estacionalidad climatológica de la cuenca.

La distribución mensual de los caudales en la microcuenca Armania (Figura 4) evidencia un comportamiento de tipo bimodal, caracterizado por la sucesión de dos periodos de avenidas y dos periodos de estiaje a lo largo del ciclo anual. No obstante, este régimen presenta un desfase cronológico y variaciones de magnitud significativas al contrastarlo con el patrón pluviométrico bimodal típico de la cuenca del río Tona (cuyos máximos ocurren en marzo-mayo y septiembre-noviembre).

Está marcada desconexión expresada en un estiaje severo en noviembre en plena época de altas lluvias se encuentra directamente asociada a que Armania presentó la mayor transformación antrópica de las unidades evaluadas. La clasificación CLC revela un claro predominio del mosaico de cultivos; sumando en conjunto cerca del 75 % de la superficie total bajo uso antrópico. En contraste, las coberturas boscosas nativas reguladoras, apenas alcanzan aproximadamente el 10% del área.

Figura 4. Caudal medio mensual multianual de las microcuencas: Armania, Carrizal y Golondrinas.

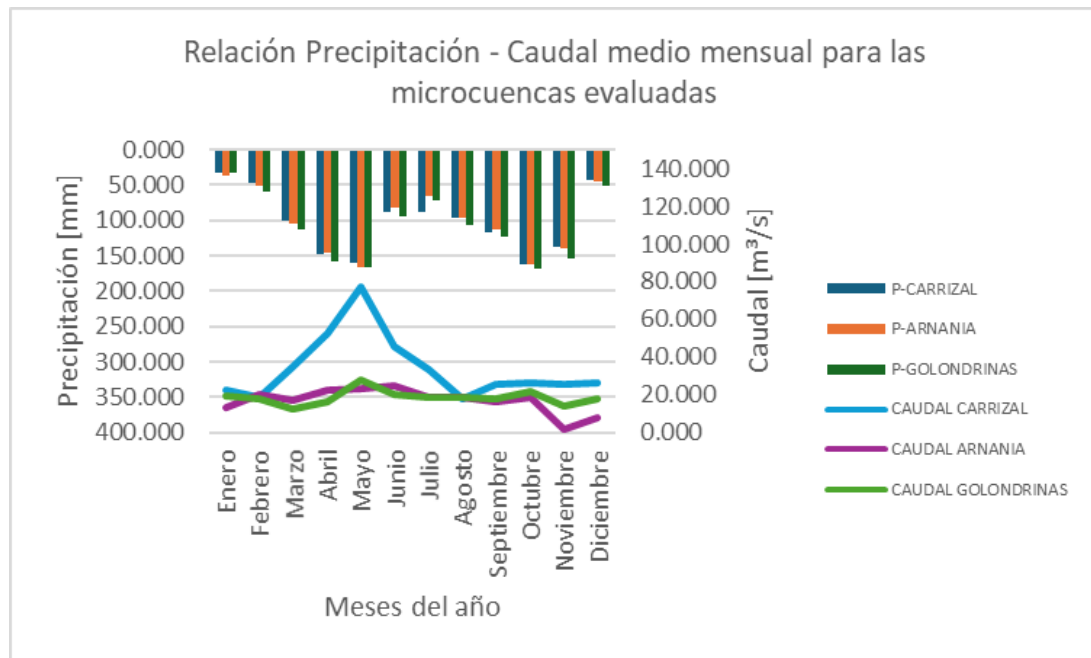


Nota: Elaboración propia a partir de las series históricas de caudal (2023-2026) suministradas por el amb.

4.2.3 Comportamiento hidrológico y oferta pluviométrica

Con el propósito de observar de manera integrada la respuesta hidrológica frente a la oferta pluviométrica, la Figura 5 presenta la superposición del hietograma e hidrograma medio mensual multianual para las tres microcuencas.

Figura 5. Relación Precipitación–Caudal medio mensual multianual para las microcuencas Arnania, Carrizal y Golondrinas.



Nota. Elaboración propia a partir de las series históricas de precipitación y caudal suministradas por el amb correspondientes al periodo 2004–2025 y 2023 y 2026 respectivamente.

Las series históricas pluviométricas evidenciaron un régimen macroclimático bimodal homogéneo en toda el área de estudio, caracterizado por la concentración de las precipitaciones durante el bimestre abril-mayo. Aunque este patrón climático constituye el principal estímulo para la generación de esorrentía en las microcuencas, la respuesta hidrológica también está condicionada por sus características físicas. En este sentido, las propiedades morfométricas evidencian una marcada similitud geométrica, con densidades de drenaje de 1.09 km/km² para Carrizal, 0.96 km/km² para Golondrinas y 0.89 km/km² para Arnania, clasificando a las tres unidades como cuencas de baja densidad de drenaje (DdB), como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Densidad de drenaje de las microcuencas Carrizal, Golondrinas y Arnania.

	Carrizal	Golondrinas	Arnania
Densidad de Drenaje Dd [Km/Km ²]	1.09	0.96	0.89

La baja densidad de drenaje favorece tiempos de concentración más prolongados y una respuesta hidrológica menos torrencial IDEAM (2014), condición que es consistente con los indicadores de regulación obtenidos para las microcuencas evaluadas.

4.3 Cálculo de los indicadores de regulación y suministro hídrico.

Con el fin de evaluar de manera integral los indicadores de regulación y suministro, se consolidan los resultados en la Tabla 5, para luego dar paso al análisis detallado de cada uno de ellos en los apartados posteriores.

Tabla 5. Resultados de los indicadores de regulación y suministro hidrológico.

