Gestión Hídrica En La Cuenca Alta Del Rio Chicamocha Ante Cambio Climático En Tunja, Boyacá

Danna Alejandra Suárez García

Universidad Santo Tomás

Facultad De Ciencia Y Tecnología

Maestría En Gestión De Cuencas Hidrográficas

Gestión Hídrica En La Cuenca Alta Del Rio Chicamocha Ante Cambio Climático En Tunja, Boyacá

Danna Alejandra Suárez García

Trabajo de grado presentado para optar al título de

Magíster en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Director

David Orjuela Yepes

Magister En Gestión Ambiental Sostenible Y Ciencias Ambientales

Universidad Santo Tomás

Facultad De Ciencia Y Tecnología

Maestría En Gestión De Cuencas Hidrográficas

07 De Noviembre De 2025

Tabla de contenido

1 Planteamiento del problema 9

2 Pregunta de investigación 11

3 Objetivos 12

3.1 Objetivo general 12

3.2 Objetivos específicos 12

4 Justificación. 13

5 Marco referencial 15

5.1 Marco conceptual 15

5.2 Marco legal. 17

5.3 Marco contextual. 21

5.4 Estado del arte. 24

5.5 Marco teórico. 42

6 Alcance 49

7 Metodología 50

7.1 Enfoque de la Investigación 50

7.2 Fase 1: Caracterización del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha (Tunja) 51

7.2.1 Variables 51

7.2.2 Caracterización geomorfológica. 52

7.2.3 Caracterización de la red de drenaje 52

7.2.4 Características hidrológicas y climáticas 53

7.2.5 Test de homogeneidad. 55

7.2.6 Indicadores de amenaza hídrica (Índice de Anomalía Pluviométrica – RAI). 56

7.2.7 Evaluación cualitativa del riesgo hídrico. 58

7.3 Fase 2: Modelación, evaluación de escenarios climáticos históricos y desarrollo de escenarios prospectivos. 60

7.3.1 Desarrollo de escenarios prospectivos. 60

7.4 Fase 3: Formulación de estrategias de gestión integrada y adaptativa del agua en Tunja 62

7.5 Técnicas e instrumentos 62

7.6 Técnicas 63

7.6.1 Revisión documental y análisis de contenido. 63

7.6.2 Análisis geoespacial. 63

7.6.3 Modelación hidrológica (QSWAT). 63

7.6.4 Análisis comparativo de escenarios climáticos históricos. 64

7.7 Instrumentos 64

7.7.1 Software QGIS 64

7.7.2 Extensión QSWAT (para QGIS). 64

7.7.3 Bases de datos. 64

8 Flujograma metodológico..... 66

9 Resultados..... 67

9.1 Caracterización del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha (Tunja) 67

9.1.1 Cobertura del suelo. 67

9.1.2 Tipo de suelo. 69

9.2 Caracterización geomorfológica.....71

9.2.1 Índice de alargamiento (La).....73

9.2.2 Pendiente media.....73

9.3 Caracterización de la red de drenaje 75

9.4 Orden de las corrientes de agua en la cuenca Chicamocha zona Tunja.....75

9.5 Características hidrológicas y climáticas 76

9.5.1 Análisis estadístico de la representatividad y tendencia climática. 76

9.5.2 Test de homogeneidad.....78

9.5.3 Precipitación. 81

9.5.4 Temperatura. 82

9.5.5 Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI). 83

9.5.6 Matriz de riesgo hídrico cualitativa. 85

9.6 Modelación hidrológica y escenarios climáticos.....87

9.6.1 Humedad relativa.....87

9.6.2 Escorrentía.....89

9.6.3 Infiltración. 90

9.6.4 Sedimentos de ingreso. 92

9.6.5 Sedimentos de salida. 93

9.6.6 Áreas de riesgo por inundación de amenazas. 94

9.6.7 Desarrollo de escenarios climáticos prospectivos. 96

9.7 Discusión crítica de resultados. 101

10 Formulación de estrategias de gestión integrada y adaptativa del agua en Tunja. 105

11 Conclusiones. 110

12 Referencias. 112

Lista de tablas

Tabla 1..... 17

Tabla 2..... 45

Tabla 3..... 46

Tabla 4..... 47

Tabla 5..... 57

Tabla 6..... 77

Tabla 7..... 84

Tabla 8..... 96

Tabla 9..... 99

Tabla 10..... 106

Lista de figuras

Figura 1 68

Figura 2 69

Figura 3 74

Figura 4 75

Figura 5 79

Figura 6 79

Figura 7 81

Figura 8 82

Figura 9 85

Figura 10 86

Figura 11 88

Figura 12 89

Figura 13 90

Figura 14 92

Figura 15 93

Figura 16 95

Figura 17 97

Figura 18 100

1 Planteamiento del problema

La cuenca alta del río Chicamocha, en la ciudad de Tunja, es una región de alta relevancia ecológica, social y económica, siendo fuente esencial de abastecimiento hídrico para consumo humano, agricultura e industria. Sin embargo, enfrenta una creciente presión sobre sus recursos hídricos, intensificada por los efectos del cambio climático. La variabilidad en los comportamientos climáticos relacionados con la lluvia y la temperatura están afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua, lo que compromete la relación balanceada entre la oferta y la demanda en un territorio clave para la seguridad alimentaria del país.

Estudios hidrometeorológicos muestran que en las últimas décadas la cuenca alta ha experimentado un aumento de la precipitación promedio entre un 5% y un 20% respecto a los registros históricos de 1980 a 1990, lo cual ha generado impactos en la escorrentía y en los procesos de recarga hídrica (Garavito & Caro, 2018). Además, investigaciones realizadas entre 1985 y 2017 han identificado una variabilidad significativa en el caudal del río, con tendencias de disminución en temporadas secas, exacerbadas durante episodios del fenómeno de el niño (María & Otálvaro, 2020).

La alta demanda agrícola y urbana, sumada a esta variabilidad climática, incrementa el riesgo de escasez hídrica. Según un estudio de evaluación de vulnerabilidad hídrica, aproximadamente el 58% de los municipios ubicados en la cuenca alta presentan condiciones de alta fragilidad frente a eventos extremos, proyectando un mayor déficit hídrico para el periodo 2041–2070 (Rincón & Gutiérrez, 2021).

Adicionalmente, la calidad del recurso hídrico se ve comprometida por el vertimiento de aguas residuales sin tratamiento adecuado desde centros urbanos como Tunja, Paipa y Sogamoso. El río Chicamocha ha sido catalogado como el segundo más contaminado de Colombia, después del río Bogotá (W Radio, 2019). Esta contaminación afecta no solo la calidad ambiental del ecosistema acuático, sino que también genera riesgos en salud pública, incluyendo enfermedades gastrointestinales, intoxicaciones por metales pesados y problemas respiratorios en las comunidades ribereñas (Manrique-Abril et al., 2007).

Pese a estos desafíos, la planificación y gestión del recurso hídrico en la cuenca carece de una visión integrada y adaptativa que permita anticipar el impacto del cambio climático y orientar decisiones informadas. A pesar de que se han invertido más de $100.000 millones en obras como plantas de tratamiento y recuperación del río (W Radio, 2019), persisten brechas en gobernanza y en la aplicación de enfoques técnicos y participativos para el manejo del agua.

En este contexto, es fundamental caracterizar la situación presente de la calidad del agua; implementar herramientas de modelación hidrológica y climática que permitan simular escenarios; y evaluar los posibles riesgos asociados para diseñar estrategias de gestión hídrica sostenibles y resilientes que fortalezcan la gobernanza y aseguren la disponibilidad del recurso para generaciones presentes y futuras.

2 Pregunta de investigación

¿Qué líneas de acción pueden proponerse para una gestión integrada y adaptativa del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha, en Tunja, a partir del análisis de los impactos potenciales del cambio climático sobre el sistema hídrico, mediante el uso de escenarios climáticos y modelación hidrológica?

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Proponer líneas de acción para la gestión integrada y adaptativa del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha, en la ciudad de Tunja, a partir del análisis de los posibles impactos del cambio climático sobre el sistema hídrico, mediante el uso de escenarios climáticos y herramientas de modelación hidrológica.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones hidrológicas y climatológicas actuales de la cuenca alta del río Chicamocha, en la ciudad de Tunja, a partir de la información proveniente de estaciones meteorológicas.
- Realizar la modelación hidrológica y climática del sistema hídrico de la cuenca alta del río Chicamocha bajo diferentes escenarios de cambio climático, con el fin de simular su comportamiento, evaluar los impactos potenciales sobre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.
- Formular estrategias de gestión integrada y adaptativa del recurso hídrico, basadas en los resultados de la modelación y evaluación de escenarios, que contribuyan a la sostenibilidad hídrica y a la resiliencia del territorio frente al cambio climático.

4 Justificación.

La cuenca alta del río Chicamocha es una región estratégica para el abastecimiento de agua en el departamento de Boyacá y zonas aledañas, cumple un rol esencial en la sostenibilidad ambiental, el desarrollo agropecuario y el bienestar de las comunidades locales. Sin embargo, enfrenta crecientes presiones derivadas del cambio climático, el uso intensivo del recurso hídrico y las problemáticas causadas por la contaminación, que vulneran su equilibrio hidrológico. Frente a este escenario, resulta importante generar conocimiento técnico y científico que permita comprender la magnitud de estos impactos y apoyar la formulación de decisiones dirigidas a la conservación y uso eficiente del recurso.

Estudios recientes han evidenciado señales de cambio climático en la cuenca alta del río Chicamocha, como variaciones significativas en las tendencias de precipitación, temperatura y caudal entre 1985 y 2017, asociadas a fenómenos macroclimáticos como el niño y la niña. Además, se ha calculado que aproximadamente el 58% de los municipios de la cuenca presentarán vulnerabilidad hídrica para el periodo 2041-2070, la mayoría ubicados en la cuenca alta, lo que indica un sistema hídrico frágil ante amenazas climáticas (Rincón & Gutiérrez, 2021).

La calidad del recurso hídrico también se ve comprometida por la descarga de aguas residuales sin tratamiento adecuado desde centros urbanos como Tunja, Paipa y Sogamoso, lo que ha llevado a que el río Chicamocha sea catalogado como uno de los más contaminados del país. Esto repercute en la salud pública, el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y la equidad en el acceso al agua.

Pese a estos desafíos, la planificación y gestión del recurso hídrico en la cuenca carece de una visión integrada y adaptativa que permita anticipar los efectos del cambio climático y orientar decisiones informadas. En este contexto, es fundamental caracterizar las condiciones actuales; implementar herramientas de modelación hidrológica y climáticas para evaluar los riesgos asociados y así diseñar estrategias de gestión hídrica sostenibles y resilientes que fortalezcan la gobernanza y aseguren la disponibilidad del recurso para generaciones presentes y futuras.

Además, los resultados esperados contribuirán al fortalecimiento de la gobernanza del recurso hídrico, mediante la propuesta de acciones concretas basadas en evidencia, que integren a los actores institucionales, comunitarios y productivos. Esto adquiere gran relevancia en el marco de un contexto donde la vulnerabilidad hídrica amenaza el abastecimiento para consumo humano, la producción agrícola y la integridad de los ecosistemas acuáticos.

5 Marco referencial

El marco referencial constituye la base conceptual, normativa y contextual que sustenta el desarrollo de esta investigación y orienta el análisis de la gestión integrada y adaptativa del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha frente a escenarios de cambio climático. Este capítulo reúne los elementos fundamentales que permiten comprender las dinámicas hidrológicas, climáticas, ambientales y socioeconómicas del territorio, así como los enfoques teóricos, las categorías analíticas y los antecedentes investigativos que respaldan la formulación de las líneas de acción propuestas.

5.1 Marco conceptual

El marco conceptual presenta las definiciones operativas de los términos y categorías analíticas clave utilizados en la investigación, con el fin de garantizar claridad interpretativa y coherencia metodológica.

- Cambio climático.

El cambio climático se refiere a las alteraciones a largo plazo en las condiciones promedio del clima terrestre, tales como temperaturas, patrones de precipitación, y eventos climáticos extremos, causadas tanto por procesos naturales como por actividades humanas, especialmente la emisión de gases de efecto invernadero (Masson-Delmotte et al., 2020).

- Recursos hídricos.

Los recursos hídricos comprenden todas las fuentes de agua disponibles para diversos usos, incluyendo agua superficial y subterránea. Su gestión sostenible es esencial para garantizar

el abastecimiento y la calidad del agua frente a desafíos como el cambio climático y el crecimiento poblacional(Cuadrat, 2006).

- Oferta hídrica.

La oferta hídrica se refiere a la cantidad de agua disponible en una región para satisfacer las necesidades de la población, la agricultura, la industria y los ecosistemas. Esta disponibilidad está influenciada por factores climáticos, geográficos y de uso del suelo (UNESCO, 2021).

- Demanda hídrica.

La demanda hídrica es el volumen de agua requerido para satisfacer las necesidades de diferentes sectores, como el doméstico, agrícola, industrial y ambiental. Esta demanda puede variar según factores económicos, demográficos y climáticos (Allan, 2003).

- Calidad del agua.

La calidad del agua se refiere a las características físicas, químicas y biológicas del agua que determinan su idoneidad para diferentes usos, como el consumo humano, la agricultura, la industria y la preservación de ecosistemas acuáticos (IDEAM, n.d.).

- Modelación hidrológica y climática.

La modelación hidrológica y climática implica el uso de herramientas computacionales para simular el comportamiento del ciclo hidrológico y prever el impacto de diferentes escenarios climáticos en los recursos hídricos (Yates & Purkey, 2005).

- Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH).

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) es un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinado del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Global Water Partnership, 2022).

5.2 Marco legal.

El marco legal que se presenta a continuación integra las disposiciones normativas que regulan la gestión del recurso hídrico, la adaptación al cambio climático, la ordenación de cuencas y la planificación ambiental en Colombia. La tabla 1 sintetiza las principales leyes, decretos y políticas que estructuran los principios, competencias institucionales, instrumentos de planificación (como los POMCA), criterios para la gestión del riesgo climático, lineamientos para el uso eficiente del agua y directrices para la incorporación del cambio climático en la toma de decisiones territoriales y sectoriales.

Tabla 1

Normas que regulan la gestión de Recursos Hídricos.

Norma	Año	Objetivo principal	Artículos / Nombre
Constitución Política de Colombia	1991	Derecho ambiental y protección del agua.	Art. 79: Derecho a ambiente sano. Art. 80: Planificación y control ambiental. (Función pública, 1991)

Ley 99 – Crea el SINA	1993	Organización ambiental; competencias para manejo de cuencas.	Art. 1: Principios ambientales. Art. 2: Objetivos ambientales. Art. 31: Funciones de las CAR. (Congreso de Colombia, 1993)
Ley 142 – Régimen de Servicios Públicos	1994	Regula agua potable y saneamiento básico.	Art. 14: Obligatoriedad de garantizar disponibilidad de agua. Art. 9–10: Regulación del recurso. (Congreso de Colombia, 1994)
Ley 388 – Ordenamiento Territorial	1997	Incorpora criterios ambientales en POT.	Art. 10: Funciones del ordenamiento territorial. Art. 12: Regulación del uso del suelo y recursos ambientales. (Función pública, 1997)
Ley 373 – PUEAA	1997	Uso eficiente y ahorro del agua.	Art. 1: Creación del PUEAA. Art. 2: Principios de eficiencia en uso del agua. (Congreso de Colombia, 1997)
Ley 611 – Recuperación y conservación de áreas estratégicas	2000	Protección de ecosistemas que regulan el agua.	Art. 3: Recuperación de zonas de recarga hídrica. (Función pública, 2000)

Ley 1523 – Gestión del Riesgo de Desastres	2012	Gestión del riesgo climático e hidrometeorológico.	Art. 4: Conocimiento del riesgo. Art. 42: Riesgo en planificación territorial. (Función pública, 1523)
Ley 1753 – PND 2014–2018	2015	Introduce instrumentos de adaptación climática.	Art. 179–181: Gestión ambiental y cambio climático. (Función pública, 2015b)
Ley 1931 – Cambio Climático	2018	Directrices obligatorias de adaptación y mitigación.	Art. 2: Objeto. Art. 4: Principios. Art. 6: Componentes. Art. 7: SISCLIMA. Art. 9–10: Planes de adaptación territorial/sectorial. Art. 13: Información climática oficial. (Función pública, 2018)
Ley 1955 – PND 2018–2022	2019	Incorpora adaptación climática como política obligatoria.	Art. 4: Sostenibilidad. Art. 155: Gestión del recurso hídrico. (Función pública, 2019)
Ley 2169 – Política Nacional de Cambio Climático	2021	Establece la política climática de Estado.	Art. 3: Principios. Art. 8: Adaptación climática. Art. 12: Gestión del agua y ecosistemas. (Función pública, 2021)

Decreto 1729 – Ordenación de Cuencas	2002	Establece la cuenca como unidad de planificación hídrica.	Art. 2: Objeto. Art. 13: Ordenación por cuencas. (Función pública, 2002)
Decreto 3930 – Vertimientos y Reuso del Agua	2010	Regula calidad del agua y vertimientos.	Art. 9: Normas de vertimiento. Art. 12: Criterios de calidad. (Función pública, 2010)
Decreto 1640 – POMCA	2012	Ordenación, manejo y gestión del recurso hídrico por cuencas.	Art. 2, 3, 4, 6, 14, 18, 27, 37 (todos con nombre). (Función pública, 2012)
Decreto 1076 – Decreto Único Ambiental	2015	Compila normas ambientales: agua, calidad, concesiones.	Título 3: Recurso hídrico. Título 4: Calidad del agua. Título 9: Ordenación hídrica. (Función pública, 2015a)
Decreto 298 – SISCLIMA	2016	Regula el Sistema Nacional de Cambio Climático.	Art. 2–6: Estructura. Art. 10: Nodos regionales. (Función pública, 2016)
PNACC – Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático	2016	Estrategias sectoriales de adaptación.	Ejes 1, 2, 3, 4 (PNACC, 2016)
PNGIRH – Política Nacional de Gestión	2010	Directrices técnicas y estratégicas de gestión del agua.	Líneas 1, 2, 3 (ANA & MINAGRI, 2015)

Integrada del Recurso Hídrico

Nota: Tabla realizada por el autor.

El conjunto normativo analizado establece las condiciones institucionales, técnicas y operativas necesarias para abordar los objetivos de esta investigación, orientados a caracterizar la disponibilidad hídrica actual, evaluar los impactos del cambio climático y proponer líneas de acción para la gestión integrada del agua en la cuenca alta del río Chicamocha. Las leyes y decretos revisados definen los principios rectores para el uso eficiente, la protección y la planificación del recurso hídrico. Asimismo, la normatividad relacionada con la adaptación al cambio climático —especialmente la Ley 1931 de 2018, el PNACC y el SISCLIMA— proporciona el fundamento para la incorporación de escenarios climáticos y el análisis de vulnerabilidad hidrológica. De igual manera, los instrumentos de ordenación y manejo de cuencas establecidos en el Decreto 1640 de 2012 y la Política Nacional para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico respaldan la formulación de medidas de conservación, regulación, monitoreo y gestión del riesgo, elementos esenciales para el diseño de las líneas de acción planteadas.

5.3 Marco contextual.

El marco contextual describe las características biofísicas, ambientales, climáticas, hidrológicas y socioeconómicas de la cuenca alta del río Chicamocha, con el propósito de situar espacial y territorialmente el análisis. Este apartado examina elementos como ubicación geográfica, clima, condiciones ambientales, oferta hídrica, problemáticas ambientales y dinámicas antrópicas que influyen en la gestión del recurso hídrico.

- Contexto geográfico y físico de Tunja.