			Golondrinas		Carrizal		Armania		Intervalos
SINDX	Mide qué tan concentrada está la precipitación a lo largo del año, y ver si la lluvia está distribuida o concentrada en pocos meses.	0.36	Moderadamente Estacional	0.36	Moderadamente Estacional	0.38	Moderadamente Estacional		$\approx 0 \rightarrow$ Distribución uniforme 0.2 – 0.5 $\rightarrow$ Moderadamente estacional $> 0.8 \rightarrow$ Altamente estacional.
PVAR	Es una medida de la variabilidad o dispersión de la precipitación respecto a su promedio y permite evaluar qué tan irregular es la lluvia.	0.42	Estable Alto	0.43	Estable Alto	0.44	Estable Alto		Bajo (<0.5) $\rightarrow$ Estable Alto (>0.5) $\rightarrow$ Variable Muy alto (>1) $\rightarrow$ Muy irregular
q [L/s/Km ²]	Estandariza el rendimiento hídrico específico, permitiendo comparar cuencas de distinto tamaño.	20.91	Bajo Moderado	14.88	Bajo Moderado	24.06	Bajo Moderado		$\leq 30 \rightarrow$ Bajo Moderado (BM) 30-80 $\rightarrow$ Moderadamente Alto (MA)
SINDX	Mide qué tan concentrado está el caudal en ciertos meses del año.	0.27	Estacional Moderado	0.21	Estacional Moderado	0.14	Régimen Uniforme		0 – 0.2 Régimen uniforme (RU) 0.2 – 0.4 Estacional moderado (EM) >0.4 Muy estacional (ME)

QVAR	Mide el grado de estabilidad y la frecuencia de fluctuaciones abruptas en el régimen diario.	0.82	Alta Variabilidad	1.08	Muy Variable	0.63	Variabilidad Media	< 0.3 Baja variabilidad (caudal estable) (BV) 0.3 – 0.7 Variabilidad media (VM) > 0.7 Alta variabilidad (AV) > 1 Muy variable / torrencial (MV)
DAYPO	Evalúa la persistencia y continuidad del flujo, detectando tramos intermitentes o efímeros.	0	Régimen Permanente	0	Régimen Permanente	0	Régimen Permanente	0 Río permanente (RP) 0.1 – 0.3 Intermitencia moderada (IM) >0.3 Río intermitente (RI)
R2FDC	Pendiente que se asocia al tercio medio de la CDC.	0.31	Escarpada-Fuertemente Ondulada	0.41	Escarpada-Fuertemente Ondulada	0.43	Escarpada-Fuertemente Ondulada	<=0.07→ Plana (PL) 0.07-0.12→ Moderadamente Inclinada (MI) 0.12-0.25→ Fuertemente Inclinada (FI) 0.25-0.50→ Escarpada-Fuertemente Ondulada (E-FO)
QMAX [m³/s]	Corresponde al flujo diario máximo, registrado en el período monitoreado.	8.78	Capacidad de respuesta significativamente alta	11.29	Capacidad de respuesta significativamente alta	6.41	Capacidad de respuesta significativamente alta	<=2.0 m³/s →Capacidad de Respuesta Baja 2.0-6.0m³/capacidad de Respuesta Alta >6.0m³/capacidad de Respuesta Significativamente Alta
QMIN [m³/s]	Corresponde al flujo diario mínimo, registrado en el período monitoreado.	0.13	Baja Capacidad de Regulación Hídrica	0.05	Baja Capacidad de Regulación Hídrica	0.06	Baja Capacidad de Regulación Hídrica	<=0.15 m³/s →Baja Capacidad de Regulación Hídrica 0.15-0.50 m³/s→Moderada Capacidad de Regulación Hídrica >0.50m³/s→Alta Capacidad de Regulación Hídrica

4.3.1 Indicadores de Regulación Hídrica

La respuesta hidrológica observada en las microcuencas se interpretó a partir de los indicadores de regulación y suministro, en conjunto con las características de cobertura del suelo y los atributos morfométricos evaluados. Sin embargo, debe considerarse que dicha respuesta

también está condicionada por otros factores físicos, como la pendiente, las condiciones geológicas, geomorfológicas y las propiedades del suelo, los cuales no fueron objeto de evaluación específica en esta investigación. En consecuencia, las interpretaciones presentadas corresponden a asociaciones entre las variables analizadas y el comportamiento hidrológico observado, sin atribuir una relación causal exclusiva a las coberturas del suelo.

La microcuenca Golondrinas ratifica una alta eficiencia de amortiguamiento y estabilidad en su régimen diario. Presenta la menor pendiente en el tercio medio de su curva de duración de caudales $R2FDC=0.31$, lo que se traduce en un proceso de vaciado lento y sostenido de sus reservas reguladas. Este comportamiento se alinea de manera consistente con un índice de variabilidad diaria moderado $QVAR=0.82$ y un índice de estacionalidad controlado $SINDX=0.27$, demostrando que el flujo no sufre alteraciones abruptas ni concentraciones extremas en periodos específicos del año. Adicionalmente, la continuidad total del flujo ($DAYP0=0$) confirma una alta resiliencia mediada por sus coberturas vegetales conservadas, las cuales actúan bajo el efecto esponja manteniendo el flujo base.

Carrizal evidencia una marcada inestabilidad hidrológica y una respuesta predominantemente torrencial. Registra el mayor índice de variabilidad diaria del estudio $QVAR=1.08$, reflejando que el caudal responde de manera inmediata y discontinua ante la ocurrencia de precipitaciones, con fluctuaciones severas en el régimen diario. Esta baja capacidad de retención se corrobora con el incremento en la pendiente de su (CDC) $R2FDC=0.41$, lo que expone un vaciado acelerado de los almacenamientos internos del suelo, reduciendo su eficiencia de regulación estacional debido a la degradación de sus coberturas.

Por su parte, Arnanía muestra una dinámica de regulación particular condicionada por su entorno modificado. Registra el índice de variabilidad diaria más bajo del análisis $QVAR=0.63$, lo

cual denota una homogeneidad en las descargas a corto plazo. Sin embargo, este indicador se contradice con el hecho de poseer la pendiente de la CDC más pronunciada de las tres microcuencas $R2FDC=0.43$ y el menor índice de estacionalidad $SINDX=0.14$. Esta configuración simultánea de indicadores revela que, si bien la cuenca mantiene flujos diarios estables durante la temporada húmeda por efecto del manejo del suelo, carece de la estructura física para retener el agua en el mediano y largo plazo, lo que acelera de forma crítica la tasa de vaciado estacional del sistema hacia los periodos secos.