Tunja se encuentra ubicada en la región del Altiplano Cundiboyacense, sobre la Cordillera Oriental de los Andes, en el centro del país. La ciudad está situada en el valle del Alto Chicamocha, a una altitud promedio de 2.720 metros sobre el nivel del mar, lo que la convierte en la capital más alta de Colombia y una de las quince ciudades más altas del mundo. La topografía urbana de Tunja presenta tres zonas orográficas: la planicie a 2.650 m s. n. m., la meseta hacia el centro y sur de la ciudad a 2.770 m s. n. m., donde se encuentra el centro histórico, y las colinas que alcanzan los 2.900 m s. n. m. en los barrios de la zona occidental. En la zona rural, la altitud varía entre 2.400 y 3.250 m s. n. m., en límites con los municipios de Cucaita y Samacá.(topographic-map, n.d.)(wikipedia, n.d.)

El municipio de Tunja tiene una extensión territorial de 121,4 km², de los cuales el 87% corresponde al área rural y el 13% al área urbana. Está ubicado en las coordenadas 5°32′7″N 73°22′04″O (Marite, 2013).

En cuanto a su hidrografía, el principal recurso hídrico de la ciudad es la Represa de Teatinos, que abastece en su totalidad el área urbana. Además, tres ríos y numerosas cascadas atraviesan su territorio: el río Jordán, que nace en la zona rural del sur y hace parte de la cuenca alta del río Chicamocha, atraviesa la ciudad de sur a norte y desemboca en el embalse La Playa del municipio de Tuta; el río La Vega, que va de occidente a oriente; y otros cuerpos de agua menores (Marite, 2013).

- Características socioeconómicas de Tunja.

Tunja es una ciudad con una población aproximada de 200.000 habitantes, donde coexisten dinámicas urbanas y rurales. La economía local se basa en sectores como la educación,

el comercio, la agricultura y la ganadería. En las zonas rurales, la actividad agropecuaria es predominante, con cultivos de papa, cebolla y otros productos, así como la cría de ganado. Sin embargo, la expansión urbana y las prácticas agrícolas intensivas han generado presiones sobre los recursos hídricos y el medio ambiente (GoConar, n.d.).

- Presiones ambientales y conflictos sobre el agua.

Tunja representa una de las fuentes principales de contaminación del río Chicamocha, aportando aproximadamente el 38,7% de las descargas contaminantes en la cuenca alta. Las fuentes de contaminación incluyen vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento adecuado, así como escorrentías agrícolas que arrastran fertilizantes y pesticidas hacia los cuerpos de agua. Esta situación ha deteriorado la calidad del agua, afectando su uso para consumo humano, riego y otras actividades (Marite, 2013).

Además, la contaminación del agua ha tenido impactos en la salud pública. En 2006, se registraron en Tunja 739 casos de enfermedades digestivas asociadas al consumo de agua contaminada, representando el 5,14% de las consultas médicas (Marite, 2013).

- Actores sociales e institucionales relevantes.

La gestión del recurso hídrico en Tunja involucra a diversas entidades y actores sociales. La Alcaldía de Tunja y la Empresa de Servicios Públicos de Tunja (ESP Tunja) son responsables de la prestación de servicios de agua potable y saneamiento básico. Corpoboyacá, como autoridad ambiental regional, lidera iniciativas de planificación y control ambiental en la cuenca. Además, organizaciones comunitarias y universidades locales participan en proyectos de educación ambiental y monitoreo de la calidad del agua (Marite, 2013).

5.4 Estado del arte.

El estado del arte reúne y analiza investigaciones previas relacionadas con la hidrología, la gestión del recurso hídrico, el cambio climático y la modelación de cuencas, tanto a escala local como regional e internacional. Este apartado permite identificar tendencias metodológicas, avances científicos, brechas de conocimiento y experiencias relevantes que contextualizan el desarrollo de la presente investigación.

- El cambio climático y la tierra.

En este informe analizan la relación entre el cambio climático y el uso de la tierra, evidenciando que el 23% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero entre 2007 y 2016 provienen de la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU). Señala que el aumento promedio de la temperatura terrestre (1,53 °C desde la era preindustrial) ha intensificado fenómenos como sequías, pérdida de fertilidad del suelo y escasez de agua, afectando directamente la seguridad alimentaria y la disponibilidad de recursos hídricos, especialmente en regiones vulnerables como América Latina (Delmotte et al., 2020).

- El agua en el siglo XXI.

Compila ponencias del seminario “La crisis del agua” y examina los desafíos contemporáneos en la gestión del agua, especialmente en países mediterráneos como España. Los autores destacan que solo el 0,3% del agua del planeta es dulce y superficial, lo que convierte al agua accesible en un recurso limitado desde el punto de vista económico y ambiental. Se enfatiza que el crecimiento urbano, el aumento del regadío y el turismo masivo han disparado la demanda hídrica más allá de lo que los sistemas naturales pueden sostener (Cuadrat, 2006).

- Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021.

Este informe enfatiza que más de 2 mil millones de personas viven en zonas con estrés hídrico, y que para el año 2030 se espera un déficit global del 40% en la disponibilidad de agua, exacerbado por el cambio climático, la urbanización y el uso ineficiente del recurso. Además, plantea que el valor del agua no puede reducirse únicamente a su precio, ya que incluye dimensiones ecológicas, culturales, sociales y económicas que deben integrarse en los procesos de toma de decisiones; propone cinco enfoques clave para valorar el agua: fuentes naturales, infraestructura hídrica, servicios básicos (WASH), uso productivo (agricultura, industria y energía), y valores socioculturales. Además, destaca la importancia de una gobernanza participativa e inclusiva para abordar estos múltiples valores, especialmente en regiones con estrés hídrico como América Latina (UNESCO, 2021).

- La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos es más un Desafío Político que Técnico.

Durante las últimas décadas del siglo XX, surgió el enfoque de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) como una respuesta a los problemas generados por políticas anteriores que no consideraban los conflictos entre usos sectoriales del agua, como la agricultura y el medio ambiente. Esta propuesta buscó una planificación más coherente y sostenible del recurso, pero pronto se evidenció que su implementación no era solo técnica, sino profundamente política. El autor John Anthony Allan destaca que la GIRH implica procesos discursivos y sociales, en los que influyen las diferencias entre países del norte global con acceso a información y tecnologías y del sur global, donde predominan comunidades rurales más

vulnerables. Además, se subraya el papel de movimientos sociales y de fenómenos económicos como la importación de "agua virtual" (agua contenida en bienes importados como alimentos), que ha reducido la presión por reformas locales, especialmente en regiones como Medio Oriente y el Norte de África. (Allan, 2003)

- Modelación dinámica de la calidad del agua del río Chicamocha teniendo en cuenta el vertimiento de agua residual de la ciudad de Tunja.

Este trabajo modela la calidad del agua del río Chicamocha, gravemente contaminado por vertimientos sin tratamiento de la ciudad de Tunja, utilizando el software QUAL2KW. Se analizaron datos de monitoreo de 2015 y se aplicaron distintos índices de calidad (ICA-NSF, ICA-IDEAM, ICA-CETESB) e índices de contaminación. La modelación permitió identificar el punto crítico de descarga y simular escenarios de mejora con la futura Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Tunja. Aunque la modelación dinámica fue limitada por falta de datos, el estudio demuestra que esta herramienta es útil para planificar acciones que mejoren la calidad del recurso hídrico (Jiménez et al., 2016).

- Análisis de los factores hidrológicos en relación con los eventos ocurridos en la cuenca alta del Río Chicamocha en Boyacá a través del uso de sistemas de información geográfica entre los años 2011-2019.

El estudio examina la cuenca alta del río Chicamocha en Boyacá entre 2011 y 2019, usando herramientas como QGIS y Google Collaboratory para analizar datos de precipitación, caudal y evaporación. Se identificaron variaciones hidrológicas influenciadas por fenómenos climáticos como el niño y por impactos humanos como la deforestación y la contaminación. El río ha sido gravemente afectado por vertimientos urbanos, industriales y agrícolas, siendo Tunja,

Duitama y Sogamoso los principales focos de contaminación. Ante esta situación, se proponen estrategias de recuperación como la reforestación y la instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), integradas a un modelo sostenible de gestión hídrica. El uso de sistemas de información geográfica permitió una comprensión más precisa del comportamiento del río y sus dinámicas ambientales (Gómez & López, 2019).

- Señales de cambio climático en la cuenca alta del Río Chicamocha.

Este estudio analiza cómo el clima ha cambiado en la cuenca alta del río Chicamocha durante los últimos 33 años. Utilizando datos meteorológicos, se identificaron tendencias en variables como precipitación, temperatura y caudal. Los resultados muestran evidencias claras de cambio climático, con impactos significativos en el comportamiento del río. Esta información es crucial para tomar decisiones y adaptarnos a estos cambios (Aguirre, 2020).

- Contaminación de la cuenca alta del Río Chicamocha y algunas aproximaciones sobre la salud humana.

Este estudio describe la grave contaminación de la cuenca alta del río Chicamocha, originada por vertimientos urbanos, industriales y agrícolas a lo largo de su recorrido por municipios como Tunja, Duitama, Nobsa y Sogamoso. A través de un enfoque epidemiológico, se identifican efectos negativos en la salud humana como enfermedades diarreicas, infecciones respiratorias, dermatitis e intoxicaciones por metales pesados y pesticidas, especialmente en poblaciones vulnerables.

Destacan la pérdida de biodiversidad y la degradación del ecosistema, lo cual repercute directamente en la calidad de vida de los habitantes de la región. Propone implementar medidas como plantas de tratamiento, reforestación, educación ambiental y vigilancia epidemiológica con

participación comunitaria, para mitigar los impactos y recuperar la salud de la cuenca y sus pobladores.(Abril et al., 2007)

- Cálculo del índice de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Chicamocha en los departamentos Boyacá-Santander en escenarios de cambio climático.

El estudio proyecta un aumento considerable en la vulnerabilidad hídrica de la cuenca del Río Chicamocha para las próximas décadas, con un 58% de los municipios afectados. Este resultado, obtenido a través del análisis de múltiples indicadores y escenarios climáticos, resalta la importancia de fortalecer la gestión del recurso hídrico en la región para mitigar los impactos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad de los sistemas socio-ecológicos (Abril et al., 2007).

- Efecto del cambio climático en la precipitación de la Cuenca Alta del Río Chicamocha.

El estudio analiza el impacto del cambio climático en la precipitación de la cuenca alta del río Chicamocha entre 1980 y 2012. Se detectó una tendencia creciente de la precipitación anual entre un 5% y 20% en comparación con la década de 1980. Sin embargo, la influencia de fenómenos macroclimáticos como el ENSO (El Niño y La Niña) en la región es baja o nula. Se identificaron eventos extremos de precipitación más frecuentes, especialmente en zonas entre 2.000 y 3.000 m s. n. m., lo cual puede agravar el riesgo de desastres naturales. El estudio recomienda acciones de adaptación y gestión ambiental, dado que, si las tendencias continúan, podrían generarse cambios importantes en los ecosistemas y en la disponibilidad de agua (Garavito & Caro, 2018).

- Adaptación al cambio climático y su relación con la seguridad alimentaria en municipios.

La investigación evalúa los efectos del cambio climático (CC) en la producción agrícola y la seguridad alimentaria (SA) en ocho municipios de Boyacá: Betéitiva, Busbanzá, Corrales, Floresta, Gámeza, Monguí, Mongua y Tópaga, pertenecientes a la cuenca media del río Chicamocha. Estos municipios, con economías agrícolas a pequeña escala, dependen altamente del sector agrícola, lo que los hace vulnerables a las alteraciones climáticas, como cambios en temperatura y precipitación, que afectan la productividad y la calidad de vida de sus habitantes.

El estudio empleó una metodología mixta en tres fases: identificación de variables relacionadas con CC y SA, simulación de rendimientos agrícolas de papa y maíz bajo escenarios de CC (2011-2040), y un análisis de los impactos en la SA para diseñar estrategias de adaptación. El objetivo principal fue analizar los efectos del CC en la agricultura de pequeña escala y generar medidas de adaptación para mitigar la vulnerabilidad agrícola al 2040(Duarte & Alarcón, 2023).

- Cambio climático y recursos hídricos en Colombia.

Este estudio analizó cómo el cambio climático afectará la distribución del agua en Colombia a mediados del siglo XXI. Utilizando modelos climáticos y dos indicadores clave (índice de aridez y balance hídrico), se proyectó una disminución de hasta un 18% en la escorrentía para ambos escenarios de cambio climático evaluados (RCP 4.5 y 6.0). El escenario más severo (RCP 6.0) sugiere un aumento significativo en la aridez, lo que podría generar una escasez de agua en varias regiones del país (Hincapie et al., 2019).

- Caracterización hidrológica de la cuenca del río Chicamocha en Colombia, con el programa Hydro-BID.

La caracterización de la Cuenca Alta del Río Chicamocha, considerando escenarios de cambio climático, se puede llevar a cabo a través de diversas plataformas. Para este estudio, se seleccionó Hydro-BID, una herramienta que, utilizando datos obtenidos por instrumentos especializados, permite visualizar las proyecciones futuras relacionadas con variables como temperatura, precipitación, escorrentía y evapotranspiración en dicha cuenca.

Se propusieron tres escenarios de cambio climático: el primero con un aumento de temperatura y precipitación, el segundo con un aumento de temperatura sin cambios en la precipitación, y el tercero con un aumento de temperatura acompañado de una disminución de la precipitación. Los resultados indicaron que el aumento de la precipitación, más que los cambios en la temperatura, es el factor que impulsa la escorrentía y la evapotranspiración, afectando el caudal de la cuenca entre 2 y 5 millones de metros cúbicos, dependiendo del escenario (Rincón & Pascual, 2020).

- Estrategias para la de gestión sostenible del recurso hídrico en la cuenca alta de Río Chicamocha – subcuenca Río Jordán.

Este estudio aborda la problemática del recurso hídrico en la subcuenca del río Jordán, en la cuenca alta del río Chicamocha (Boyacá), una zona con condiciones climáticas desfavorables y fuerte presión antrópica. Utilizando el modelo hidrológico WEAP, se analizó la oferta y demanda de agua en diferentes escenarios de crecimiento poblacional y cambio climático. Los resultados evidencian un déficit hídrico creciente, deterioro en la calidad del agua y limitaciones en la planificación actual. Se proponen estrategias de gestión basadas en los lineamientos de la Evaluación Regional del Agua (ERA) y el POMCA, con el fin de apoyar a CORPOBOYACÁ en la toma de decisiones sostenibles, garantizar el uso eficiente del agua y preservar los ecosistemas (Obando, 2019).

- Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT.

La creciente demanda de agua y el cambio climático ejercen una presión cada vez mayor sobre los recursos hídricos. Este estudio, realizado en la cuenca alta del río Taibilla (España), utilizó el modelo SWAT para evaluar los impactos del cambio climático en el balance hídrico. Los resultados indican una disminución proyectada de la precipitación, escorrentía y recarga de acuíferos, junto con un aumento de la temperatura. Estos hallazgos resaltan la necesidad de adoptar medidas de adaptación para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos en la región (Abellan et al., 2018).

- Sitios de inundaciones causadas por los ríos La Vega y Jordán, Tunja (Boyacá).

Los ríos La Vega y Jordán, ubicados en Tunja, han experimentado desbordamientos en áreas urbanas, por lo que es necesario identificar los puntos críticos de los cauces susceptibles de inundación y proponer soluciones; se analizaron los resultados de investigaciones previas sobre la modelización hidrodinámica y el diagnóstico de las zonas inundables en la ciudad. Esto incluyó el análisis de desbordamientos y la revisión de propuestas de diques, basándose en los modelos hidrológicos IBER, HEC-HMS 4.1 y HEC-RAS 4.1 (Arevalo et al., 2021).

- Evaluación de los índices de calidad del agua a partir de modelos de simulación hídrica. Caso de estudio: tramo intersección rio Jordán y la Vega hasta la PTAR Tunja.

Este estudio evalúa la calidad del agua en un tramo del río Jordán (Tunja, Boyacá), desde su confluencia con el río La Vega hasta aguas debajo de la Planta de Tratamiento de Aguas

Residuales (PTAR) de Tunja. El objetivo principal es estimar el Índice de Calidad de Agua (ICA) WQI-IDEAM mediante la implementación de modelos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua.

Se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS para simular caudales a partir de datos climatológicos y geográficos, mientras que el modelo hidráulico HEC-RAS permitió caracterizar las condiciones de flujo en el cauce. Con base en estos datos y en monitoreos in situ, se aplicó el modelo QUAL2KW para simular la calidad del agua bajo distintos escenarios de caudal (Qbase, Q50, Q97.5). Se evaluaron parámetros como oxígeno disuelto, DBO, DQO, pH, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo, permitiendo calcular el ICA en distintas secciones del río.

Los resultados reflejan una calidad de agua deficiente a lo largo del tramo analizado, incluso tras el tratamiento en la PTAR, con índices ICA por debajo del promedio aceptable. El estudio evidencia el impacto negativo de los vertimientos domésticos y sugiere que, a pesar del tratamiento, las cargas contaminantes persisten. Esta investigación proporciona una herramienta útil para la gestión hídrica y la toma de decisiones orientadas a la recuperación de la calidad del agua en la cuenca alta del río Chicamocha (Torres & Niño, 2022).

- Delimitación y zonificación de áreas en amenaza y escenarios en condición de riesgo por inundación a escala 1:25000 para la zona rural y 1:5000 para la zona urbana del municipio de Moniquirá-Boyacá.

Este estudio tuvo como propósito principal identificar, delimitar y zonificar las áreas con amenaza y riesgo de inundación en el municipio de Moniquirá (Boyacá), empleando escalas detalladas para las zonas rural (1:25.000) y urbana (1:5.000). Se parte de antecedentes históricos

que demuestran que Moniquirá ha sido afectado por eventos de inundación significativos, particularmente en los años 2011, 2012 y 2016, que dejaron pérdidas materiales considerables.

El proyecto fue desarrollado en el marco del Convenio Interadministrativo No. 1030 de 2017 entre la Gobernación de Boyacá y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Se utilizaron metodologías establecidas por entidades como IDEAM, IGAC, Minambiente y estándares internacionales, integradas mediante herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) como ArcGis 10.3 (Rodriguez & Silva, 2018).

- Evaluación de efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, Boyacá.

La investigación evalúa el impacto potencial del cambio climático sobre la hidrología superficial en la cuenca del Lago de Tota, una región estratégica del departamento de Boyacá por su importancia ecosistémica e hídrica. Esta cuenca, que abastece a cerca de 250.000 personas, está rodeada por el complejo de páramos Tota–Bijagüal–Mamapacha, ecosistema clave para la regulación hídrica y altamente vulnerable a cambios climáticos.

El estudio aplica un enfoque de modelación hidrológica semi-distribuida usando el software HEC-HMS, calibrando y validando el modelo en tres subcuencas (Hato Laguna, quebrada Los Pozos y río Olarte). Se emplearon datos de estaciones hidroclimatológicas y modelos climáticos, incluyendo escenarios de cambio climático desarrollados con series sintéticas (modelo ARMA) y el escenario RCP 8.5 del IDEAM.

Los resultados indican un posible aumento en la precipitación entre un 5% y 30% y un incremento en los caudales de hasta un 37% para el período 2020–2049, dependiendo del

escenario. Aunque esto implica una mayor oferta hídrica, también representa riesgos, como crecidas que podrían afectar la agricultura, la acuicultura y la infraestructura vial. Adicionalmente, el incremento de temperatura proyectado elevaría la evapotranspiración, reduciendo el caudal base en épocas secas.

Se identificaron diferencias en la capacidad de regulación hídrica entre las subcuencas**:** Los Pozos mejora en su capacidad reguladora, mientras que Hato Laguna y Olarte presentan disminuciones según el Índice de Retención Hídrica (IRH) (Barrera, 2021).