En síntesis, la evaluación conjunta de los indicadores de regulación demuestra que la estabilidad y el amortiguamiento del régimen de caudales están gobernados de forma directa por el estado de conservación de las coberturas vegetales, superando la influencia de la extensión física de las unidades hidrográficas.

4.3.2 Indicadores de Suministro Hídrico

El análisis comparativo de los indicadores de suministro entre las microcuencas objeto de estudio (Tabla 5) revela un comportamiento hidrológico diferente. La microcuenca Carrizal posee unos parámetros morfométricos e hidrológicos significativamente mayores a los que presentan las microcuencas Golondrinas y Arnanía (Tabla 2); el comportamiento de los caudales extremos y los rendimientos hídricos indican que la respuesta del sistema está fuertemente gobernada por la interacción entre la morfología de la red de drenaje y el estado de conservación de sus coberturas vegetales.

Al evaluar el rendimiento hídrico específico estandarizado por área (q), Arnanía registra la mayor productividad del estudio con un caudal unitario de $24.06 \text{ [L/s/Km}^2\text{]}$, superando a Golondrinas $20.91 \text{ [L/s/Km}^2\text{]}$ y aventajando significativamente a Carrizal $14.88 \text{ [L/s/Km}^2\text{]}$. A pesar de esta alta generación de agua por unidad de superficie, la oferta no se traduce en seguridad

hídrica permanente. Su caudal mínimo diario colapsa drásticamente hasta alcanzar apenas 0.06 [m³/s] demostrando que su elevada oferta específica se concentra principalmente en eventos de caudales máximos controlados QMAX=6.41 [m³/s], y se agota aceleradamente.

La microcuenca Carrizal presenta el escenario de suministro más deficiente y vulnerable. A pesar de contar con una mayor extensión territorial, registra el rendimiento específico más bajo del análisis $q=4.88$ [L/s/Km²]. Su comportamiento está supeditado a descargas súbitas y extraordinarias de volumen, alcanzando el pico máximo absoluto más alto detectado en el estudio QMAX=11.29 [m³/s]. No obstante, este gran volumen es efímero, ya que durante las épocas secas la microcuenca disminuye drásticamente hasta registrar el caudal mínimo más crítico del sistema QMIN=0.05 [m³/s] comprometiendo la disponibilidad segura de agua firme.

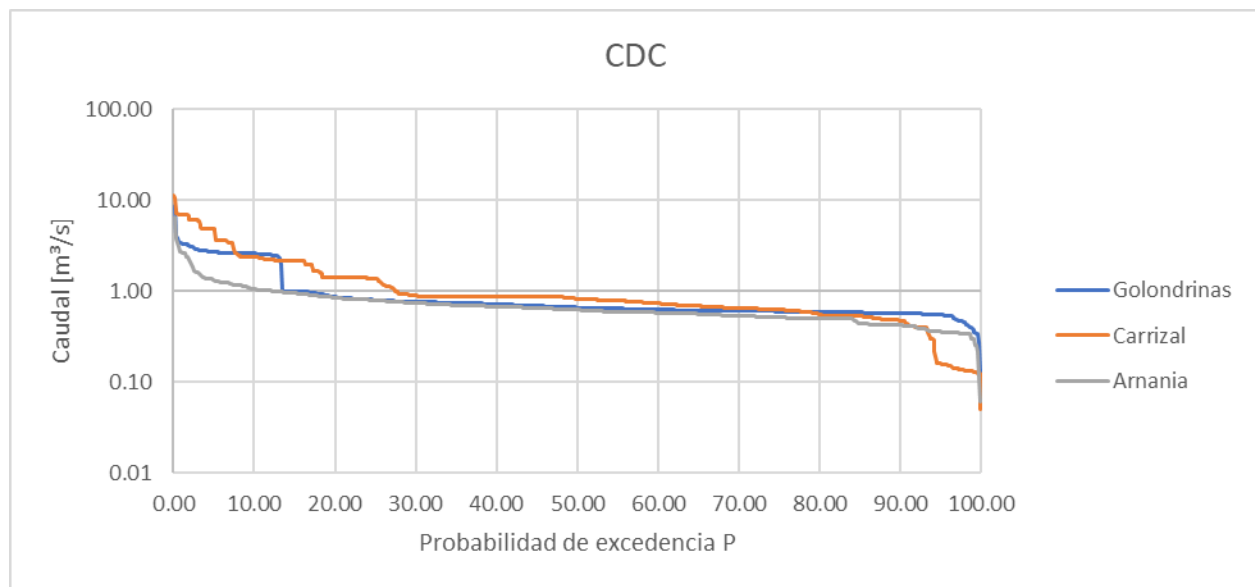
En contraposición a los dos sistemas anteriores, Golondrinas consolida la oferta de suministro más equilibrada, confiable y segura. Sostiene una alta productividad hídrica específica $q=20.91$ [L/s/Km²] y, al mismo tiempo, garantiza el caudal mínimo diario más elevado y robusto de la zona de estudio QMIN=0.13 [m³/s]. A su vez, su caudal máximo diario se mantiene moderado QMAX=8.78 [m³/s]. Estos valores integrados demuestran cuantitativamente que el suministro hídrico en Golondrinas no depende de picos torrenciales condicionados por la lluvia inmediata, sino que se beneficia de un flujo base persistente y protegido que asegura el abastecimiento aun en los meses de mayor sequía.

En síntesis, la evaluación conjunta de los indicadores de suministro demuestra que una alta productividad hídrica o una mayor extensión física territorial no son sinónimos de disponibilidad del recurso hídrico.

El contraste gráfico entre las Curvas de Duración de Caudal de las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arania permitió evaluar de manera conjunta y directa la firma hidrológica

de los sistemas, evidenciando cómo la morfología y la cobertura vegetal gobiernan la distribución del recurso en el tiempo.

Figura 6. Curva de Duración de Caudal (CDC) de las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arnania.



La Curva de Duración de Caudal de la microcuenca Golondrinas refleja un régimen hidrológico altamente regulado, estable y con alta capacidad de regulación hídrica, actuando como una "cuenca esponja" gracias a su excelente estado de conservación (Figura 5).

La microcuenca Carrizal (Figura 5), revela un comportamiento de respuesta marcadamente torrencial e inestable. En el tramo de caudales altos (0% a 10% de excedencia) se observa un descenso abrupto desde un caudal pico superior a los 10 [m³/s] hacia el rango de 3 [m³/s], evidenciando una alta escorrentía directa de rápido agotamiento ante eventos de precipitación intensa. En el tramo de persistencia extrema (superior al 93%), la curva sufre una caída pronunciada que la posiciona por debajo de los demás sistemas, lo que denota una limitada capacidad de regulación hídrica natural y un bajo sostenimiento del flujo base durante periodos secos. Esta marcada variabilidad hidrológica está asociada a un tiempo de concentración corto y a

la pérdida o degradación de la cobertura vegetal nativa, lo que reduce la retención superficial e impide la infiltración profunda requerida para recargar los acuíferos y mantener caudales ecológicos estables en épocas de estiaje.

La microcuenca Arnania, (Figura 5) revela un comportamiento de transición crítico. En el tramo de caudales altos (0% a 15% de excedencia) se observa una curva deprimida que denota un menor aporte instantáneo en eventos de avenida en comparación con los otros sistemas. En el tramo de persistencia extrema (superior al 93%), aunque logra sostenerse ligeramente por encima de Carrizal, su tendencia general describe una baja capacidad de regulación hídrica global, directamente asociada a que es la unidad con mayor transformación antrópica del estudio, donde el mosaico de cultivos y pastos abarca cerca del 75% del territorio y el bosque nativo apenas alcanza el 10%. La pérdida de estas coberturas boscosas limita la infiltración profunda, acelerando el agotamiento de sus reservas de flujo base.

En síntesis, aunque los valores numéricos y la extensión física de Carrizal y Arnania presentan dinámicas de oferta particulares, es Golondrinas la que muestra una verdadera capacidad de regulación hídrica.

5. Conclusiones

Las coberturas de suelo evidencian dinámicas diferenciadas en cada microcuenca. Golondrinas sobresale por su conservación, con un predominio de bosque denso equivalente al 39.08% de su superficie. En contraste, Carrizal exhibe un escenario de transición definido por la competencia directa entre pastos limpios (26.24%) y bosque denso (25.63%). Finalmente, Arnania registra la mayor alteración antrópica del área de estudio, caracterizada por la consolidación de sistemas agrícolas bajo la categoría de mosaico de cultivos, la cual abarca el 62.63% de su territorio.

El comportamiento hidrológico de las microcuencas está gobernado por la interacción entre el estímulo macroclimático bimodal andino y las características físicas del territorio. A nivel estructural, la baja densidad de drenaje (BDd) actúa como el principal factor de control geométrico al incrementar los tiempos de concentración, mitigar los caudales picos torrenciales y favorecer la infiltración para sostener los flujos base. No obstante, la transformación de la lluvia en escorrentía superficial está condicionada por la cobertura del suelo y la influencia antrópica, generando respuestas diferenciadas en el suministro y la regulación hídrica.

Los indicadores de regulación y suministro permitieron concluir que la disponibilidad y estabilidad del recurso hídrico dependen principalmente del estado de conservación de la cobertura vegetal y no del tamaño de las microcuencas. Golondrinas presentó el mejor comportamiento hidrológico, con la menor pendiente de vaciado ($R2FDC=0.31$), menor variabilidad del caudal ($QVAR=0.82$), flujo permanente ($DAYP0=0$), mayor caudal mínimo ($QMIN=0.13 \text{ m}^3/\text{s}$) y un rendimiento específico de 20.91 L/s/km^2 . En contraste, Carrizal registró la mayor variabilidad ($QVAR=1.08$) y el menor caudal mínimo ($QMIN=0.05 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que Arnania, con 75% de

cobertura agrícola, presentó la mayor productividad ($q=24.06 \text{ L/s/km}^2$), pero un vaciado más rápido ($R2FDC=0.43$) y un bajo caudal mínimo ($QMIN=0.06 \text{ m}^3/\text{s}$). En conjunto, estos resultados confirman que la conservación de la cobertura boscosa es el factor principal para garantizar una oferta hídrica estable y resiliente, especialmente durante los períodos de estiaje.

Referencias Bibliográficas

- amb. (2016). Memoria Técnica del Proyecto de Regulación del Río Tona. Bucaramanga.
- Arango-Carvajal, L. I., Villegas, J. C., León-Peláez, J. D., & Sánchez-Londoño, J. (2025). Not all trade-offs and synergies between ecosystem services are created equal: assessing their spatio-temporal variation in response to land cover change in the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*, 25(46).
- Buytaert, W., Celleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>.
- Carrillo Peña, L. M. (2018). Análisis de la sostenibilidad hídrica de la cuenca del río Tona y su relación con el crecimiento urbano del área metropolitana de Bucaramanga (Tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander.
- Casas Parra, J. A. (2014). Evaluación de la sostenibilidad ambiental en la cuenca alta del río Tona, Santander, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Castro Saavedra, A. D., & Vargas Tirado, J. D. (2026). Análisis del cambio de cobertura del suelo en la cuenca del río Tona en el periodo 2016-2025 (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Celis Vargas, A. D. (2022). Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura sobre los servicios de abastecimiento y regulación hídrica ofertados por unidades hidrográficas de páramo (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. (2019). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Alto Lebrija (POMCA). CDMB.