- Determinación de la oferta hídrica superficial mediante aplicación de software Arcgis y HEC – HMS, y del índice de calidad de agua (ICA) en épocas de más lluvia, en la parte media y baja de la microcuenca quebrada la cristalina en el costado oriental del parque nacional natural el Cocuy, como insumo para valoración de sus servicios eco-sistémicos.

El estudio se desarrolló ante la necesidad del Parque Nacional Natural El Cocuy de contar con insumos técnicos que permitieran valorar los servicios ecosistémicos de la microcuenca Quebrada La Cristalina, fuente hídrica esencial que abastece a 13 veredas del municipio de Tame, Arauca. El objetivo principal fue determinar la oferta hídrica superficial y la calidad del agua en la parte media y baja de dicha microcuenca durante la temporada de mayores lluvias.

Para ello, se utilizó una metodología basada en sistemas de información geográfica (ArcGIS) y modelación hidrológica (HEC-HMS), complementada con trabajo de campo para el levantamiento de parámetros biofísicos, análisis morfométrico y toma de muestras de calidad del

agua. Se simularon escenarios de escorrentía bajo condiciones normales y eventos extremos, identificando áreas con riesgo de inundación.

Adicionalmente, se calculó el Índice de Calidad del Agua (ICA) a partir de variables como pH, oxígeno disuelto, DQO, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales y temperatura. Los resultados evidenciaron sectores críticos en cuanto a calidad y cantidad del recurso hídrico, lo que permitirá implementar estrategias de conservación y gestión hídrica más eficaces en esta zona protegida (Diaz, 2012).

- Estimación y análisis de la zonificación de amenaza del municipio de arcabuco, Boyacá, asociada a la mancha de inundación del río Ubaza, para periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.

El estudio se desarrolló con el objetivo de identificar y zonificar las áreas del municipio de Arcabuco, Boyacá, que presentan amenaza por inundaciones ocasionadas por el río Ubaza. Se aplicaron herramientas de modelación hidrológica y hidráulica (HEC-HMS y HEC-RAS), así como análisis morfométrico de la subcuenca Pomeca, considerando escenarios de precipitación para eventos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años, además de proyecciones climáticas para 2040 y 2060.

Los resultados revelan que más del 80% del casco urbano podría verse afectado, incluyendo zonas vulnerables como la Escuela Técnica Alejandro de Humboldt y sectores entre la Calle 2 y las carreras 4 a 7. Aunque se estima que el impacto sobre infraestructura no sería severo por la baja velocidad y profundidad del agua, existe una amenaza considerable para la población. El escenario climático al 2040 sugiere un incremento del 9% en las precipitaciones, lo

que aumentaría la frecuencia e intensidad de los eventos de inundación (Sánchez & Figueroa, 2022).

- Formulación de estrategias para el manejo eficiente del recurso hídrico en la parte media y baja del río Garagoa.

El documento propone estrategias para el manejo eficiente del recurso hídrico en la cuenca media y baja del río Garagoa, una zona de gran valor ecológico, económico y social ubicada entre los departamentos de Boyacá y Cundinamarca. A partir del diagnóstico de las condiciones actuales del recurso que incluyen deterioro en la calidad del agua, conflictos por el uso y presión sobre fuentes de abastecimiento se identificaron puntos críticos y se diseñaron medidas orientadas a garantizar su sostenibilidad.

La investigación se fundamentó en el análisis del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) y combinó herramientas como encuestas, matriz DOFA, análisis normativo y estudios de percepción comunitaria. Se identificaron problemáticas clave como vertimientos no controlados, sobreexplotación del agua para riego, falta de gobernanza y desconocimiento del ciclo hidrológico por parte de las comunidades (Quintero, 2023).

- El riesgo de sequía en el contexto de variabilidad climática, un análisis desde el ordenamiento territorial y el neoinstitucionalismo en áreas urbanas de ciudades principales.

Esta investigación analiza el riesgo de sequía en Colombia en el contexto de la variabilidad climática, especialmente asociado al fenómeno de El Niño (ENSO), desde un enfoque territorial y neoinstitucional. El estudio parte de un análisis de los eventos de sequía

registrados en los últimos 30 años (1988–2018), identificando su distribución espacial en regiones como la Andina y Caribe, las más afectadas en términos de desabastecimiento hídrico.

Se aborda la respuesta institucional y normativa frente al riesgo de sequía, haciendo énfasis en el sector de agua potable y saneamiento básico. Se evidencian avances normativos, pero también vacíos en la articulación interinstitucional y en la implementación efectiva de políticas. La propuesta del neoinstitucionalismo se presenta como un marco útil para integrar actores y competencias de manera más efectiva.

Además, se analiza la incorporación del riesgo de sequía en los planes de ordenamiento territorial (POT) y de desarrollo de ciudades como Bogotá, Cali, Cartagena y Santa Marta. Se estudian aspectos como la relación oferta-demanda de agua, actividades económicas, y metas relacionadas con la reducción o aumento de la vulnerabilidad al desabastecimiento (Lorena & Gómez, 2019).

- “Estrategias de adaptación basadas en la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático del sistema socioecológico vereda el Carmen, municipio de Cómbita (Boyacá, Colombia)”

Este estudio analiza la vulnerabilidad climática del sistema socioecológico de la vereda El Carmen (Cómbita, Boyacá), centrado en los pequeños productores de durazno. A partir de una combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos —incluyendo análisis climático, entrevistas semiestructuradas, cartografía social y percepción comunitaria—, se identificaron los niveles de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa frente al cambio climático.

Los resultados evidencian que la producción agrícola está siendo afectada por la variabilidad de temperatura y precipitación, lo que incide en floración deficiente, plagas, enfermedades y reducción en la rentabilidad. Se propusieron estrategias de adaptación basadas en ecosistemas (AbE) y comunidades (AbC), integrando conocimientos tradicionales y buenas prácticas agrícolas como la diversificación de cultivos, conservación de coberturas naturales, fortalecimiento organizativo y educación ambiental.

La investigación plantea que mejorar la resiliencia de los agricultores requiere no solo medidas técnicas, sino también el fortalecimiento de capacidades sociales, económicas e institucionales, promoviendo un enfoque integral de sostenibilidad que articule producción y conservación (Arias, 2023).

- Evaluación de los procesos de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y análisis de la gestión del recurso hídrico en el país realizadas por las autoridades ambientales competentes.

Este trabajo analiza la aplicación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) en Colombia, basándose en el Decreto 1729 de 2002 y la guía técnico-científica del IDEAM de 2007. A partir de encuestas realizadas a 33 Autoridades Ambientales Competentes y del análisis de reportes de avance en gestión hídrica, se evaluaron las capacidades, avances y dificultades en la implementación de estos planes.

Los hallazgos revelan deficiencias significativas en aspectos como la coordinación interinstitucional, la participación comunitaria, el seguimiento, y la sostenibilidad financiera.

También se identificaron vacíos normativos y técnicos que dificultan una aplicación homogénea del proceso de ordenación en todo el territorio nacional.

Además del análisis normativo y técnico, el estudio plantea la necesidad de reformar el Decreto 1729 para adaptarlo a las condiciones actuales del país. Se proponen estrategias para mejorar la gestión integrada del recurso hídrico, haciendo énfasis en la planificación por cuenca como unidad territorial básica (Casallas & Jiménez, 2009).

- Propuesta de plan de manejo ambiental para la recuperación de la ronda hídrica del rio Jordán.

Esta monografía formuló un plan de manejo ambiental para recuperar la ronda hídrica del río Jordán, en el sector nororiental de Tunja, Boyacá, ante su deterioro por contaminación, pérdida de fauna y falta de gestión. Se aplicaron encuestas, análisis de agua, diagnóstico socioambiental y levantamientos topográficos. Con los resultados, se elaboró un modelo digital en ArcGIS que permitió diseñar un parque lineal con ciclorutas, senderos, reforestación, puntos ecológicos y zonas de encuentro. El plan incluye además acciones de educación ambiental, vigilancia, conservación y seguimiento institucional (Mejía, 2019).

- Análisis de los procesos de desertificación a partir del cambio multitemporal en la cobertura y uso del suelo en la cuenca media del Río Chicamocha, Colombia

El estudio analiza los procesos de desertificación en la cuenca media del río Chicamocha, ubicada en el noreste de Boyacá, a lo largo de un periodo de 29 años (1988–2017), utilizando imágenes satelitales LANDSAT y herramientas de teledetección y SIG como ENVI 5.1 y ArcGIS

10.3. A través de clasificaciones supervisadas y no supervisadas, así como del uso de índices espectrales NDVI y NDWI, se identificaron cambios significativos en la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Los resultados muestran una expansión del uso agropecuario, acompañado por la disminución de zonas de protección y conservación, especialmente en las riberas del río Chicamocha, donde se evidencian los mayores indicios de desertificación. Sin embargo, a escala general, se observó una mejora en la captación de humedad y cobertura vegetal, lo que sugiere una leve recuperación en algunas zonas (Escobar & Guarín, 2018).

- Determinando los efectos del cambio climático y del cambio en usos del suelo en la Macro Cuenca Magdalena-Cauca utilizando el modelo de suelo-superficie e hidrológico MESH.

Este estudio implementó el modelo hidrológico de gran escala MESH (Hydrology–Land Surface Scheme) en la macrocuenca Magdalena-Cauca, con el objetivo de evaluar los efectos del cambio climático y del cambio en los usos del suelo sobre variables hidrológicas clave como la escorrentía, la evapotranspiración y la humedad del suelo. La investigación se desarrolló en el marco del proyecto internacional Earth2Observe, liderado en Colombia por la Universidad Nacional.

La modelación mostró buenos resultados en las zonas medias y bajas, aunque presentó dificultades en las zonas altas por la complejidad topográfica. Posteriormente, se simularon cuatro escenarios climáticos y uno de cambio en cobertura vegetal, de forma individual y combinada.

Los resultados evidencian que el cambio climático podría incrementar la evapotranspiración hasta en un 3,38%, la humedad del suelo hasta en un 8% y generar variaciones en la escorrentía entre –4,25% y +4,92%, según el escenario. Estos cambios no son homogéneos y presentan patrones regionales diferenciados (Arboleda, 2018).

- Vulnerabilidad por efecto del cambio climático en Colombia.

Este informe, parte de la Segunda Comunicación Nacional ante la CMNUCC, analiza la vulnerabilidad de Colombia frente al cambio climático desde las dimensiones ambiental, social y económica, considerando escenarios proyectados para 2011–2040 y 2071–2100. Se evidencian aumentos en la temperatura media, especialmente en zonas de alta montaña, y variaciones en la precipitación que afectan de forma desigual a los ecosistemas, siendo los páramos y bosques altoandinos los más vulnerables. El estudio emplea modelos climáticos globales y regionales, análisis multivariado y SIG para evaluar impactos en sectores clave como agricultura, agua, energía, salud y biodiversidad (Bedoya et al., 2010).

- Evaluación y mapeo de los impulsores de cambio directos sobre los humedales a escala 1:100.000 en las cuencas priorizadas por el Fondo Adaptación.

El informe del Instituto Humboldt evalúa y mapea los principales impulsores de cambio que afectan los humedales en 114 subzonas hidrográficas priorizadas por el Fondo Adaptación, tras las inundaciones de 2010-2011. Se analizaron tres actividades socioeconómicas (ganadería, agricultura y minería) y cuatro impulsores directos (transformación de ecosistemas, sobreutilización del suelo, demanda hídrica y contaminación). Los resultados muestran una alta presión sobre los humedales, especialmente por la ganadería y la agricultura, mientras que la minería representa un riesgo difícil de cuantificar por limitaciones en la información. Este

estudio ofrece herramientas clave para la gestión ambiental y la adaptación al cambio climático (Gutiérrez et al., 2014).

5.5 Marco teórico.

El presente marco teórico reúne los fundamentos científicos que sustentan el análisis de los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico y las dinámicas hidrológicas de la cuenca alta del río Chicamocha. Este apartado integra teorías relacionadas con el cambio climático antropogénico, el ciclo hidrológico dinámico, la oferta y demanda hídrica, y la modelación hidrológica y climática, las cuales permiten comprender los procesos físicos, ambientales y antrópicos que influyen en la disponibilidad y variabilidad del agua.

- Teoría del Cambio Climático Antropogénico.

Esta teoría sostiene que el actual calentamiento global es consecuencia directa de las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la expansión agrícola. Estos procesos incrementan la concentración de gases de efecto invernadero como CO_2, CH_4 y N_2O, los cuales intensifican el efecto invernadero natural y provocan cambios en los patrones del clima global (IPCC, 2019).

El (IPCC, 2019) indica que la temperatura media global ha aumentado en al menos 1,1 °C desde la era preindustrial, y proyecta un incremento de fenómenos extremos como sequías, olas de calor y lluvias intensas, todos con implicaciones directas sobre el recurso hídrico.

- Teoría del Ciclo Hidrológico Dinámico.

A diferencia del ciclo hidrológico clásico, esta teoría considera que el sistema hídrico está en constante transformación y responde a cambios externos e internos, como el clima, la urbanización y el uso del suelo. Por ejemplo, la deforestación reduce la infiltración y aumenta la escorrentía superficial, alterando el balance hídrico de una cuenca.

Los avances en esta línea incluyen la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y sensores remotos para modelar la dinámica hidrológica y prever alteraciones en la disponibilidad hídrica.(*FUNDAMENTALS OF HYDROLOGY*, 2019)

- Teoría de la Oferta y Demanda de Recursos hídricos.

Esta teoría se basa en el equilibrio entre la oferta (disponibilidad natural del recurso) y la demanda (consumo por actividades humanas y ecosistemas). El cambio climático puede alterar ambos factores, modificando la cantidad de agua disponible y aumentando la competencia por su uso, lo que requiere una gestión eficiente y adaptativa (ANA & MINAGRI, n.d.).

- Teoría de la modelación hidrológica y climática.

La modelación hidrológica y climática utiliza herramientas matemáticas y computacionales para simular el comportamiento del ciclo del agua bajo diferentes escenarios climáticos. Estos modelos permiten evaluar los impactos del cambio climático en la disponibilidad y calidad del recurso hídrico, facilitando la planificación y gestión adaptativa de los recursos hídricos (Ochoa et al., 2022).

- Caracterización geomorfológica.

Constituye una etapa fundamental para comprender su funcionamiento físico y los procesos que controlan la dinámica del agua y los sedimentos. Este análisis permite describir

cuantitativamente la forma, el relieve y la red de drenaje de la cuenca mediante parámetros morfométricos como el área, el perímetro, la pendiente y la densidad de drenaje, entre otros.

- Área de la cuenca (A).

Superficie total del territorio que aporta escorrentía hacia un punto de salida común. Este parámetro geomorfológico básico condiciona el volumen potencial de agua generado por la precipitación y es determinante en el comportamiento hidrológico general de la cuenca.

- Perímetro de la cuenca (P).

La longitud total de la línea divisoria de aguas que delimita el contorno de la cuenca. Este parámetro geomorfológico permite describir la forma de la cuenca y, en conjunto con el área, es utilizado para el cálculo de índices morfométricos que influyen en la respuesta hidrológica del sistema.

- Longitud del río principal (L).

Distancia medida a lo largo del cauce principal de la cuenca, desde el punto de salida hasta la cabecera más lejana. Este parámetro geomorfológico influye en el tiempo de concentración y en la dinámica del escurrimiento, siendo clave para el análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca.

- Ancho promedio de la cuenca (Ap).

Se define como la relación existente entre el área de la cuenca y su longitud máxima.(CORTOLIMA, 2019)

$$Ap = \frac{A}{L} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

Ap = Ancho promedio de la cuenca.

A= Área de la cuenca (Km²).

L= Longitud del rio principal (Km).

- Factor forma. (Kf).

Es la relación que existe entre el área de la cuenca (A) y el cuadrado del máximo recorrido (L). Esta última se mide cuando se sigue el curso de agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la unidad hidrográfica.(CORTOLIMA, 2019)

$$Kf = \frac{A}{l^2} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

Kf = Factor forma.

A = Área de la cuenca (Km²).

L= Longitud máxima de la cuenca (Km).

Tabla 2.

Formas de la cuenca según el valor de Kf.

Kf	Clasificación
< 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada

0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ensanchada ligeramente
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

Nota. Tomada de (CORTOLIMA, 2019)

- Coeficiente de compacidad o índice de Graveluis (Kc).

Este coeficiente es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo equivalente; se define como la razón entre el perímetro de la cuenca (que corresponde con la misma longitud de la divisoria que la encierra) y el perímetro de la circunferencia. Este coeficiente adimensional, es independiente del área estudiada, tiene por definición un valor igual a 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Nunca los valores del coeficiente de compacidad serán inferiores a uno.(CORTOLIMA, 2019)

$$Kc = 0.282 \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right) \qquad \text{(Ecuación 3)}$$

Kc = Coeficiente de compacidad o índice de Graveluis.

P= Perímetro de la cuenca (Km).

A= Área de la cuenca (Km^2).

Tabla 3.

Relación entre el índice de Gravelius y la torrencialidad de la subzona hidrográfica.

Valores de Kc	**Forma**	**Características**

1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda	Cuenca torrencial peligrosa
1.25 – 1.50	De oval redonda a oval oblonga	Presenta peligros torrenciales, pero no iguales a la anterior
1.50 – 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga	Menor riesgo a avenidas torrenciales

Nota. Tomada de (CORTOLIMA, 2019)

- Índice de alargamiento (La).

El índice de alargamiento se obtiene por medio de la evaluación de la relación existente entre la mayor longitud de la cuenca, contra el mayor ancho de la misma. Con este índice, los valores mayores a uno indican cuencas alargadas, lo cual se sustenta a través de la siguiente relación matemática:

$$L_a = \frac{L_{máx}}{A_{máx}} \qquad \text{(Ecuación 4)}$$

La = Índice de alargamiento.

$L_{máx}$ = Longitud máxima de la cuenca (Km).

$A_{máx}$ = Ancho máximo de la cuenca (Km).

Tabla 4.

Índice de alargamiento

Rangos	Clases de alargamiento
0.0 - 1.4	Poco alargada

1.5 – 2.8	Moderadamente alargada
2.9 - 4.2	Muy alargada

Nota.(CORTOLIMA, 2019)

- Pendiente media.

El valor representativo de la inclinación del terreno dentro de la cuenca, el cual expresa la relación entre la diferencia de altitud y la distancia horizontal. Este parámetro geomorfológico influye directamente en la velocidad del escurrimiento, los procesos de erosión y el comportamiento hidrológico general de la cuenca.

6 Alcance

La presente investigación está orientada en analizar la influencia del cambio climático sobre la calidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha, con especial énfasis en la ciudad de Tunja. La zona de estudio comprende el territorio delimitado por los límites administrativos de Tunja y las subcuencas hidrográficas que contribuyen a la recarga y abastecimiento de agua para esta ciudad, dentro de la cuenca alta del río Chicamocha.

El proyecto se desarrollará en un periodo de cuatro meses, durante los cuales se realizarán actividades de recopilación y análisis de datos climáticos e hidrológicos históricos y actuales, modelación hidrológica y climática utilizando herramientas SIG como QGIS y modelos hidrológicos apropiados, y la evaluación de los impactos del cambio climático sobre la oferta y demanda del recurso hídrico, así como sobre su calidad.

El alcance incluye la identificación de los principales riesgos e impactos derivados de las variaciones climáticas sobre el recurso hídrico en Tunja, y la propuesta de líneas de acción orientadas a una gestión integrada y adaptativa, que permitan mejorar la resiliencia y sostenibilidad del agua en la zona de estudio.

No se contempla dentro del alcance la implementación directa de medidas de la gestión ni el monitoreo en campo posterior al análisis; el estudio se centrará en la modelación, análisis y formulación de recomendaciones basadas en los resultados obtenidos durante el periodo de cuatro meses.