- Cepeda Arias, E., Cañon Barriga, J., & Salazar, J. F. (2022). Changes of streamflow regulation in an Andean watershed with shrinking glaciers: implications for water security. *Hydrological Sciences Journal*, 67(11), 1755-1770.
- Foggin, J. M. (2016). Conservation issues: Mountain ecosystems. In R. Frodeman (Ed.), *The Oxford Handbook of Interdisciplinarity* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D.C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM.
- Kohler, T., & Maselli, D. (Eds.). (2009). *Mountains and climate change: From understanding to action*. Geographica Bernensia.
- Llambí, L. D., Becerra, M. T., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M., et al. (2019). Monitoring Biodiversity and Ecosystem Services in Colombia's High Andean Ecosystems: Toward an Integrated Strategy. *Mountain Research and Development*, 39(3).
- Moreno-Pájaro, A. M., Osorio-Gastelbondo, A., Moreno-Egel, D. A., Coronado-Hernández, O. E., Narváez-Cuadro, M. A., Saba, M., & Arrieta-Pastrana, A. (2025). Hydrological Modelling and Remote Sensing for Assessing the Impact of Vegetation Cover Changes. *Hydrology*, 12(107).
- Quintero Cárdenas, J. A., & Rondón Chavarrió, A. F. (2023). Selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca abastecedora de los andes colombianos, caso de estudio: Cuenca del Río Tona.

- Ruiz, D., Moreno, H. A., Gutiérrez, M. E., & Zapata, P. A. (2008). Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment*, 398(1–3), 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.038>.
- Villamizar, M., Pineda, A., & Carrillo, L. M. (2019). Análisis de los efectos del cambio de uso del suelo sobre la producción hídrica en cuencas del departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander.
- Hernández Muñoz, D. A. (2025). *Evaluación del impacto de diferentes escenarios de uso y cobertura del suelo en la producción de sedimentos de la cuenca abastecedora del río Tona*. Universidad Industrial de Santander.

Apéndices

Apéndice A. Análisis cuantitativo de antecedentes hidrológicos en cuencas andinas

Con el objetivo de fundamentar conceptual y numéricamente el comportamiento hidrológico de las microcuencas de alta montaña ante las transiciones del territorio, se realizó una revisión sistemática de investigaciones desarrolladas en el contexto andino colombiano. Este análisis se centró en la respuesta de los caudales, la capacidad de regulación y la alteración de los flujos base frente a factores de cambio ambiental y antrópico.

A continuación, se presenta la síntesis cuantitativa y metodológica de los dos estudios de referencia utilizados en esta investigación:

Evaluación de la transición hidrológica y variabilidad extrema (Cepeda Arias et al., 2022).

El estudio evaluó la dinámica hidrológica de la Cuenca Alta del Río Nevado (Sierra Nevada del Cocuy, Colombia) en un periodo histórico comprendido entre 1956 y 2020.

Indicadores Geomorfológicos y de Cobertura: Los autores cuantificaron una reducción crítica en la cobertura de hielo, registrando una pérdida de área glaciar que pasó de 44.7 Km² en el año 1986 a tan solo 7.4 Km² en el año 2022.

Componentes del Balance Hídrico: Se estableció una precipitación media anual de 971 mm frente a una evaporación media anual de 711 mm. A través de modelos hidrológicos, se determinó que el aporte específico por derretimiento glaciar al flujo total de la cuenca promedió los 0.427 m³/s.

Métricas de Regulación de Caudal: Utilizando Curvas de Duración de Caudales Decadales (*Decadal Flow Duration Curves*) y una Métrica de Regulación de Caudales Extremos, la investigación demostró que la pérdida de masa glaciar eliminó el excedente histórico de flujo base

(*surplus of baseflow*). Matemáticamente, esto incrementó la no-estacionariedad en las leyes de escala de los caudales, provocando que a partir de la década del 2000 la cuenca manifestara una severa pérdida de su capacidad de amortiguamiento natural y una alta vulnerabilidad ante eventos de sequía y extracciones antrópicas.

Sensibilidad de los servicios de regulación ante cambios de cobertura (Celis Vargas, 2022)

La investigación analizó la respuesta hidrológica regional mediante el monitoreo de Unidades Sub-Hidrográficas (SHU) contrastantes bajo un régimen de precipitación estacional de 1089 mm/año.

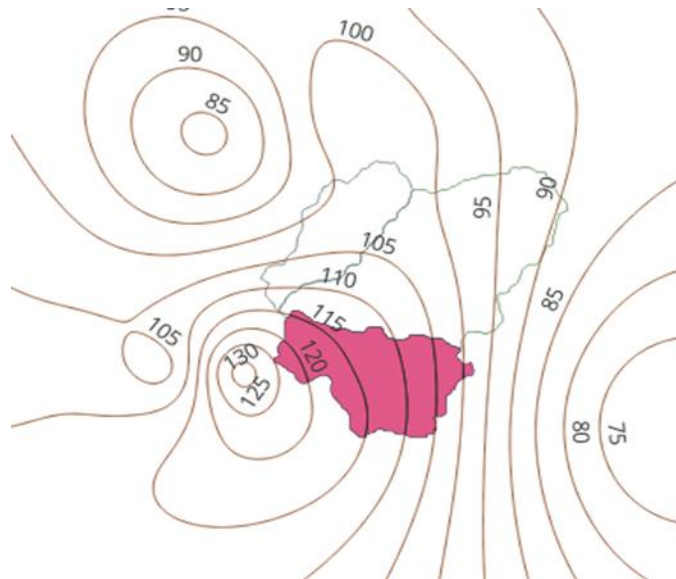
Escala y Umbrales de Intervención: El estudio comparó una microcuenca en estado natural (11 ha, con solo un 2% de pasturas) frente a una microcuenca intervenida por actividades agropecuarias (19 ha). Los resultados demostraron cuantitativamente que un cambio de apenas el 15% en la cobertura de vegetación nativa hacia usos antrópicos es suficiente para romper el umbral de estabilidad del ecosistema andino.

Alteración de Caudales Base y Picos: A través del análisis de Curvas de Duración de Caudales (CDC) a escala diaria, se calculó que la compactación del suelo y la pérdida de cobertura forestal redujeron significativamente los coeficientes de infiltración. Esto se tradujo de forma directa en una disminución drástica de los caudales mínimos de estiaje (Q95), limitando la oferta firme de agua y provocando una acentuación en los picos de caudal (incremento de la torrencialidad) ante eventos de lluvia.