7 Metodología

La metodología desarrollada en este estudio se estructuró de manera secuencial y lógica a través de un conjunto de fases que permiten abordar integralmente el análisis de la gestión hídrica y los impactos del cambio climático en la cuenca alta del río Chicamocha. Este enfoque metodológico combina procedimientos cuantitativos, técnicas geoespaciales, modelación hidrológica y climática, análisis normativo y evaluación estratégica, con el fin de garantizar la rigurosidad y coherencia del proceso investigativo.

7.1 Enfoque de la Investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, explicativo y de carácter aplicado, orientado a comprender la afectación del cambio climático sobre el recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha, específicamente en el área urbana y periurbana del municipio de Tunja. Se trata de un estudio no experimental, de tipo documental y basado en el análisis retrospectivo de datos secundarios, empleando técnicas de modelación hidrológica y análisis geoespacial.

El estudio se desarrollará exclusivamente con base en información secundaria, sin trabajo de campo, utilizando herramientas como QGIS y el modelo hidrológico QSWAT para simular el comportamiento del sistema hídrico. El objetivo es identificar los impactos del cambio climático en Tunja, y proponer estrategias de gestión integrada y adaptativa del recurso hídrico en este contexto urbano.

7.2 Fase 1: Caracterización del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha (Tunja)

En esta fase se realizó una caracterización integral del estado actual del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha, enfocándose en el territorio comprendido por el municipio de Tunja. Se identificarán las fuentes hídricas superficiales que abastecen la ciudad, los principales usos del agua (doméstico, institucional, recreativo, etc.), y los actores institucionales relevantes, como el acueducto municipal, CORPOBOYACÁ y el IDEAM.

Se recopiló información secundaria proveniente de documentos técnicos, planes de ordenamiento territorial, bases de datos oficiales e investigaciones previas. Con apoyo de QGIS, se realizó la delimitación de la cuenca en el sector de Tunja, así como el análisis del tipo y cobertura del suelo, pendientes y red hídrica. Esta caracterización permitió establecer una línea base del contexto hídrico actual del municipio y sus problemáticas asociadas.

7.2.1 Variables

Para el análisis integral de la cuenca alta del río Chicamocha se incluyeron variables morfológicas (relieve, pendientes y red de drenaje), uso y cobertura del suelo, junto con variables hidrológicas y climáticas (precipitación y temperatura máxima y mínima). La selección de estos componentes responde a la necesidad de comprender la dinámica hídrica en función de las condiciones físicas del territorio, la presión antrópica derivada de los usos del suelo y la influencia de la variabilidad climática. La caracterización se realizó con base en registros de los últimos diez años, empleando información hidrológica y ambiental proveniente de entidades oficiales como el IDEAM y Corpoboyacá.

7.2.2 Caracterización geomorfológica.

Parámetros de forma de la cuenca:

Se tiene en cuenta la modelación en el software Qgis para determinar algunas de las variables:

- Área de la cuenca (A). (Se obtiene mediante Qgis)
- Perímetro de la cuenca (P). (Se obtiene mediante Qgis)
- Longitud del río principal (L). (Se obtiene mediante Qgis)
- Ancho promedio de la cuenca (Ap). (Se obtiene mediante relaciones matemáticas).
- Factor forma. (Kf). (Se obtiene mediante relaciones matemáticas).
- Coeficiente de compacidad o índice de Graveluis (Kc). (Se obtiene mediante relaciones matemáticas).
- Índice de alargamiento (La). (Se obtiene mediante relaciones matemáticas).
- Pendiente media. (Se obtiene mediante Qgis)

7.2.3 Caracterización de la red de drenaje

- Orden de las corrientes de agua en la cuenca Chicamocha zona Tunja.

El orden de las cuencas se consideró un factor relevante en el análisis de los procesos de inundación, dado que, a mayor orden del río principal, se genera una mayor disipación de energía en los afluentes, lo que reduce la energía y la velocidad del flujo al llegar al cauce principal. Para determinar el orden del cauce principal y de sus afluentes, se empleó la metodología de clasificación jerárquica de cursos fluviales, la cual permitió identificar la

estructura y jerarquía del sistema de drenaje dentro de la cuenca alta del río Chicamocha (Mora & Ochoa, 2016).

El orden de la cuenca esta dado por el orden del cauce principal:

- Corrientes de primer orden: pequeños canales que no tienen Tributarios.
- Corrientes de segundo orden: se origina cuando dos corrientes de primer orden se unen.
- Corrientes de tercer orden: se origina cuando dos corrientes de segundo orden se unen.
- Corrientes de orden n+1 dos corrientes de orden *n* se unen esta clasificación se realiza con base en la metodología de Sthraler del año 1964 (Mora & Ochoa, 2016).

7.2.4 Características hidrológicas y climáticas

Para la caracterización hidrológica y climática de la cuenca alta del río Chicamocha, específicamente en el área urbana del municipio de Tunja, se emplearon registros diarios provenientes de la estación meteorológica UPTC (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Tunja), la cual pertenece a la red nacional de monitoreo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Esta estación constituye el punto de referencia oficial para el análisis de variables climáticas en la ciudad, al ser la única estación de la red IDEAM ubicada dentro del perímetro urbano de Tunja.

Los datos utilizados corresponden a las variables de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, los cuales fueron obtenidos a través del portal institucional DHIME (Datos Hidrometeorológicos del IDEAM), que consolida y publica la información proveniente de las estaciones automáticas y convencionales del país. Estos registros abarcan un período continuo de diez años (2014–2024), con un porcentaje de datos faltantes inferior al 10 %, conforme a las

exigencias establecidas por la Guía Técnica para el Acotamiento de Rondas Hídricas del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021) y la Guía Metodológica de la Operación Estadística de Variables Meteorológicas del IDEAM (código M-GCI-M-G002, 2020) (IDEAM, 2019).

Con el fin de garantizar la validez estadística y la representatividad de la información empleada en la caracterización climática, se evaluó la calidad y el comportamiento temporal de las series registradas en la estación meteorológica UPTC–IDEAM, ubicada dentro del perímetro urbano de la ciudad de Tunja. Su localización estratégica en el centro del área de estudio y la continuidad de sus registros le confieren una alta representatividad espacial y estadística, al reflejar las condiciones climáticas predominantes en la cuenca alta del río Chicamocha. La representatividad de la serie fue validada mediante el cálculo del Coeficiente de Variación (CV), indicador que mide la dispersión de los datos respecto a su promedio. En cuanto a la tendencia temporal, se aplicó un análisis de regresión lineal simple utilizando la función pendiente de Excel, donde el tiempo (años) se consideró como variable independiente y la variable climática (precipitación o temperatura) como dependiente. La pendiente resultante representa la tasa de cambio anual de la variable, de manera que los valores positivos indican una tendencia creciente y los negativos una tendencia decreciente durante el periodo 2014–2024. Este análisis permitió identificar la dirección y magnitud de las variaciones climáticas locales en Tunja, fortaleciendo la validez estadística de la información y su pertinencia para la modelación hidrológica posterior.

En cuanto al proceso de validación y depuración de los datos, se verificó que las series presentaban una alta completitud, sin registros faltantes significativos, lo cual garantiza la consistencia y representatividad temporal de la información.

Sin embargo, el formato de ingreso de datos requerido por QSWAT demanda que los posibles vacíos sean representados con el valor –9999, de modo que el programa reconozca dichos puntos como ausentes y ejecute automáticamente un proceso interno. Este procedimiento estima los valores faltantes mediante métodos estadísticos, minimizando el error en la continuidad de la serie y asegurando la correcta simulación hidrológica.

Aunque no se identificaron datos ausentes en la base climática suministrada por el IDEAM, la inclusión del marcador –9999 garantiza la compatibilidad con el modelo y el tratamiento estándar de incertidumbre asociada a la completitud de los registros diarios.

7.2.5 Test de homogeneidad.

Para garantizar la consistencia y confiabilidad de las series de datos climáticos utilizadas en el estudio, se aplicaron pruebas estadísticas de homogeneidad mediante la extensión XLSTAT de Microsoft Excel. La homogeneidad de las series es un requisito fundamental en los análisis hidrológicos y climáticos, ya que asegura que las variaciones observadas en las tendencias temporales se deban a causas naturales —como el cambio climático— y no a alteraciones artificiales derivadas de cambios en el emplazamiento de la estación, el tipo de instrumento o errores sistemáticos en la medición.

Dentro de las pruebas aplicadas se incluyeron el Test de Pettitt y el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), ambos recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para la detección de rupturas o cambios en la media de una serie temporal. El Test de Pettitt es una prueba no paramétrica que permite identificar cambios abruptos en la mediana de los datos, mientras que el SNHT se basa en la comparación de medias antes y después de un

punto determinado de la serie, con el fin de detectar variaciones significativas en la tendencia central.

El procesamiento de los datos se realizó en XLSTAT debido a su facilidad de integración con excel, lo que permitió ejecutar las pruebas de homogeneidad, visualizar los resultados estadísticos y determinar la existencia de posibles rupturas en las series anuales de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima correspondientes al periodo 2014–2024.

En el presente estudio se aplicaron los tests de Pettitt y SNHT de manera complementaria; el Test de Pettitt fue empleado para las series de precipitación debido a su robustez ante datos no normales y su capacidad para detectar rupturas abruptas y el SNHT, en cambio, se utilizó para las series de temperatura máxima y mínima, ya que permite identificar variaciones graduales en la media bajo el supuesto de normalidad de los datos.

Los resultados de estas pruebas sirvieron como base para validar la representatividad de las series y garantizar la fiabilidad de los análisis de tendencias y modelación hidrológica desarrollados posteriormente.

7.2.6 Indicadores de amenaza hídrica (Índice de Anomalía Pluviométrica – RAI).

Con el propósito de vincular la caracterización climática con indicadores de amenaza hídrica, se calculó el Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI) propuesto por Lloyd-Hughes y Saunders (2002), utilizando los registros anuales de precipitación correspondientes al período 2014–2024 de la estación UPTC–IDEAM.

Este índice permite cuantificar los períodos secos o húmedos a partir de la desviación de la precipitación observada respecto al promedio histórico, clasificando cada año según su grado de anomalía. El cálculo se realizó en Microsoft Excel, empleando la ecuación:

$$RAI = \frac{Pi - Pprom}{Pmáx - Pprom}\ x\ 3; Si\ Pi > Pprom \qquad \text{(Ecuación 5)}$$

$$RAI = \frac{Pi - Pprom}{Pprom - Pmín}\ x\ 3; Si\ Pi < Pprom \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

donde P_i representa la precipitación anual del año i, P_{prom} el promedio del período analizado, y P_{max}, P_{min}los valores extremos de la serie.

Los resultados se interpretaron de acuerdo con la clasificación propuesta por Lloyd-Hughes & Saunders (2002) y adaptada por el IDEAM (2021) en el atlas de sequías meteorológicas de Colombia, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 5

Clasificación de la sequía según el valor del índice (SPI/RAI) y probabilidad de ocurrencia.

Valor del índice	Categoría	Probabilidad de ocurrencia (%)
≥ +2.00	Extremadamente húmedo	2.3
+ 1.50 a + 1.99	Severamente húmedo	4.4
+ 1.00 a + 1.49	Moderadamente húmedo	9.2
0 a + 0.99	Ligeramente húmedo	34.1
0 a – 0.99	Sequía leve	34.1
-1.00 a -1.49	Sequía moderada	9.2

-1.50 a – 1.99	Sequía severa	4.4
≤ -2.00	Sequía extrema	2.3

Nota. Tomado de (Lloyd & Saunders, 2002)

7.2.7 Evaluación cualitativa del riesgo hídrico.

Para complementar la caracterización hidrológica y climática, se elaboró una matriz de riesgo hídrico cualitativa, en la cual se evalúan de manera conjunta la frecuencia de ocurrencia (probabilidad) y el nivel de impacto de los eventos extremos (sequías y excesos de precipitación) sobre los sistemas clave de la cuenca alta del río Chicamocha: acueducto, agricultura y ecosistemas.

La matriz se estructuró siguiendo la metodología propuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) para la gestión del riesgo hídrico, con un enfoque de probabilidad impacto, en el eje horizontal se representa el impacto (menor, moderado, mayor, catastrófico), y en el eje vertical, la probabilidad (improbable, posible, probable). Los niveles de riesgo resultan de la combinación de ambas variables, permitiendo identificar zonas de bajo, medio, alto o muy alto riesgo, mediante una escala de colores (verde, amarillo, naranja y rojo).

Los riesgos identificados se clasificaron según los efectos observados y la recurrencia de los eventos climáticos en el periodo 2014–2024, derivados del análisis del Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI).

- Riesgos en el sistema de acueducto: El sistema de acueducto enfrenta riesgos asociados principalmente a la disponibilidad y calidad del agua.

  Durante los periodos de sequía prolongada, los caudales de las fuentes abastecedoras

disminuyen significativamente, lo que puede provocar restricciones en la oferta de agua y aumentar la competencia por el recurso entre usos domésticos, agrícolas e industriales.

Esta situación se agrava en los acueductos rurales que dependen de corrientes superficiales de bajo caudal.

Por otro lado, los eventos de precipitación intensa generan incrementos en la turbidez, arrastre de sedimentos y contaminantes hacia las bocatomas, afectando la calidad del agua cruda y aumentando los costos de tratamiento.

- Riesgos en el sistema agrícola: La agricultura constituye uno de los sectores más vulnerables frente a la variabilidad climática. Las sequías recurrentes reducen la disponibilidad de agua para riego y provocan estrés hídrico en los cultivos, disminuyendo la productividad y afectando la seguridad alimentaria.

  En contraste, los excesos de precipitación ocasionan encharcamientos, erosión del suelo, pérdida de nutrientes y proliferación de enfermedades fúngicas, afectando la calidad y el rendimiento de las cosechas.
- Riesgos en los ecosistemas naturales: Los ecosistemas, especialmente los bosques altoandinos y zonas de recarga hídrica, enfrentan riesgos relacionados con la alteración del balance hídrico y la degradación del suelo.

  Durante los periodos secos prolongados se produce estrés hídrico en la vegetación, pérdida de cobertura, incremento en la susceptibilidad a incendios forestales y disminución en la capacidad de infiltración.

  En periodos lluviosos extremos, los procesos erosivos y de escorrentía superficial se intensifican, generando inestabilidad en laderas, pérdida de suelos fértiles y alteración de hábitats acuáticos.

7.3 Fase 2: Modelación, evaluación de escenarios climáticos históricos y desarrollo de escenarios prospectivos.

En esta fase se desarrolló la modelación del sistema hídrico de la cuenca alta del río Chicamocha, en el sector correspondiente a la ciudad de Tunja, utilizando el modelo hidrológico SWAT a través del módulo QSWAT en QGIS. Esta modelación permitió simular el comportamiento del sistema hídrico bajo diferentes condiciones climáticas históricas y así analizar las respuestas del recurso hídrico ante variaciones en temperatura y precipitación.

Como insumos se utilizaron: el modelo digital de elevación (DEM), mapas de uso del suelo, información edafológica, y datos climáticos históricos (precipitación y temperaturas máximas y mínimas) específicos para el área de estudio. A partir de estos datos se simularon procesos clave como escorrentía, humedad relativa, infiltración, orden de cauce, y transporte de sedimentos.

Los resultados obtenidos permitieron identificar patrones de cambio en el comportamiento hídrico del entorno urbano de Tunja, evidenciar riesgos y sentar las bases técnicas necesarias para la formulación de estrategias de gestión integrada y adaptativa del recurso hídrico.

7.3.1 Desarrollo de escenarios prospectivos.

El análisis se fundamenta en la comparación de los resultados de una regresión estadística realizada sobre la serie de tiempo anual de la estación climática local de Tunja y las proyecciones de modelos climáticos globales (GCMs) del conjunto de datos WorldClim, centrado en el escenario de desarrollo socioeconómico intermedio, el Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5 (SSP2-4.5).

- Datos Climáticos Utilizados:

Respecto a los Datos Históricos de la Estación (Serie de Tiempo Local), las series de tiempo diarias de Precipitación (P) y Temperatura (T) se agregaron a nivel anual. Específicamente, los valores de precipitación se sumaron anualmente para obtener la serie de tiempo de precipitación anual, mientras que los de temperatura se promediaron anualmente para obtener la serie de tiempo de temperatura promedio anual. Posteriormente, sobre estas series de tiempo anuales se aplicó una regresión lineal estadística para proyectar una tendencia futura, cuyos valores se consolidan en la columna "Proyección" de las tablas de resultados.

En cuanto a los Datos de WorldClim (Proyecciones de GCMs), se emplearon los rásters de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación para los cuatro escenarios principales: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Finalmente, la Extracción se realizó calculando el promedio espacial anual de los rásters de WorldClim para cada SSP sobre el área de estudio de Tunja.

El paso final consistió en la agrupación consolidada: todos los datos, tanto las proyecciones de la estación (por regresión) como los valores extraídos de WorldClim, se agruparon y promediaron en cuatro períodos de 20 años: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100, estructurando las tablas de resultados finales de manera concisa.

- Implicaciones del Escenario SSP2-4.5 para Tunja

El escenario SSP2-4.5 (Caminos Medios) es considerado un escenario intermedio que combina una estabilidad socioeconómica con un nivel moderado de mitigación climática(IPCC, 2021) . La designación 4.5 indica que el forzamiento radiactivo se estabilizaría alrededor de 4.5 W/m2 para el año 2100, lo que resulta en un calentamiento moderado. La observación de que la

tendencia histórica de la estación local de Tunja se alinea más estrechamente con este SSP sugiere que, si las trayectorias de emisiones y el desarrollo global continúan por un "camino medio", el clima futuro de la ciudad reflejaría esta senda.

7.4 Fase 3: Formulación de estrategias de gestión integrada y adaptativa del agua en Tunja

De acuerdo a los resultados obtenidos en las fases anteriores, se formularon estrategias específicas para la gestión integrada y adaptativa del recurso hídrico en el área urbana y periurbana de Tunja. Estas estrategias están orientadas a enfrentar los efectos ya observados de la variabilidad climática, promoviendo un uso eficiente del agua, fortaleciendo la gobernanza local y protegiendo las fuentes hídricas que proveen a la ciudad.

Se propusieron acciones, con énfasis en la adaptación al cambio climático, la reducción de la vulnerabilidad hídrica urbana y la mejora en la planificación del recurso. Las estrategias buscan alinearse con los instrumentos de ordenamiento territorial, los planes municipales de gestión del riesgo y las políticas regionales en torno a la sostenibilidad del agua.

7.5 Técnicas e instrumentos

En coherencia con el enfoque metodológico de tipo documental, cuantitativo y no experimental de esta investigación, se emplearon técnicas e instrumentos orientados a la recopilación, procesamiento, análisis y modelación de información secundaria. Estas herramientas permitieron simular el comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Chicamocha en el municipio de Tunja, y evaluar la influencia del cambio climático.

7.6 Técnicas

Las técnicas y procedimientos aplicados en esta investigación se seleccionaron con el propósito de garantizar un análisis integral, riguroso y reproducible del comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Chicamocha bajo escenarios de cambio climático. Estas técnicas permiten abordar la complejidad del sistema climático–hidrológico desde una perspectiva cuantitativa, espacial y normativa, articulando herramientas estadísticas, geoespaciales, de modelación y de revisión documental.

7.6.1 Revisión documental y análisis de contenido.

Se recopilo y sistematizo información relevante sobre el contexto hídrico y climático de Tunja. Esto incluye estudios previos, informes técnicos de entidades como el IDEAM, CORPOBOYACÁ, POT de Tunja, así como literatura científica sobre cambio climático, modelación hidrológica y gestión del agua.

7.6.2 Análisis geoespacial.

Se aplicaron mediante el uso del software QGIS, permitiendo la delimitación de la cuenca, la caracterización del relieve, el análisis de uso del suelo y la identificación de cuerpos hídricos y áreas de recarga. Esta técnica facilito la preparación de insumos cartográficos requeridos por el modelo hidrológico.