Apéndice B. Método de ponderación de áreas por isoyetas

Para el análisis climatológico de las microcuencas objeto de estudio se emplearon las series de precipitación media mensual multianual de las estaciones meteorológicas suministradas por el amb. Posteriormente, esta información fue integrada con la delimitación espacial de las microcuencas mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), con el fin de generar la distribución espacial de la precipitación a través de isoyetas, como se aprecia a continuación (Figura B1).

Figura B1. Distribución espacial de la precipitación en el mes de marzo



Una vez obtenido el mapa de isoyetas, se aplicó el método de ponderación por áreas (método de las isoyetas), el cual consiste en calcular el aporte de cada franja delimitada por isoyetas de acuerdo con el porcentaje de área que ocupa dentro de cada microcuenca.

Este procedimiento permitió obtener la precipitación media mensual multianual representativa de cada microcuenca, considerando la variabilidad espacial de la lluvia y no únicamente los registros puntuales de las estaciones meteorológicas.

Precipitación media mensual multianual			
Meses	Carrizal	Arnanía	Golondrinas
Enero	32.550	36.194	32.641
Febrero	46.930	50.762	58.817
Marzo	100.888	103.898	112.100
Abril	148.224	145.640	157.621
Mayo	160.555	167.074	165.891
Junio	87.728	81.870	94.402
Julio	87.728	65.128	71.986
Agosto	97.180	95.364	106.976
Septiembre	117.718	113.491	123.573
Octubre	162.676	163.151	167.653
Noviembre	137.986	138.813	153.422
Diciembre	42.744	43.943	51.061

Los valores obtenidos constituyeron la base para el análisis de los indicadores hidrológicos SINDX y PVAR, los cuales permitieron evaluar el comportamiento del suministro y la variabilidad del recurso hídrico a lo largo del año en cada una de las microcuencas de estudio.

Apéndice C. Evidencia de vacíos en la información de las estaciones meteorológicas

Estación AMB	Fuente	Periodo de Análisis	Datos faltantes
Miraflores	amb	2004 - 2025	2009: Mayo, Junio y Julio 2010: Julio, Noviembre y Diciembre
Piedras Blancas	amb	2004 - 2025	2004: Enero, febrero y Marzo 2005: Marzo 2022-2025: Enero a Diciembre

Povedas	amb	2004 - 2025	2008: Enero 2015: Julio
El Pajal	amb	2004 - 2025	2014: Octubre 2016: Enero, Marzo a Diciembre 2017: Enero a Abril 2024: Enero
Huerta Grande	amb	2004 - 2025	2014: Octubre 2015: Febrero
La Granja	amb	2004 - 2025	2024: Julio a Diciembre 2025: Enero a Diciembre
Gualilo	amb	2004 - 2025	2004-2006: Enero a Diciembre 2007: Enero 2017: Octubre 2021: Septiembre 2023-2025: Enero a Diciembre
El Brasil	amb	2004 - 2025	2004: Agosto 2022: Agosto a Diciembre 2023: Enero a Diciembre 2024: Enero a Septiembre 2025: Enero a Diciembre

Apéndice D. Evidencia de la Estación Piedras Blancas con todos los datos completos

AÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2004	88.0	23.6	46.4	78.5	141.2	97.5	47.2	68.6	141.5	138.8	111.5	22.5
2005	47.4	15.9	0.0	29.3	137.5	177.9	88.6	76.6	102.1	194.1	127.5	8.7
2006	30.5	40.9	109.3	103.6	216.9	111.3	128.5	116.5	103.8	99.7	50.0	30.7
2007	22.2	10.0	97.6	82.3	122.2	109.1	77.8	201.1	154.2	124.1	58.9	8.4
2008	19.7	21.2	64.7	149.3	124.6	80.2	161.2	138.2	100.1	129.4	185.0	3.0

2009	14.2	65.3	146.0	56.2	79.7	59.0	120.3	27.6	34.4	95.3	46.1	13.0
2010	3.5	3.2	30.7	46.2	133.0	122.8	87.5	85.5	185.5	74.3	58.6	34.3
2011	10.0	46.2	127.0	260.5	163.3	129.7	179.8	166.8	129.3	104.4	135.4	24.0
2012	12.0	7.5	87.2	224.0	47.1	69.0	55.6	121.7	66.7	110.4	37.7	8.0
2013	0.0	24.6	4.8	89.9	54.5	54.9	72.4	96.0	34.2	24.1	15.4	10.5
2014	25.8	10.0	8.6	56.0	11.0	61.2	50.4	57.9	25.9	43.6	47.5	41.5
2015	5.0	78.0	56.0	130.0	81.0	65.0	58.0	96.0	148.0	139.0	37.7	36.0
2016	31.0	65.0	36.0	80.0	88.3	100.0	126.0	81.2	58.9	135.0	114.9	11.1
2017	16.8	3.0	82.0	77.0	47.9	132.0	96.5	83.9	119.6	68.0	67.4	37.3
2018	60.9	38.0	92.9	186.8	191.0	108.0	137.3	201.4	127.1	215.4	50.3	6.6
2019	44.4	9.0	85.0	230.2	263.0	142.0	129.7	59.5	79.0	154.6	79.0	53.3
2020	41.0	38.2	15.6	19.8	24.5	152.9	151.0	172.4	229.5	217.7	483.7	49.0
2021	32.0	57.9	58.0	114.0	204.0	125.2	132.2	91.0	152.4	164.0	86.0	143.4
2022	15.0	35.0	123.2	173.1	130.3	119.1	78.3	128.9	186.8	252.8	231.8	64.3
2023	73.3	49.9	185.1	146.2	135.3	126.6	83.1	85.1	123.0	181.8	129.6	13.2
2024	0.9	120.4	75.3	38.4	65.0	190.4	148.7	108.9	134.5	66.4	285.9	19.3
2025	9.3	104.1	105.5	27.0	252.2	81.4	33.6	92.8	128.5	212.5	28.6	64.5

Como se puede evidenciar en la matriz de datos del Apéndice D para la estación Piedras Blancas, el proceso de completación mediante el software SPELL-MAP y el método IDW se ejecutó de manera exitosa y satisfactoria.

Apéndice E. Procesamiento, organización y consolidación de datos para caudal

La información inicial fue entregada por el amb en archivos de formato de texto plano (.txt) bajo una codificación encriptada ilegible de forma directa. Para habilitar la lectura de los registros, se empleó un software ejecutable especializado (HST2TXT) provisto por la misma entidad. Este

programa procesó los caracteres especiales y estructuró las cabeceras principales correspondientes a los sensores de nivel, velocidad y caudal.

Figura E1.

```
| H # d ) V bu G z # ESTACION[0].NIVEL_RIO          ESTACION[0].VELOCIDAD_RIO
      ESTACION[0].CAUDAL_RIO          ESTACION[1].NIVEL_RIO          ESTACION[1].VELOCIDAD_RIO
      ESTACION[1].CAUDAL_RIO          ESTACION[2].NIVEL_RIO
      ESTACION[2].CAUDAL_RIO          ` ^ : @N @0b
Y @D ? =z } ? / $N @ 8/ j @
@ o 4Mh @D ?%>w ?D !TAE @ R @; O @ o 4Mh @& 5 ? =z } ?D !TAE @ w 7 C @; O @ ` @D ? =z } ?~ D 4 @ q
j @
@p? 1 @D ?%>w ?~ D 4 @ 84
} @ 3 z @ L 6a{ @& 5 ?N ? / $N @ B
```

Una vez decodificados los archivos en texto plano legible, los datos fueron importados a hojas de cálculo en Microsoft Excel. En este punto, las cadenas tabulares continuas fueron separadas formalmente en columnas estructuradas de Fecha, Hora y los respectivos atributos físicos de las estaciones de monitoreo automatizadas para las microcuencas Golondrinas (Estación 0), Carrizal (Estación 1) y Arnania (Estación 3).

Figura E2.

01/09/2023	00:01:00		2.285		4.139	38827.839	0.049
1.105	-30.525	0.000		0.000			
01/09/2023	00:02:00		2.172		3.904	36568.987	0.050
1.111	30.525	0.000		0.000			
01/09/2023	00:03:00		2.160		3.898	36324.786	0.050
1.105	-30.525	0.000		0.000			
01/09/2023	00:04:00		2.245		4.072	38125.763	0.052

Dado el volumen extremo de filas (series de tiempo minuto a minuto), se utilizó el complemento Tablas Dinámicas de Excel para automatizar la consolidación de los archivos mensuales y realizar la agregación temporal. Los registros de alta resolución de nivel (m), velocidad (m/s) y caudal (L/s) fueron promediados aritméticamente para consolidar una base de

datos limpia en escala diaria, óptima para el cálculo de los índices de regulación e indicadores hidrológicos estructurales de la investigación.

Figura E3.

FECHA	HORA	0_NIVEL_ RIO	0_VEL_ RIO	0_CAUDAL	1_NIVEL_ RIO	1_VEL_ RIO	1_CAUDA L	2_NIVEL_ RIO	2_VEL_ _RIO	2_CAUDAL
23/06/2023	8:46:00	2.212	3.993	37576.313	0.452	1.993	2625.153	0		0
23/06/2023	8:47:00	2.218	4.008	37698.413	0.452	1.99	2594.628	0		0
23/06/2023	8:48:00	2.216	4.005	37698.413	0.45	1.993	2594.628	0		0
23/06/2023	8:49:01	2.221	4.005	37637.363	0.452	1.993	2564.103	0		0

Apéndice F. Cuantificación y Tratamiento de Anomalías (Registros en Cero y Valores Negativos)

Durante el proceso de depuración y control de calidad de las series temporales consolidadas, se detectaron registros con valores atípicos e inconsistencias físicas que requerían

un tratamiento exhaustivo previo al análisis analítico. Estas anomalías se clasificaron y cuantificaron para cada microcuenca de la siguiente manera:

Se identificaron periodos con ausencia absoluta de flujo en las series. La microcuenca Golondrinas presentó un total de 46 registros en cero; la microcuenca Carrizal registró 15 datos bajo esta condición, mientras que la microcuenca Armania presento un total de 72 datos en cero. Estas lecturas representan fallas temporales en la transmisión de datos de las estaciones automatizadas, obstrucciones físicas en la sección o periodos de mantenimiento de los sensores instalados por el amb.

Cabe destacar que la serie de datos de la microcuenca Armania presentó un total de 482 datos faltantes. Esta ausencia de información no responde a fallas instrumentales o pérdida incidental de registros, sino a una condición estructural del monitoreo en la cuenca, debido a que la estación hidrométrica correspondiente entró en operación un tiempo después del inicio del periodo de registro establecido para el presente estudio.

Se detectaron errores sistemáticos de medición física donde el sistema registró caudales menores a cero. Esta anomalía afectó a la microcuenca Carrizal con 32 datos negativos (la microcuenca Golondrinas no registró valores negativos). Al ser físicamente imposibles en el régimen natural de estas corrientes superficiales, corresponden de forma inequívoca a descalibraciones en los sensores de nivel/velocidad o interferencias por procesos de sedimentación en la sección de aforo.

Con el fin de no sesgar los cálculos de los indicadores hidrológicos, estos registros anómalos fueron aislados y excluidos del procesamiento estadístico diario para evitar subestimaciones o distorsiones en la capacidad de regulación hídrica real de las cuencas.

Tabla F1.