7.6.3 Modelación hidrológica (QSWAT).

Se implemento el modelo SWAT a través de su versión QSWAT, para simular el comportamiento del sistema hídrico de Tunja bajo diferentes escenarios climáticos históricos. Esta técnica permitió estimar variables como escorrentía, caudales, balance hídrico y transporte de sedimentos, lo cual resulta fundamental para evaluar las consecuencias del cambio climático.

7.6.4 Análisis comparativo de escenarios climáticos históricos.

Según los resultados de la modelación, se realizó un análisis retrospectivo comparativo entre distintos escenarios climáticos, permitiendo identificar tendencias, variaciones y riesgos hídricos ya observados en el contexto de Tunja.

7.7 Instrumentos

Los instrumentos utilizados en esta investigación constituyen la base operativa que permitió integrar, procesar y analizar la información necesaria para caracterizar la dinámica hidrológica de la cuenca alta del río Chicamocha y evaluar los impactos asociados al cambio climático. Su selección responde a criterios de pertinencia técnica, disponibilidad de información y compatibilidad con los métodos de modelación implementados.

7.7.1 Software QGIS

Utilizado para el procesamiento de datos espaciales, análisis de mapas temáticos, georreferenciación, y preparación de capas base (DEM, uso de suelo, cobertura vegetal, red hidrográfica) necesarias para la modelación hidrológica.

7.7.2 Extensión QSWAT (para QGIS).

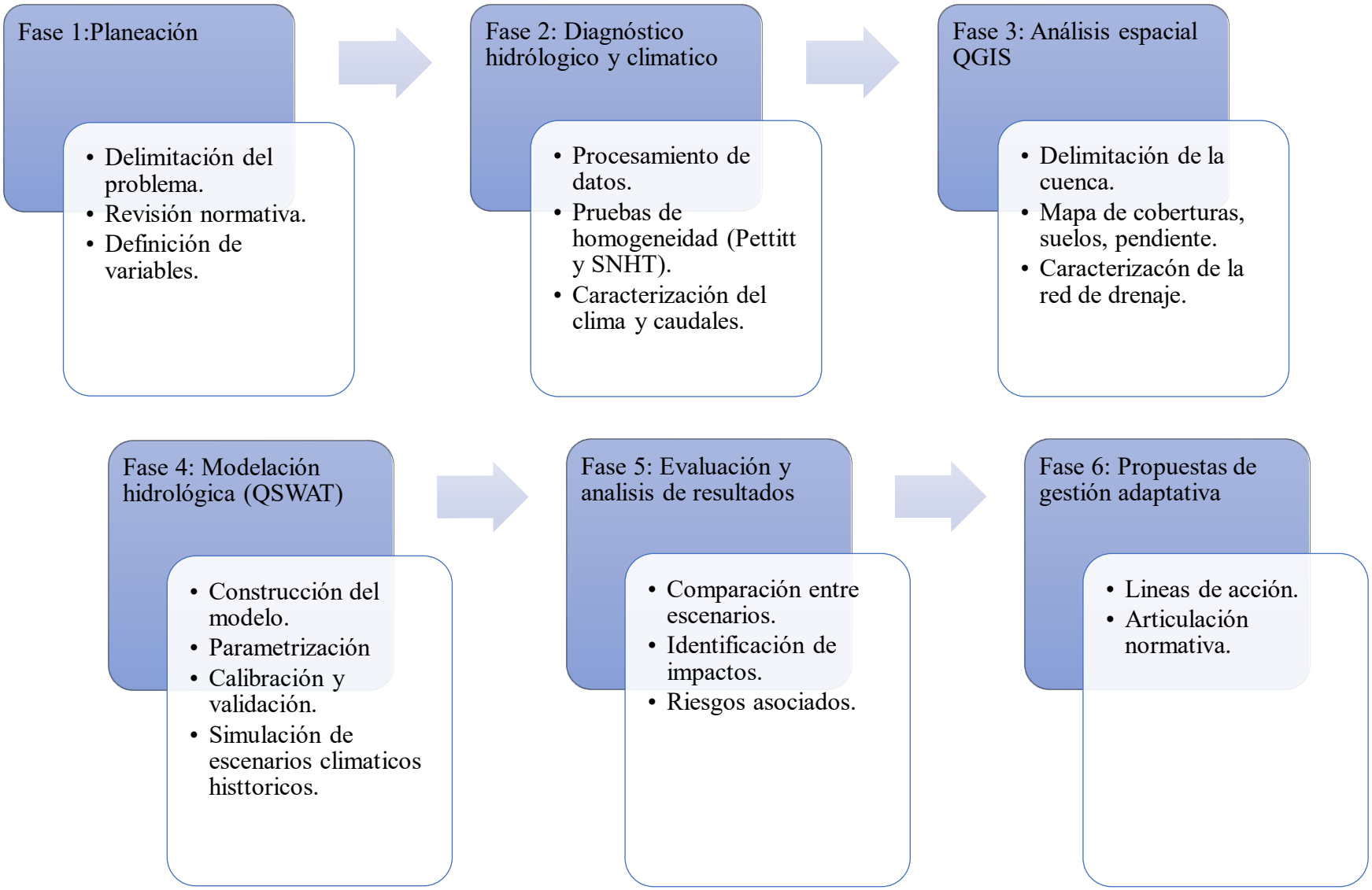
Instrumento de modelación hidrológica que permite simular la dinámica hídrica de cuencas hidrográficas. Se empleará para calibrar y correr el modelo con insumos específicos de la cuenca de Tunja.

7.7.3 Bases de datos.

- IDEAM: Datos hidrológicos y climáticos históricos.

- CORPOBOYACÁ y Alcaldía de Tunja: Información ambiental, usos del agua, diagnósticos y documentos de gestión

8 Flujograma metodológico



9 Resultados

9.1 Caracterización del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha (Tunja)

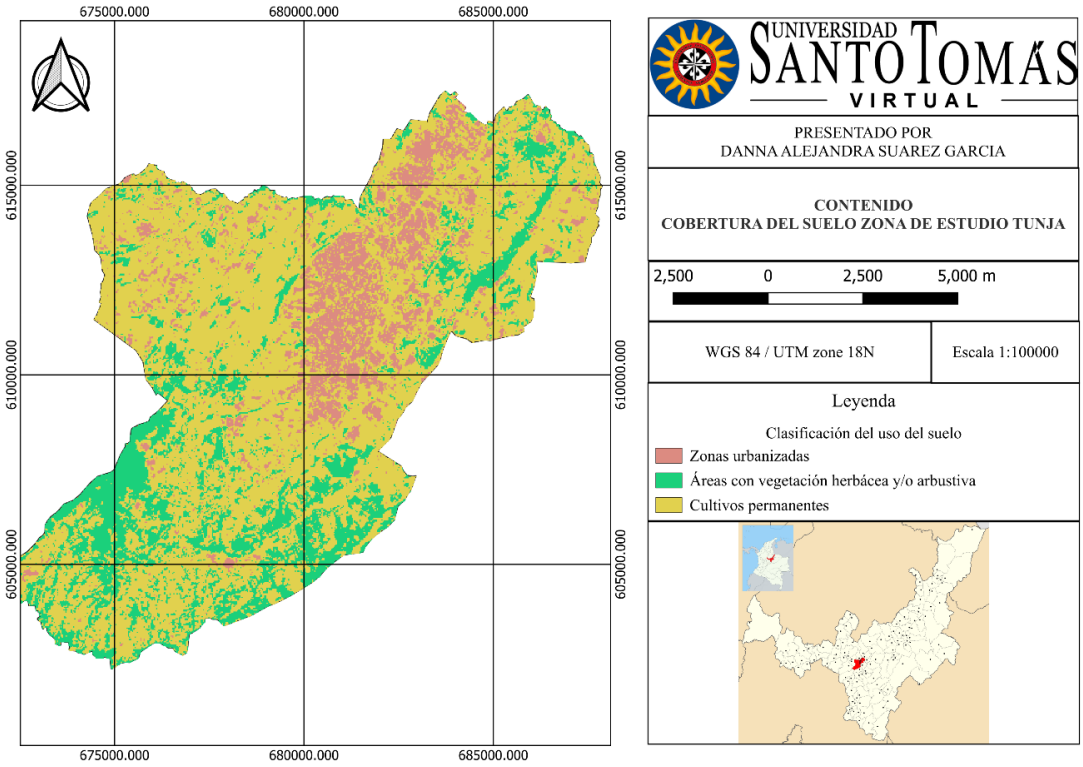
La caracterización del recurso hídrico constituye un componente fundamental para comprender las dinámicas climáticas, hidrológicas y ambientales que condicionan la disponibilidad, variabilidad y calidad del agua en este territorio. Esta sección integra información hidrometeorológica, fisiográfica y biofísica con el fin de establecer un diagnóstico detallado del comportamiento actual de la cuenca, identificando patrones de precipitación, temperatura, escorrentía y balance hídrico que inciden en su funcionamiento.

9.1.1 Cobertura del suelo.

La cobertura del suelo influye directamente en el comportamiento hidrológico de la cuenca, al controlar procesos como la infiltración y la escorrentía superficial. La figura 1 muestra el mapa de cobertura del suelo de la zona de estudio en Tunja, donde se identifica la distribución espacial de áreas urbanizadas, vegetación herbácea y arbustiva, y cultivos permanentes.

Figura 1

Mapa cobertura del suelo.



Nota: Elaborada por el autor

De acuerdo con el mapa de cobertura del suelo elaborado bajo la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, en la cuenca alta del río Chicamocha (zona Tunja) se identifican tres coberturas predominantes: zonas urbanizadas, cultivos permanentes y áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva. (Castellanos, 2010)

- Zonas urbanizadas (representadas en color rosado) corresponden a sectores donde la superficie del terreno ha sido ocupada por edificaciones, infraestructura vial y otros usos antrópicos continuos o discontinuos, concentrándose principalmente en el área urbana de Tunja y sus alrededores inmediatos.

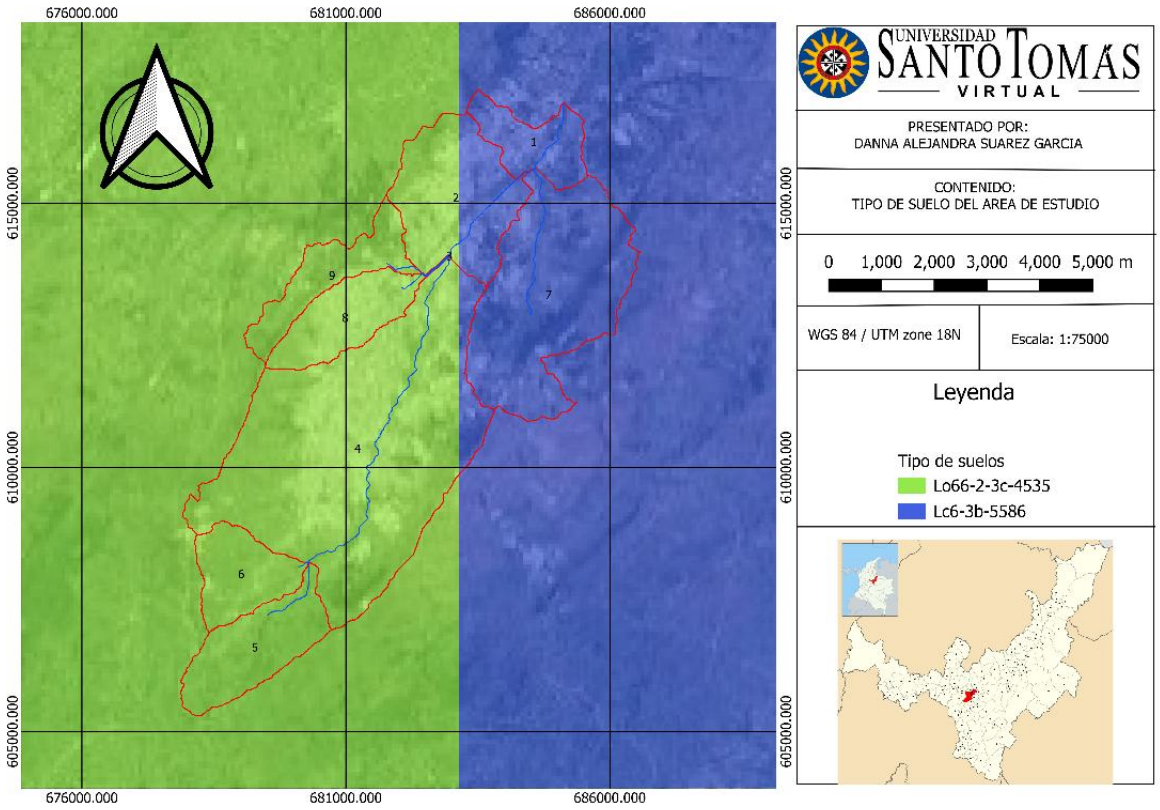
- Cultivos permanentes (en color amarillo) evidencian el aprovechamiento agrícola del territorio, asociado a especies de ciclo vegetativo largo como frutales o cultivos arbustivos.
- Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva (en color verde) representan zonas con cobertura natural o seminatural, localizadas principalmente en sectores de ladera y partes altas de la cuenca. Esta distribución espacial refleja un paisaje mixto, donde las actividades humanas coexisten con remanentes de vegetación natural, lo cual tiene implicaciones directas en los procesos de escorrentía, infiltración y regulación hídrica en el contexto del cambio climático.

9.1.2 Tipo de suelo.

El tipo de suelo condiciona la capacidad de infiltración, retención de agua y generación de escorrentía dentro de la cuenca. La figura 2 presenta el mapa de tipos de suelo de la zona de estudio, el cual permite identificar las principales unidades edáficas y su distribución espacial.

Figura 2

Tipo de suelo en la zona de estudio.



Nota: Elaborada por el autor

De acuerdo con la clasificación de suelos propuesta por la FAO, el área de estudio presenta dos unidades edáficas principales. La primera corresponde al código Lo66-2-3c-4535, identificada como clay loam (franco arcilloso). Este tipo de suelo se caracteriza por presentar una textura equilibrada, con proporciones relativamente similares de arena, limo y arcilla, lo que favorece simultáneamente la retención de humedad, la aireación del perfil y el desarrollo radicular. Los suelos franco-arcillosos presentan, en general, buena capacidad de almacenamiento de agua, fertilidad media a alta y estructura estable, lo que los hace versátiles para el uso agrícola, aunque requieren prácticas de manejo que eviten la compactación y la pérdida de estructura por acción erosiva.(FAO, 2006)

Por otro lado, la unidad Lc6-3b-5586 fue clasificada como clay (arcilloso). Este tipo de suelo posee una alta proporción de arcilla, condición que le permite retener grandes cantidades de agua y nutrientes, pero que a su vez reduce la permeabilidad y la infiltración, generando susceptibilidad al encharcamiento en periodos lluviosos. De acuerdo con la FAO, los suelos arcillosos presentan elevada plasticidad, lenta circulación de aire en el perfil y mayor tendencia a la compactación, lo que exige prácticas de manejo específicas para mejorar el drenaje y conservar la estructura del suelo.(Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006)

9.2 Caracterización geomorfológica.

Parámetros de forma de la cuenca:

Se tiene en cuenta la modelación en el software Qgis para determinar algunas de las variables:

- Área de la cuenca (A).

El área de la cuenca es de 2.71 km²

- Perímetro de la cuenca (P).

El perímetro de la cuenca es de 16.725 km

- Longitud del río principal (L).

Longitud del río principal 11.276 km

- Ancho promedio de la cuenca (Ap).

$$Ap = \frac{A}{L}$$

$$Ap = \frac{2.71}{11.276} = 0.24 \text{ km}$$

Ap = Ancho promedio de la cuenca.

A= Área de la cuenca (Km²).

L= Longitud del rio principal (Km).

- Factor forma. (Kf).

$$Kf = \frac{A}{l^2}$$

$$Kf = \frac{2.70}{11.276^2} = 0.021$$

Kf = Factor forma.

A = Área de la cuenca (Km²).

L= Longitud máxima de la cuenca (Km).

De acuerdo con la tabla 2 el factor de forma estimado para la cuenca del río chicamocha zona Tunja es de 0,021, lo que indica que se trata de una cuenca con una morfología muy alargada.

- Coeficiente de compacidad o índice de Graveluis (Kc).

$$Kc = 0.282 \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$$

$$Kc = 0.282 \left(\frac{16.725}{\sqrt{2.71}}\right) = 1.74$$

Kc = Coeficiente de compacidad o índice de Graveluis.

P= Perímetro de la cuenca (Km).

A= Área de la cuenca (Km²).

En la tabla 3 el coeficiente de compacidad obtenido es de 1,74, lo que refleja una morfología entre oval oblonga y rectangular oblonga, condición que se asocia con un menor grado de susceptibilidad frente a avenidas torrenciales.

9.2.1 Índice de alargamiento (La).

$$L_a = \frac{L_{máx}}{A_{máx}}$$

$$L_a = \frac{11.276}{13.33} = 0.84$$

La = Índice de alargamiento.

$L_{máx}$ = Longitud máxima de la cuenca (Km).

$A_{máx}$ = Ancho máximo de la cuenca (Km).

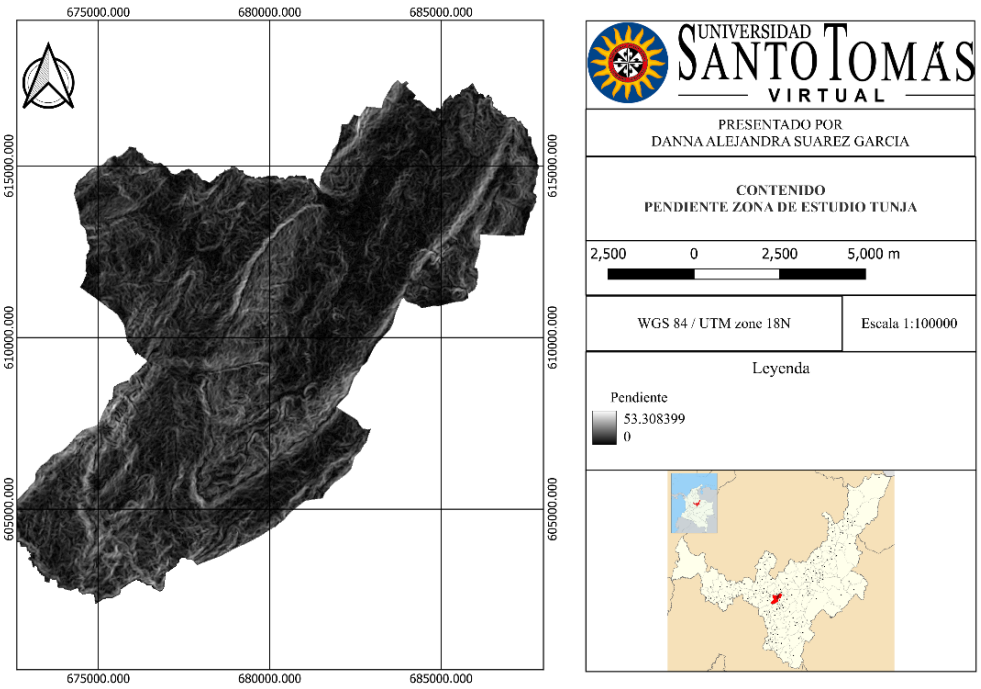
En la tabla 4 el índice de alargamiento calculado para la subzona hidrográfica del río Chicamocha es de 0.84, valor que permite clasificarla como una cuenca con una configuración poco alargada.

9.2.2 Pendiente media.

De acuerdo a la modelación realizada en Qgis se obtiene una pendiente media de 9.94%.

Figura 3

Mapa de pendiente



Nota: Elaborada por el autor

El mapa de pendientes muestra que el área de estudio presenta una predominancia de laderas con inclinaciones suaves a moderadas, con valores que oscilan desde zonas prácticamente planas hasta sectores localizados con pendientes fuertes que alcanzan los máximos registrados en el modelo. La pendiente media del 9,94% indica un relieve ondulado, donde la escorrentía superficial tiende a incrementarse en las laderas más marcadas, mientras que en las áreas de menor gradiente se favorecen los procesos de infiltración y acumulación de sedimentos. En términos generales, esta configuración sugiere un territorio con limitaciones moderadas para el uso agropecuario mecanizado en algunas zonas, y la necesidad de prácticas de manejo y conservación de suelos en las áreas más inclinadas para reducir el riesgo de erosión.

9.3 Caracterización de la red de drenaje

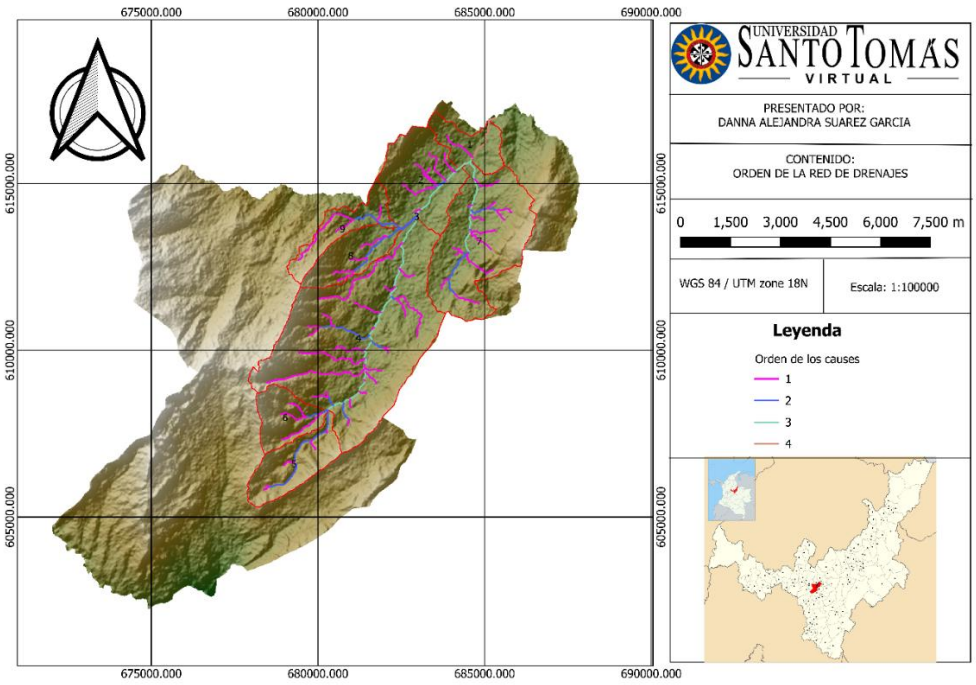
La caracterización de la red de drenaje de la cuenca alta del río Chicamocha constituye un elemento esencial para comprender el comportamiento hidrológico del territorio y los procesos que determinan la generación, concentración y transporte del flujo superficial.

9.4 Orden de las corrientes de agua en la cuenca Chicamocha zona Tunja.

El orden de las corrientes de agua permite caracterizar la estructura y jerarquía de la red de drenaje, así como inferir el comportamiento hidrológico de la cuenca. La Figura 4 presenta el orden de la red de drenajes en la cuenca del río Chicamocha, zona Tunja.

Figura 4

Orden de la red de drenajes en la cuenca del río Chicamocha.



Nota: Elaborada por el autor

En la Figura anterior, se representa el orden de la red de drenaje de la cuenca alta del río Chicamocha zona de estudio Tunja, obtenida a partir del modelo digital de elevación y la delimitación hidrológica del área de estudio. Se identifican cauces de primer a cuarto orden, siguiendo la jerarquización de Strahler (1957). Los cauces de primer orden (en color fucsia) corresponden a pequeños afluentes ubicados en las zonas altas y de mayor pendiente, que recogen el escurrimiento superficial inicial. Los cauces de segundo y tercer orden (en tonos azul y verde) representan la confluencia progresiva de los drenajes primarios, consolidando el flujo hacia el cauce principal. Finalmente, los cauces de cuarto orden (en color oliva) conforman el sistema principal de drenaje, que atraviesa longitudinalmente la cuenca en dirección norte-sur. Esta configuración evidencia una red de drenaje de tipo dendrítico, característica de áreas con litología homogénea y pendientes moderadas a fuertes, lo que sugiere un buen desarrollo hidrológico y una respuesta rápida del sistema ante eventos de precipitación.

9.5 Características hidrológicas y climáticas

El análisis de las características hidrológicas y climáticas de la cuenca alta del río Chicamocha constituye un componente central para comprender los procesos que determinan la disponibilidad, variabilidad y comportamiento del recurso hídrico en el territorio.

9.5.1 Análisis estadístico de la representatividad y tendencia climática.

A partir de los registros anuales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación promedio correspondientes al período 2014–2024, obtenidos de la estación meteorológica UPTC–IDEAM, se realizó un análisis estadístico con el fin de evaluar la representatividad y la tendencia temporal de las variables climáticas en la cuenca alta del río Chicamocha. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados del análisis de regresión y coeficiente de variación para series anuales de temperatura y precipitación (2014–2024)

Variable climática	Pendiente	Promedio anual	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Interpretación
Temperatura máxima (°C)	+0.092	19.24	0.43	2.24	Ligeramente creciente; alta estabilidad térmica.
Temperatura mínima (°C)	-0.048	8.85	0.41	4.63	Levemente decreciente; baja variabilidad
Precipitación (mm/año)	+2.02	51.72	13.75	26.58	Moderadamente creciente; variabilidad interanual media

Nota: Tabla elaborada por el autor

Los valores del coeficiente de variación (CV) se emplearon para determinar la representatividad estadística de las series anuales, en concordancia con las recomendaciones metodológicas del IDEAM (2014) y la Organización Meteorológica Mundial – WMO (2017), que reconocen este parámetro como una medida válida para evaluar la estabilidad de series hidroclimáticas. Los umbrales de clasificación fueron adaptados al contexto andino, considerando que valores menores al 20 % indican una baja variabilidad y alta representatividad, mientras que valores entre 20 % y 30 % reflejan una variabilidad moderada.

Bajo este criterio, las series de temperatura máxima y mínima, con CV inferiores al 5 %, evidencian una alta estabilidad térmica y una gran consistencia estadística, mientras que la precipitación presentó un CV de 26.6 %, que denota una variabilidad interanual moderada, característica de las zonas altoandinas influenciadas por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y los fenómenos ENSO (El Niño – La Niña).

En cuanto a la tendencia temporal, el análisis de Regresión Lineal Simple mostró una pendiente positiva de +0.092 °C/año para la temperatura máxima y una pendiente negativa de –0.048 °C/año para la temperatura mínima, lo que evidencia un aumento gradual de las temperaturas diurnas y una ligera disminución de las nocturnas, ampliando el rango térmico anual. Por su parte, la precipitación anual presentó una pendiente positiva de +2.02 mm/año, indicando una tendencia creciente leve en el período 2014–2024.

En conjunto, los resultados confirman que los registros anuales de la estación UPTC–IDEAM poseen una alta representatividad estadística y consistencia temporal, lo cual valida su uso en la modelación hidrológica y permite identificar tendencias climáticas incipientes asociadas a procesos de variabilidad y cambio climático en la cuenca alta del río Chicamocha.

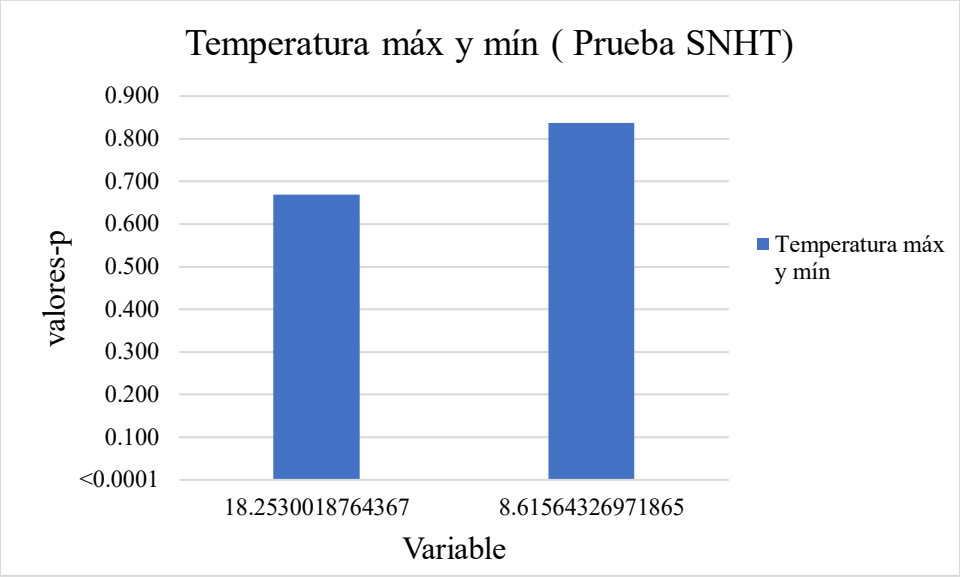
9.5.2 Test de homogeneidad.

En esta sección se evalúa la consistencia de las series históricas de precipitación, temperatura y caudal mediante las pruebas Pettitt y SNHT (Standard Normal Homogeneity Test), las cuales permiten identificar posibles rupturas derivadas de factores no climáticos, como cambios en la ubicación de las estaciones, sustitución de instrumentos o modificaciones en las condiciones de medición.

- Temperatura máxima y mínima.

Figura 5

Prueba SNHT temperatura máxima y mínima.



Nota: Elaborada por el autor.

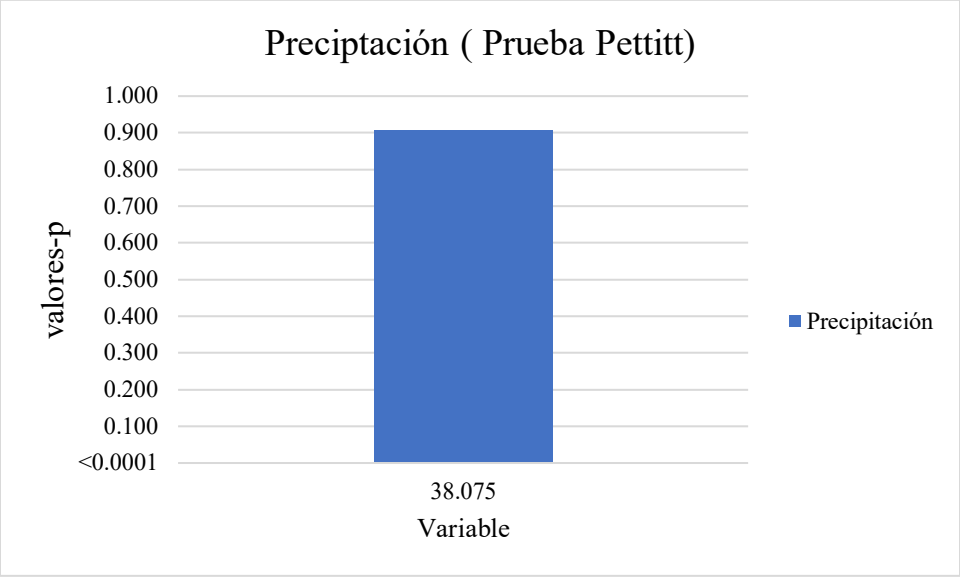
Para las series de temperatura máxima y mínima se aplicó el Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), una prueba ampliamente utilizada en estudios climatológicos debido a su sensibilidad para identificar cambios graduales en la media bajo el supuesto de normalidad.

Los valores p obtenidos para ambas variables ($p = 0.669$ para temperatura máxima y $p = 0.837$ para temperatura mínima) muestran que no existen evidencias significativas de un cambio en la media de las series de temperatura. Esto sugiere que ambas series pueden considerarse homogéneas, sin indicios de rupturas o cambios sistemáticos en su comportamiento a lo largo del periodo evaluado.

- Precipitación

Figura 6

Prueba Pettitt precipitación



Nota: Elaborada por el autor.

Para la serie de precipitación se aplicó la prueba no paramétrica de Pettitt, la cual es especialmente adecuada para detectar rupturas abruptas en series hidrológicas que no cumplen el supuesto de normalidad. Esta prueba es robusta ante valores atípicos y distribuciones asimétricas, lo que la convierte en una herramienta apropiada para analizar series pluviométricas.

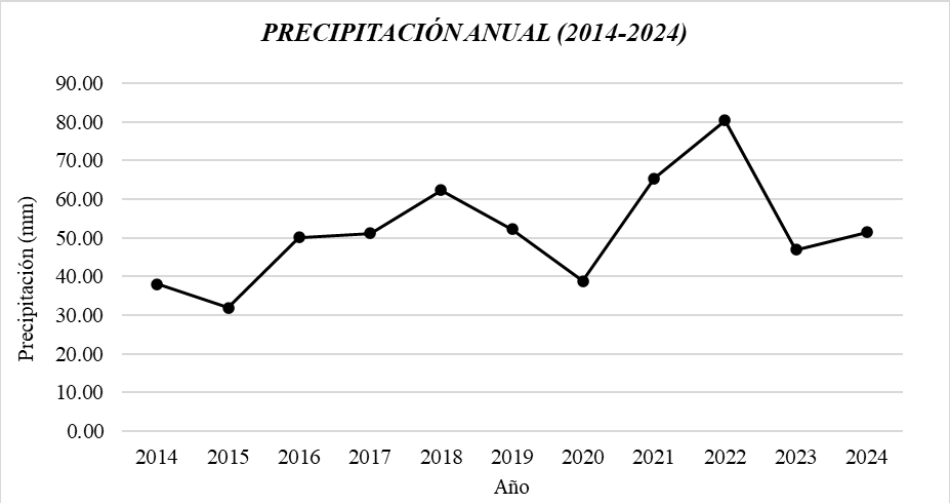
El valor p obtenido (p = 0.905) indica que no existe evidencia estadísticamente significativa de un cambio puntual en la mediana de la serie. En otras palabras, no se detectan rupturas notables en la precipitación durante el periodo analizado, por lo que la serie puede considerarse estadísticamente homogénea según este método.

9.5.3 Precipitación.

La Figura 7 presenta la variación de la precipitación anual registrada en la estación UPTC (Tunja) durante el periodo 2014–2024, a partir de la consolidación de los datos mensuales obtenidos del IDEAM. Esta información permite analizar la tendencia general y el comportamiento interanual de las lluvias en la cuenca alta del río Chicamocha, con el fin de identificar periodos húmedos y secos relevantes para la evaluación hidrológica de la zona de estudio.

Figura 7

Precipitación anual registrada en la estación UPTC de Tunja.



Nota: Elaborada por el autor.

A partir de la Figura se observa que la precipitación anual presentó una alta variabilidad entre los años analizados, sin una tendencia definida de incremento o disminución sostenida. Los años 2018, 2021 y 2022 mostraron los valores más altos de precipitación, superando los 60 mm, mientras que 2015, 2019 y 2020 registraron los mínimos acumulados. Este comportamiento

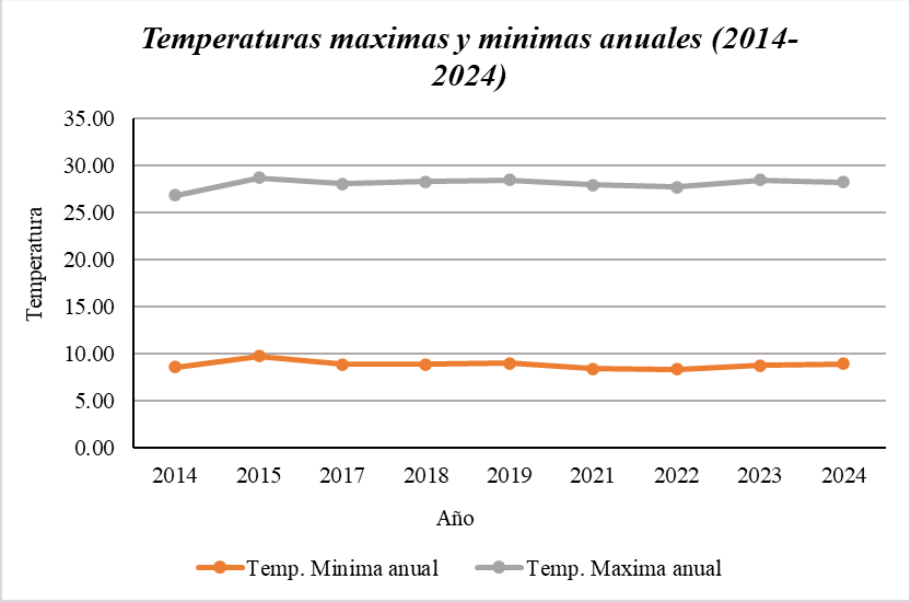
refleja la influencia de los fenómenos climáticos de gran escala, como El Niño y La Niña, que alteran significativamente los patrones de lluvia en la región andina. En conjunto, la serie evidencia una alternancia entre periodos secos y húmedos, característica de un régimen pluviométrico variable que incide directamente en la disponibilidad y gestión del recurso hídrico en la cuenca.

9.5.4 Temperatura.

La temperatura es una variable climática clave que influye en los procesos de evapotranspiración y en la dinámica hidrológica de la cuenca. La Figura 8 presenta la evolución de las temperaturas máximas y mínimas anuales durante el periodo 2014–2024 en la zona de estudio.

Figura 8

Temperaturas máximas y mínimas anuales.



Nota: Elaborada por el autor

De acuerdo con los datos de temperatura máxima y mínima media anual obtenidos del IDEAM para el periodo 2014–2024, se observa una tendencia general de estabilidad térmica en la zona de estudio. Las temperaturas máximas anuales presentan valores promedio cercanos a 26–28 °C, con ligeras variaciones interanuales que no superan los 2 °C, evidenciando condiciones térmicas relativamente constantes a lo largo de la década. Por su parte, las temperaturas mínimas anuales oscilan entre 8 y 10 °C, mostrando un comportamiento igualmente estable con leves fluctuaciones hacia 2015 y 2023. En conjunto, los registros indican que no se han presentado cambios significativos en los extremos térmicos anuales durante el periodo analizado, lo cual sugiere una tendencia climática moderada y estacionaria, característica de las condiciones térmicas típicas de la cuenca alta del río Chicamocha.

9.5.5 Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI).

Durante el periodo de análisis comprendido entre 2014 y 2024, el Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI) calculado a partir de los datos anuales de precipitación de la estación UPTC–IDEAM (Tunja) evidenció una marcada variabilidad interanual, con alternancia entre años húmedos y secos. Los valores del RAI oscilaron entre –13.63 (2015) y +23.67 (2022), reflejando la ocurrencia de periodos de déficit y exceso de lluvia asociados a las fases de los fenómenos ENSO (El Niño y La Niña).

En términos generales, los años 2014, 2015, 2017, 2020 y 2023 presentaron condiciones secas o muy secas, mientras que los años 2018, 2019, 2021 y 2022 se caracterizaron por anomalías positivas que indican un exceso de precipitación. Estos resultados sugieren que, dentro del periodo de estudio, las condiciones hídricas en la cuenca alta del río Chicamocha son altamente variables, con predominio de eventos húmedos intensos en la fase final (2021–2022), seguidos de un retorno a la normalidad en 2024.