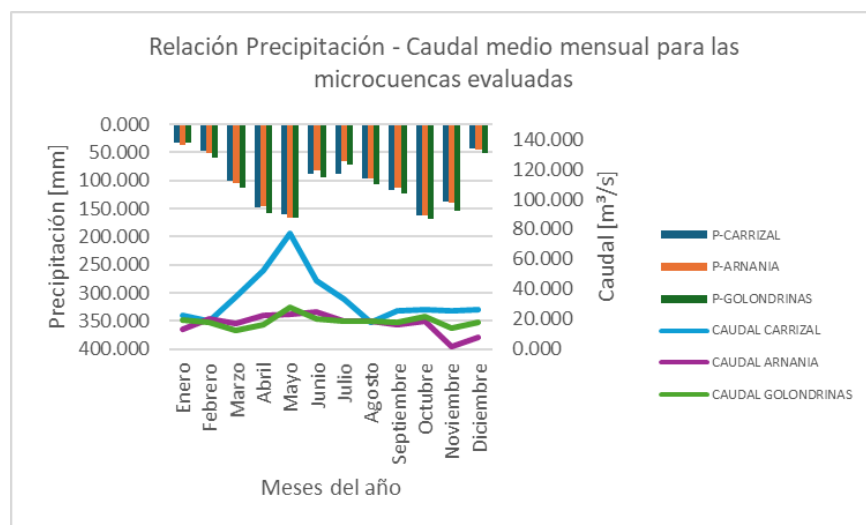
GOLONDRINAS		CARRIZAL				ARNANIA	
CAUDALES CON DATOS EN CERO		CAUDALES CON DATOS EN CERO		CAUDALES CON DATOS NEGATIVOS		CAUDALES CON DATOS EN CERO	
26/06/2023	0	26/06/2023	0.00	1/09/2023	-8.52	23/06/2023	0.00
8/09/2023	0	8/09/2023	0.00	2/09/2023	-17.76	24/06/2023	0.00
19/09/2023	0	19/09/2023	0.00	3/09/2023	-23.06	25/06/2023	0.00
24/11/2024	0	15/12/2023	0.00	4/09/2023	-16.67	26/06/2023	0.00
3/02/2025	0	16/12/2023	0.00	5/09/2023	-15.01	27/06/2023	0.00
30/03/2025	0	17/12/2023	0.00	6/09/2023	-20.11	29/06/2023	0.00
31/03/2025	0	18/12/2023	0.00	7/09/2023	-29.38	30/06/2023	0.00
1/04/2025	0	19/12/2023	0.00	9/09/2023	-6.68	1/07/2023	0.00
2/04/2025	0	20/12/2023	0.00	10/09/2023	-25.16	2/07/2023	0.00
3/04/2025	0	21/12/2023	0.00	11/09/2023	-18.32	3/07/2023	0.00
4/04/2025	0	22/12/2023	0.00	12/09/2023	-16.41	4/07/2023	0.00
5/04/2025	0	23/12/2023	0.00	13/09/2023	-30.53	5/07/2023	0.00
6/04/2025	0	24/12/2023	0.00	14/09/2023	-30.53	6/07/2023	0.00
7/04/2025	0	25/12/2023	0.00	15/09/2023	-30.53	7/07/2023	0.00
8/04/2025	0	24/11/2024	0.00	16/09/2023	-30.53	8/07/2023	0.00

Apéndice G. Análisis de consistencia hidrometeorológica e impacto en la estimación de indicadores

Al contrastar la precipitación media mensual y la esorrentía en las microcuencas Golondrinas, Carrizal y Arnania (Figura G1), se identificó un comportamiento divergente entre la oferta hídrica atmosférica (hietograma) y la respuesta del caudal (hidrograma).

Figura G1.

Relación Precipitación–Caudal medio mensual multianual para las microcuencas Arnania, Carrizal y Golondrinas.



Contexto e Inconsistencias en los Datos Primarios

En un ciclo hidrológico típico, los caudales tienden a reflejar la estacionalidad de las lluvias con un desfase moderado. Sin embargo, en el registro suministrado se observan las siguientes anomalías:

Incoherencia de magnitudes (Carrizal): Pese a que Mayo y Octubre presentan precipitación similar (160 mm a 170 mm), el caudal en Carrizal genera un pico atípico en Mayo (>80 m³/s), mientras que en Octubre no supera los 25 m³/s.

Baja reactividad (Armania y Golondrinas): Presentan una respuesta de caudal plana (20 m³/s) que no reacciona a los incrementos pluviométricos de la época de lluvias.

Relación y Distorsión en los Indicadores Calculados (Tabla 5)

Esta falta de coherencia en la información primaria de entrada traslada una alta incertidumbre a los indicadores de regulación y suministro hídrico evaluados:

Contradicción entre Variabilidad de Precipitación y Caudal (QVAR vs PVAR): Mientras que la precipitación se clasifica como Estable Alto con coeficientes moderados (PVAR=0.42-0.44), la variabilidad de caudal (QVAR) escala a niveles de Alta Variabilidad en Golondrinas (0.82) y Muy Variable / Torrencial en Carrizal (1.08). Un QVAR>1.0 resulta contradictorio frente a un régimen pluviométrico estable, sugiriendo que la fluctuación diaria del caudal está sobreestimada por errores o ruidos en las lecturas de aforo.

Sesgos en la Respuesta de Flujo Máximo (QMAX) y Mínimo (QMIN): Los caudales máximos ubican a las tres microcuencas en una Capacidad de respuesta significativamente alta (QMAX>6.0 m³/s) impulsados por picos puntuales aislados como el registrado en mayo para Carrizal (11.29 m³/s).

Por el contrario, los valores mínimos caen drásticamente (QMIN=0.05-0.13 m³/s), clasificando a la zona con Baja Capacidad de Regulación Hídrica (0.15 m³/s). Esta brecha extrema entre el régimen de máximos y mínimos no coincide con el comportamiento estacional moderado del índice de precipitación (SINDEX 0.36-0.38).

Sensibilidad de las Curvas de Duración de Caudal (R2FDC): La pendiente del tercio medio de la curva de duración de caudales (R2FDC) arroja valores entre 0.31 y 0.43 (Escarpada-Fuertemente Ondulada). Esto indica teóricamente cuencas con muy baja retención y rápida evacuación del agua; no obstante, esta respuesta torrencial es magnificada por las inconsistencias de los picos de caudal registrados respecto al volumen real de lluvia.

Si bien los indicadores de precipitación (SINDX, PVAR y q) muestran valores metodológicamente coherentes con el entorno, los indicadores que dependen directamente de las lecturas de caudal (QVAR, QMAX, R2FDC) están sesgados por la calidad de las series temporales de aforo. En consecuencia, los resultados cuantitativos de la Tabla 5 deben interpretarse como estimaciones bajo condición de alta incertidumbre, recomendándose la validación o recalibración de las estaciones de aforo para estudios futuros.