Tabla 7

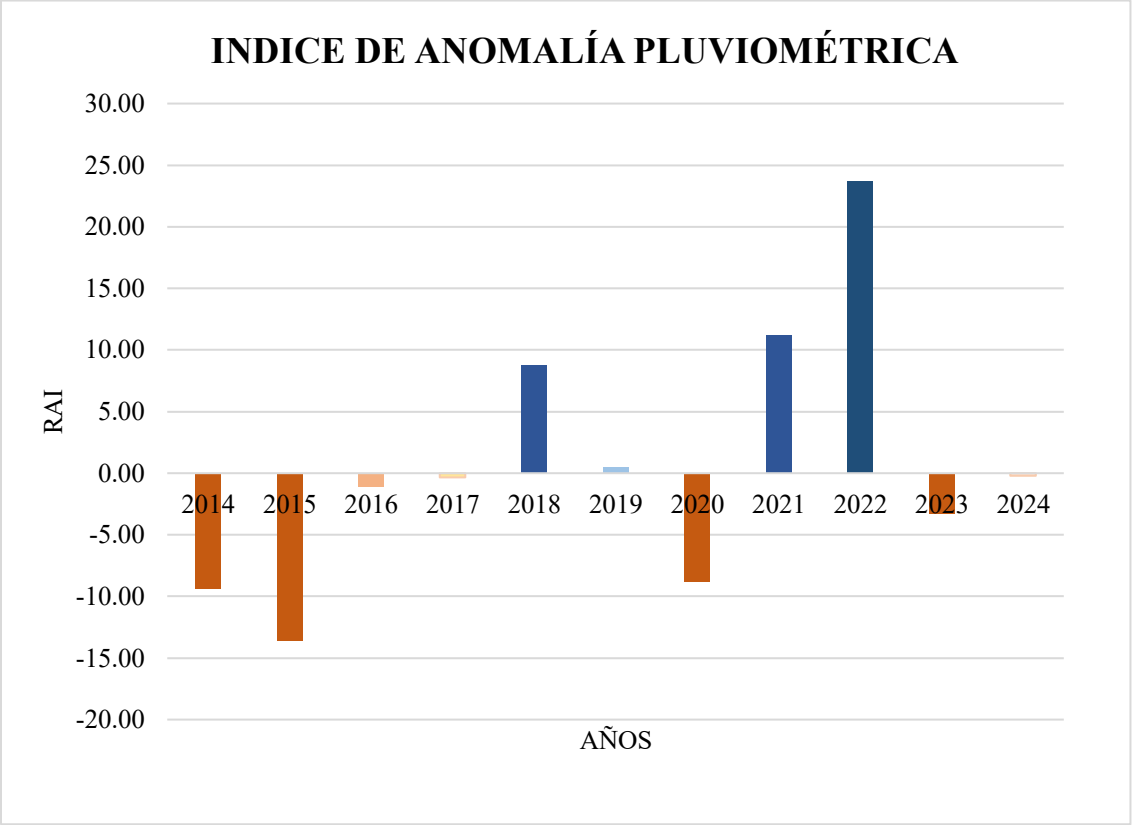
Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI) para la estación UPTC–Tunja (2014–2024)

Año	RAI	Categoría según Lloyd-Hughes & Saunders (2002)
2014	-9.37	Sequía extrema
2015	-13.63	Sequía extrema
2016	-1.06	Sequía moderada
2017	-0.34	Sequía leve
2018	8.79	Extremadamente húmedo
2019	0.45	Ligeramente húmedo
2020	-8.82	Sequía extrema
2021	11.23	Extremadamente húmedo
2022	23.67	Extremadamente húmedo
2023	-3.26	Sequía extrema
2024	-0.21	Sequía leve

Nota: tomado de UPTC, 2025.

Figura 9

Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI) para la estación UPTC–Tunja (2014–2024



Nota. Elaborada por el autor.

9.5.6 Matriz de riesgo hídrico cualitativa.

Con el fin de sintetizar los efectos de la variabilidad climática sobre los sistemas analizados, se elaboró una Matriz de Riesgo Hídrico Cualitativa, que combina la frecuencia de ocurrencia de los eventos extremos (probabilidad) con su nivel de impacto sobre los principales sistemas de la cuenca alta del río Chicamocha: acueducto, agricultura y ecosistemas.

Esta herramienta permite representar de manera visual la relación entre la probabilidad de que se presente un evento extremo (sequía o exceso hídrico) y la magnitud de las consecuencias

que este puede generar. La matriz se estructuró bajo los criterios de impacto menor, moderado, mayor y catastrófico, y los niveles de probabilidad improbable, posible y probable, los cuales se clasificaron mediante una escala de colores: verde (bajo riesgo), amarillo (medio), naranja (alto) y rojo (muy alto).

Figura 10

Matriz de riesgo hídrico cualitativa.

	Menor	**Moderado**	**Mayor**	**Catastrófico**
Improbable				
Posible			**Riesgo 3**	
Probable			**Riesgo 1**	**Riesgo 2**

Nota: Elaborada por el autor.

Los resultados obtenidos muestran tres escenarios principales de riesgo:

- Riesgo 1 – Acueducto: ubicado en la categoría probable–mayor, lo que indica un riesgo alto. Este resultado se asocia a la frecuencia de sequías y lluvias extremas que afectan tanto la cantidad como la calidad del agua captada para abastecimiento urbano y rural.
- Riesgo 2 – Agricultura: clasificado en la categoría probable–catastrófico, correspondiente a un riesgo muy alto. La alta dependencia del régimen de lluvias y la limitada infraestructura de riego incrementan la vulnerabilidad ante la variabilidad climática, afectando la producción y la estabilidad económica local.

- Riesgo 3 – Ecosistemas: ubicado en la categoría posible–mayor, que representa un riesgo medio–alto. Los ecosistemas naturales experimentan estrés hídrico, pérdida de cobertura vegetal y procesos erosivos ante los eventos climáticos extremos.

En conjunto, la matriz evidencia que los riesgos hídricos más críticos se concentran en los sistemas productivos y de abastecimiento, mientras que los ecosistemas, aunque poseen cierta capacidad de recuperación, mantienen una vulnerabilidad significativa.

9.6 Modelación hidrológica y escenarios climáticos.

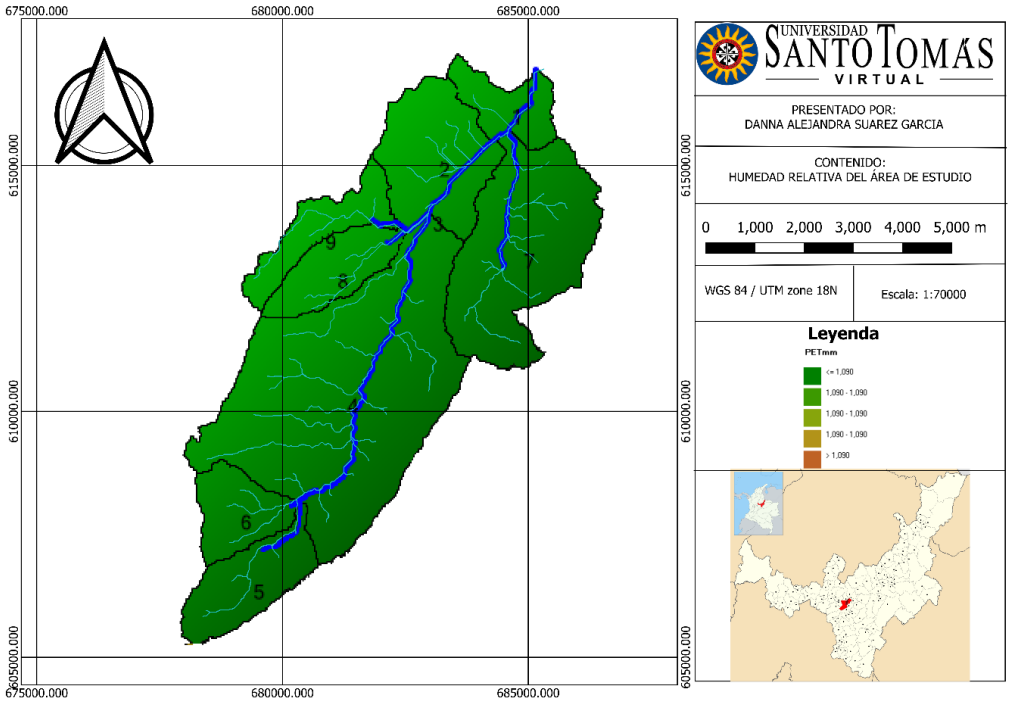
La modelación hidrológica y el análisis de escenarios climáticos constituyen componentes esenciales para evaluar la respuesta de la cuenca alta del río Chicamocha frente a las variaciones actuales. Esta sección integra el uso de herramientas de simulación hidrológica con el fin de analizar cómo los cambios en la precipitación, temperatura y demás variables ambientales influyen en la generación de caudal, el balance hídrico y la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca.

9.6.1 Humedad relativa.

La humedad relativa influye en los procesos de evapotranspiración y en el balance hídrico de la cuenca. La figura correspondiente presenta la variación de la humedad relativa durante el periodo de análisis.

Figura 11

Mapa de humedad relativa del área de estudio.



Nota: Elaborada por el autor

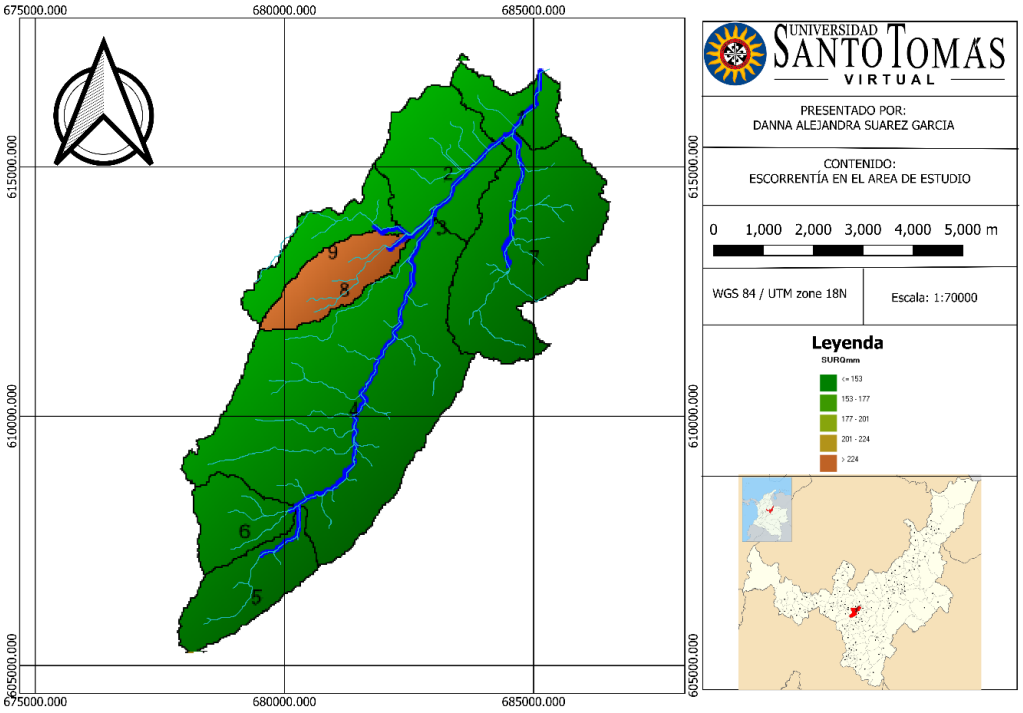
En el mapa de humedad relativa se evidencia que la cuenca presenta valores predominantemente inferiores a 1.090, lo que indica condiciones de humedad moderada a baja y una disponibilidad hídrica relativamente uniforme. Las zonas con mayor humedad se ubican hacia las partes altas del norte y occidente, donde la evapotranspiración potencial disminuye, mientras que las áreas medias y bajas presentan ligeramente menores niveles de humedad debido a mayor radiación solar y escurrimiento superficial. En conjunto, el comportamiento del índice evidencia un régimen hídrico estable, característico de una cuenca con baja variabilidad espacial en su balance de humedad.

9.6.2 Escorrentía.

La escorrentía superficial refleja la respuesta hidrológica de la cuenca frente a los eventos de precipitación y las condiciones físicas del territorio. La figura 12 correspondiente muestra la escorrentía estimada para la zona de estudio.

Figura 12

Mapa de escorrentía en el Área de Estudio.



Nota: Elaborada por el autor

En el mapa de escorrentía se evidencia que la mayor parte de la cuenca presenta valores bajos a moderados de escorrentía (<153 mm), lo que indica un predominio de infiltración y almacenamiento subterráneo frente al escurrimiento superficial. Sin embargo, se identifica una zona puntual con valores altos (>224 mm) ubicada en el sector central-occidental (subcuenca 8 y

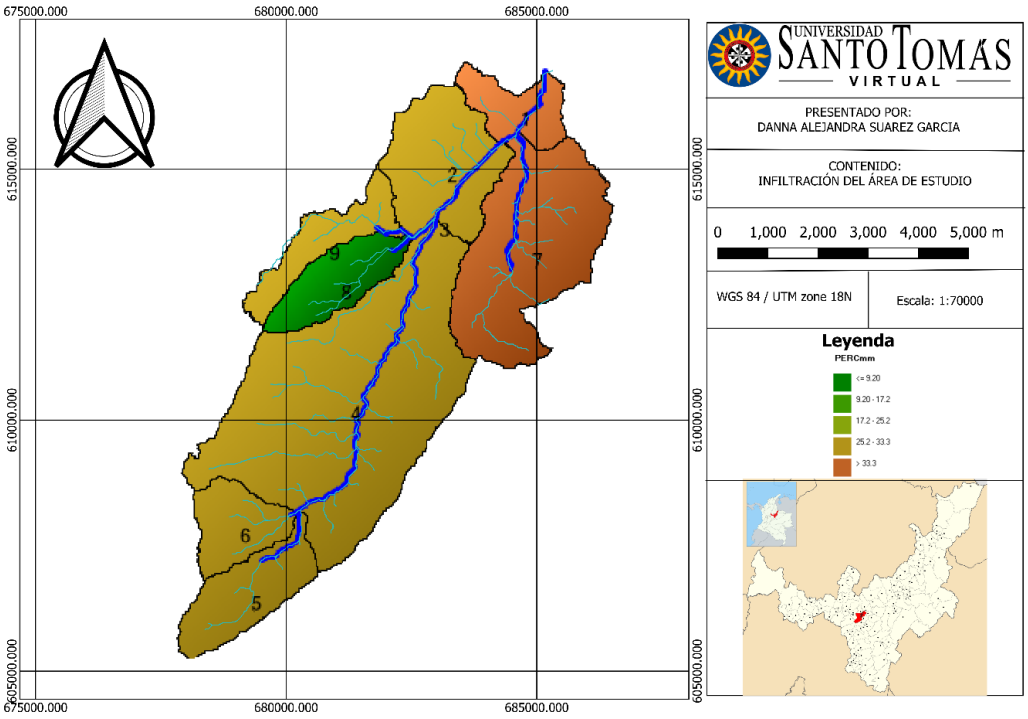
parte de la 9), donde las condiciones topográficas y de pendiente favorecen una mayor generación de escorrentía. Esto puede estar asociado a suelos menos permeables o a una menor cobertura vegetal, lo que incrementa el flujo superficial. En conjunto, el comportamiento del mapa evidencia que la cuenca posee baja susceptibilidad a la escorrentía generalizada, concentrándose los mayores aportes superficiales en sectores específicos de relieve pronunciado y menor infiltración.

9.6.3 Infiltración.

La infiltración controla la recarga hídrica y modula la generación de escorrentía superficial en la cuenca. La figura correspondiente presenta la infiltración estimada en la zona de estudio.

Figura 13

Mapa de infiltración del Área de estudio.



Nota: Elaborada por el autor

En el mapa se evidencia la distribución espacial de la infiltración (PER [mm]) dentro de la cuenca alta del río Chicamocha. Se observa una marcada variabilidad espacial, con valores que van desde menos de 90 mm hasta más de 333 mm anuales. Las zonas con mayor infiltración (tonalidades verdes, >252 mm) se concentran principalmente en el sector noroccidental de la cuenca, donde la pendiente es más suave y los suelos presentan mayor permeabilidad, favoreciendo el ingreso del agua al subsuelo.

Por el contrario, las áreas con baja infiltración (tonalidades marrones y anaranjadas, <172 mm) se localizan hacia el noreste y parte central-oriental de la cuenca, asociadas a terrenos más inclinados, con suelos menos permeables y mayor escorrentía superficial.

En conjunto, el patrón espacial sugiere que la cuenca presenta una infiltración moderada a baja en la mayor parte del territorio, lo que podría limitar la recarga de acuíferos y aumentar la

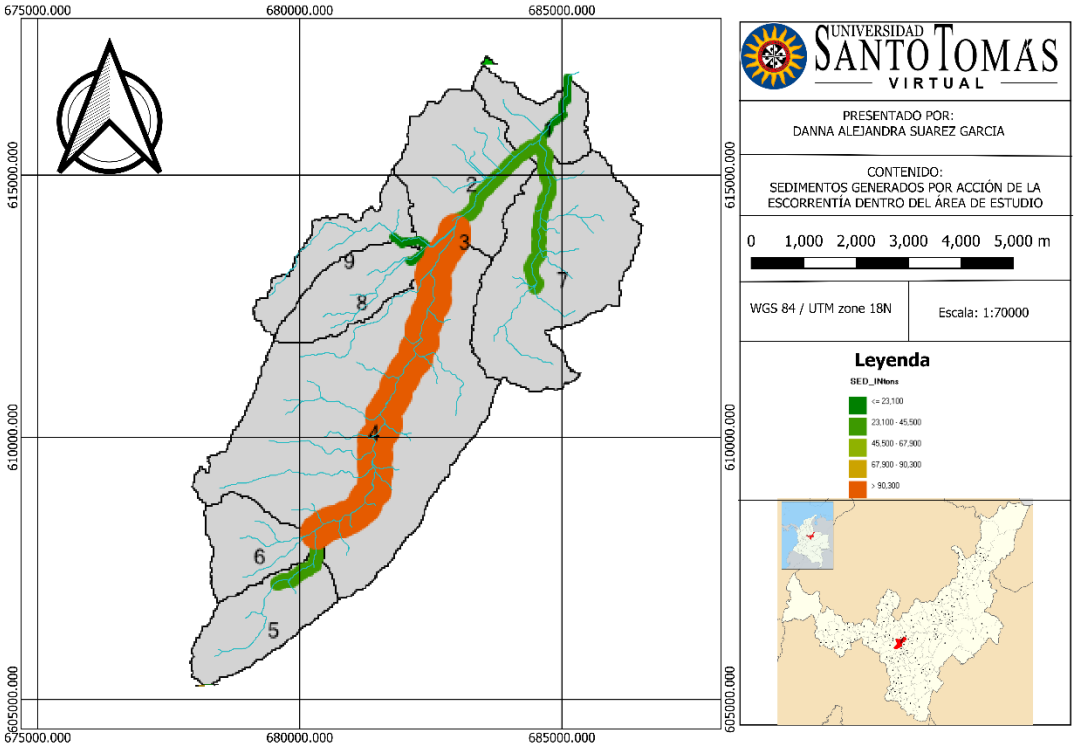
escorrentía directa en eventos de lluvia intensa. Esto resalta la importancia de implementar estrategias de manejo del suelo y conservación de la cobertura vegetal para favorecer la recarga hídrica y mitigar procesos de erosión.

9.6.4 Sedimentos de ingreso.

El ingreso de sedimentos es un indicador del grado de erosión y del transporte sólido asociado a la dinámica hidrológica de la cuenca. La figura correspondiente muestra los sedimentos de ingreso estimados en la zona de estudio.

Figura 14

Mapa de sedimentos generados por acción de la escorrentía del área de estudio.



Nota: Elaborada por el autor

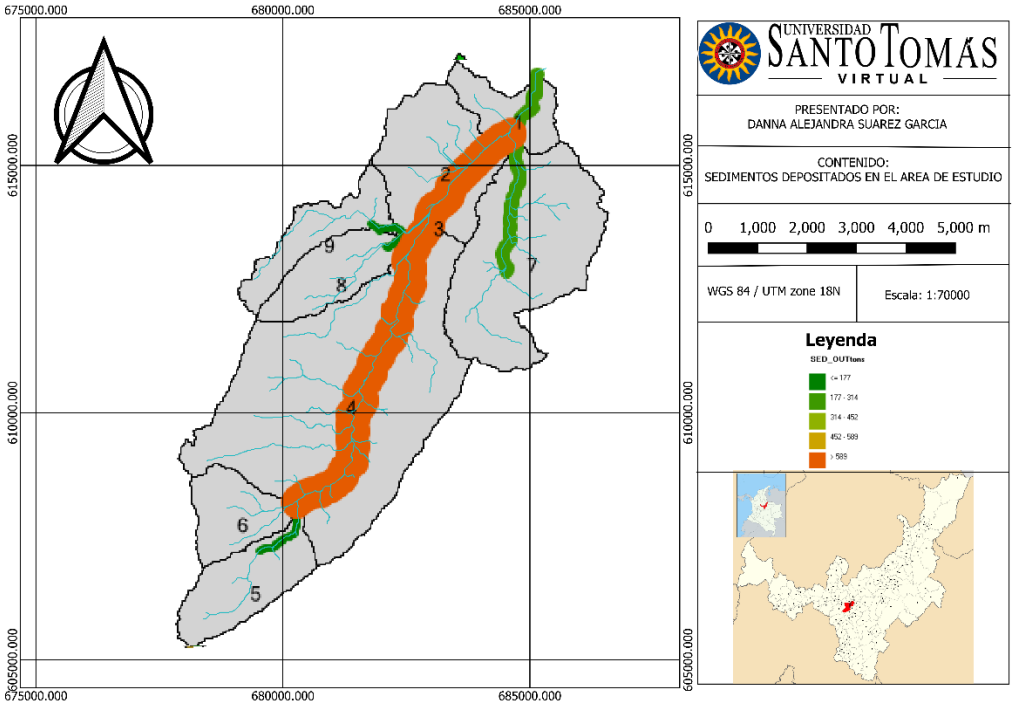
Los resultados obtenidos a partir de la modelación de sedimentos evidencian un comportamiento espacial diferenciado entre las zonas de generación y depósito dentro de la cuenca alta del río Chicamocha, se observa una concentración elevada en el eje central de la cuenca, representado en tonos anaranjados, con valores superiores a 90.300 t/ha. Esta zona coincide con las áreas de mayor pendiente y menor cobertura vegetal, lo que favorece la erosión superficial y el arrastre de partículas hacia los cauces principales. Las áreas en tonos verdes, ubicadas hacia el norte y el occidente, presentan valores menores (<21.100 t/ha), asociados a pendientes suaves y mayor cobertura vegetal que reduce la escorrentía y la pérdida de suelo.

9.6.5 Sedimentos de salida.

Los sedimentos de salida representan la respuesta integrada de los procesos de erosión, transporte y deposición dentro de la cuenca. La figura correspondiente presenta los sedimentos de salida estimados.

Figura 15

Mapa sedimentos depositados en el área de estudio.



Nota: Elaborada por el autor

El mapa muestra una tendencia espacial similar, con la mayor acumulación también concentrada en el eje central de la cuenca y en los cauces principales. Los valores más altos (>589 t/ha) se localizan en las zonas de confluencia de drenajes y en sectores de pendiente moderada a baja, donde la velocidad del flujo disminuye y se facilita la sedimentación. En contraste, las zonas altas y laterales, en tonos verdes, presentan bajos niveles de depósito (<177 t/ha), lo que sugiere que allí predomina el proceso erosivo sobre el deposicional.

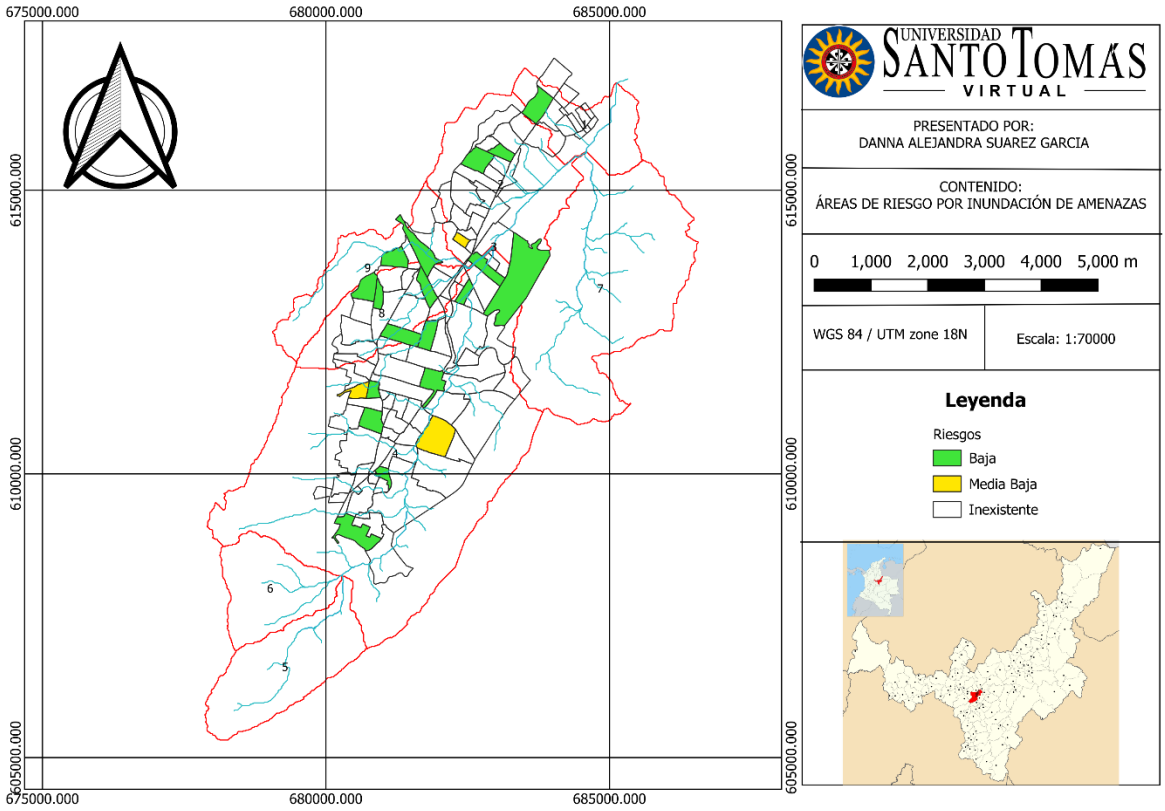
9.6.6 Áreas de riesgo por inundación de amenazas.

La delimitación de áreas de riesgo por inundación permite identificar los sectores del territorio con mayor susceptibilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos. En esta sección se presentan los resultados del análisis espacial de las amenazas por inundación en la

cuenca alta del río Chicamocha, a partir de la integración de variables hidrológicas, geomorfológicas y de cobertura del suelo.

Figura 16

Mapa áreas de riesgo por inundación de amenazas en el área de estudio.



Nota: Elaborada por el autor

Los resultados muestran que las áreas con riesgo bajo (color verde) se localizan principalmente a lo largo del eje central y occidental de la cuenca, coincidiendo con los tramos medios de los afluentes secundarios y sectores cercanos a los cursos principales. Estas zonas, aunque presentan pendientes moderadas, pueden experimentar anegamientos temporales durante

periodos de precipitación intensa, especialmente en suelos con cobertura agrícola o pastizales que reducen la infiltración.

Las áreas con riesgo medio-bajo (color amarillo) se distribuyen de manera puntual en la parte central y sur de la cuenca. Estas zonas corresponden a sectores donde la proximidad a los cauces, la topografía suavemente ondulada y la escasa cobertura vegetal aumentan la susceptibilidad a inundaciones locales. Aunque no se identifican eventos de gran magnitud, estas áreas requieren medidas de control de escorrentía y conservación del suelo para evitar la intensificación del riesgo.

Por su parte, las áreas sin evidencia de riesgo (color gris) se concentran en las partes altas y en los sectores con pendientes pronunciadas o con cobertura forestal, donde la capacidad de drenaje natural es mayor y el flujo superficial se evacúa rápidamente. Estas zonas cumplen un papel fundamental en la regulación hídrica y en la recarga de acuíferos, contribuyendo a mitigar los efectos de las lluvias intensas en las partes bajas de la cuenca.

9.6.7 Desarrollo de escenarios climáticos prospectivos.

- Proyecciones de Temperatura Media °C

En el escenario SSP2-4.5, se espera un aumento constante y significativo de la temperatura a lo largo del siglo, un patrón que domina en casi todos los escenarios a nivel global (Raichi et al., 2017)

Tabla 8

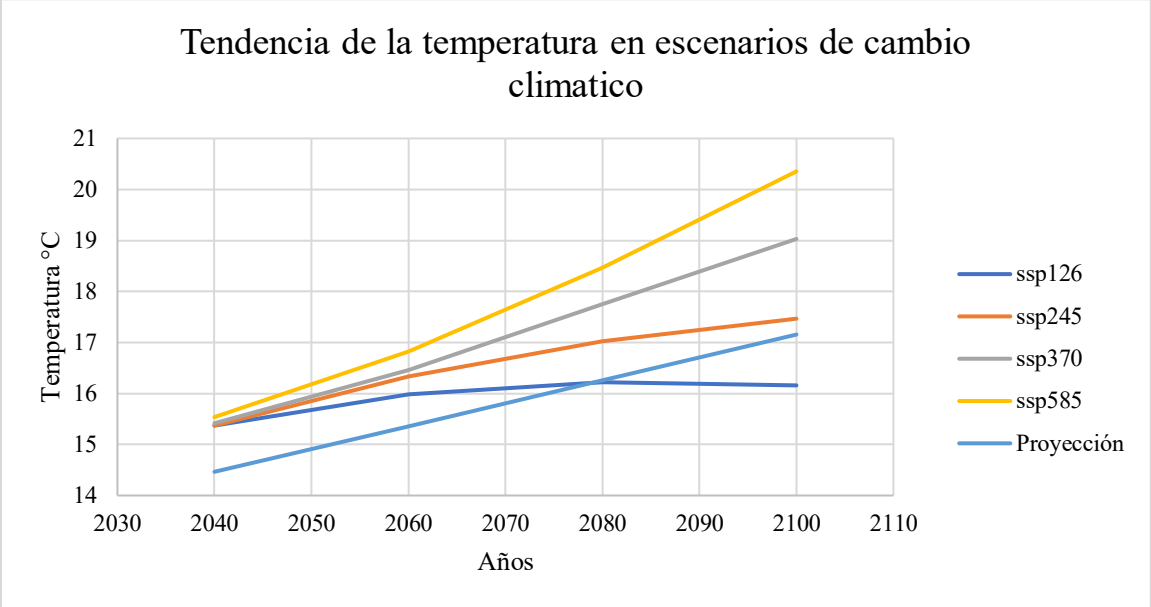
Proyecciones de temperatura medio °C

Período	Proyección SSP2-4.5 (°C)	Proyección (Regresión Local °C)	Análisis
2021-2040	15.37	14.46	El calentamiento inicial proyectado por WorldClim es superior al de la tendencia marcando una fase de calentamiento regional acelerado.
2041-2060	16.33	15.36	La brecha se mantiene. Se espera que la temperatura supere los16 **°C** en el promedio regional, impactando la demanda hídrica por evapotranspiración.
2061-2080	17.02	16.26	El calentamiento cruza el umbral de los 17 **°C** en las proyecciones del SSP2-4.5. Este aumento es sustancial y afectará seriamente la vocación agrícola.
2081-2100	17.47	17.16	El aumento de temperatura es máximo, afectando la evapotranspiración y, por ende, la disponibilidad de agua superficial, impactando la agricultura y los ecosistemas locales (Neill et al., 2017)

Nota: Elaborada por el autor

Figura 17

Tendencia de la temperatura en escenarios de cambio climático en la zona de estudio.



Nota: Elaborada por el autor

Implicaciones de la Temperatura:

- Riesgos para la Agricultura: Un aumento constante de la temperatura, especialmente en una región con vocación agrícola como Boyacá, puede reducir los rendimientos de cultivos sensibles al calor o alterar los ciclos fenológicos (Basttisti & Naylor, 2009).
- Seguridad Hídrica: La mayor demanda atmosférica de agua (evapotranspiración) reducirá la humedad efectiva del suelo, exacerbando el estrés hídrico incluso sin una reducción en la precipitación total.
- Salud Pública: Temperaturas más altas pueden incrementar el riesgo de olas de calor y alterar la distribución de vectores de enfermedades.

Proyecciones de Precipitación (mm/año)

La precipitación bajo el SSP2-4.5 presenta típicamente una mayor variabilidad regional y estacional que la temperatura. La tendencia para Tunja, tal como lo reflejan los datos, indica un ligero aumento en el volumen total, pero la crítica se centra en la distribución.

Tabla 9

Proyecciones de precipitación (mm/año)

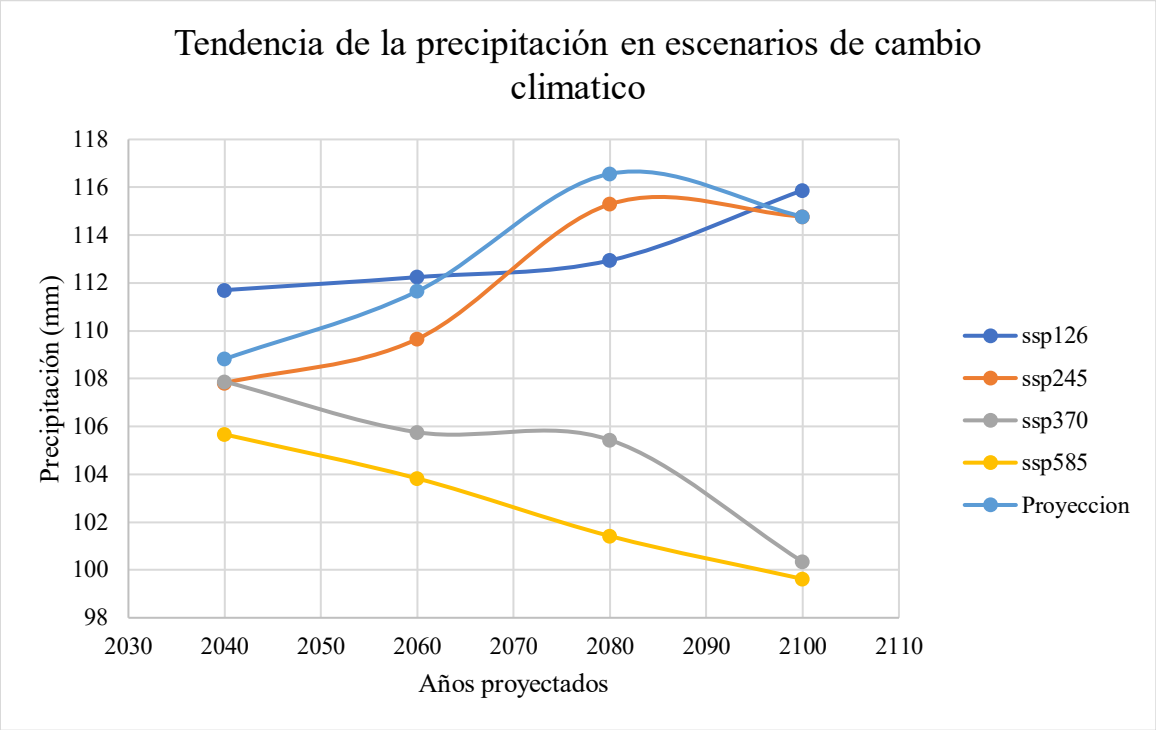
Período	Proyección SSP2-4.5 (mm/año)	Proyección (Regresión Local) (mm/año)	Análisis
2021-2040	107.82	108.82	La precipitación se mantiene cerca de los valores históricos en el corto plazo, sugiriendo condiciones manejables.
2041-2060	109.66	111.65	La tendencia local y SSP2-4.5 muestran un ligero incremento en la precipitación anual total.
2061-2080	115.29	116.56	El volumen anual alcanza su punto más alto, lo cual, combinado con altas temperaturas, sugiere mayor energía en el ciclo hídrico.
2081-2100	114.77	114.77	La precipitación se estabiliza. La tendencia crítica no es necesariamente el cambio en el volumen anual, sino la intensidad y la distribución. El aumento de la temperatura acelera el ciclo

	hidrológico, llevando a períodos de sequía más intensos, interrumpidos por eventos de precipitación extrema.(Seneviratne et al., 2021)

Nota: Elaborada por el autor

Figura 18

Tendencia de la precipitación en escenarios de cambio climático.



Nota: Elaborada por el autor

Implicaciones de la Precipitación:

- Riesgo de Extremos: La intensificación del ciclo hídrico eleva el riesgo de inundaciones localizadas debido a lluvias torrenciales y, al mismo tiempo, aumenta el riesgo de sequías

hidrológicas (debido al aumento de la evapotranspiración), impactando la seguridad hídrica de la ciudad.

- Gestión del Recurso Hídrico: Se requerirán estrategias más robustas para la recolección de agua, el almacenamiento, y la gestión del riesgo de desastres, priorizando obras de infraestructura de drenaje pluvial que soporten intensidades históricamente inéditas.

La ligera diferencia entre los datos de WorldClim y la estación local es un aspecto metodológico fundamental. La baja resolución espacial de los modelos climáticos globales (GCMs) que alimentan WorldClim tiende a suavizar los extremos del terreno (como los Andes), lo que explica por qué los valores extraídos de los rásters (que representan un promedio regional) difieren de una estación puntal con microclimas específicos como Tunja. La concordancia en la tendencia (la alineación con SSP2-4.5) es el hallazgo más valioso, pues sugiere una validación de la trayectoria climática regional.

9.7 Discusión crítica de resultados.

Los resultados obtenidos para la cuenca alta del río Chicamocha evidencian una dinámica climática e hidrológica caracterizada por un incremento acumulado de la temperatura media de +0,26 °C por década y una reducción de la precipitación anual cercana al –4,8 % durante el periodo 2014–2024, lo cual refleja una tendencia progresiva hacia condiciones más cálidas y secas en el municipio de Tunja. Estos hallazgos se alinean con lo planteado por Garavito & Caro (2018), quienes identifican procesos de disminución de la precipitación en la cuenca alta asociados al debilitamiento del régimen estacional tradicional y al aumento de la variabilidad climática. Esta coherencia respalda la representatividad climática del periodo analizado y confirma una transición local hacia condiciones más variables y menos predecibles.

Esta tendencia climática se manifiesta de manera más detallada al analizar la variabilidad intraanual de la precipitación, particularmente a través del Índice de Anomalía Pluviométrica (RAI). En este indicador se identifican al menos tres periodos secos intensos (2015, 2018 y 2023), los cuales coinciden con episodios regionales de déficit hídrico reportados por Bedoya et al. (2010) en la Segunda Comunicación Nacional, donde se señala que los sistemas de montaña presentan una mayor sensibilidad térmica e hídrica frente al cambio climático. El cruce entre el RAI y la matriz de riesgo climático confirma una alta vulnerabilidad del sistema de abastecimiento de Tunja, especialmente durante años con anomalías negativas superiores a –1,5.

Las variaciones climáticas descritas se reflejan directamente en la respuesta hidrológica de la cuenca, tal como lo evidencian los resultados de la modelación QSWAT. Se observa que la escorrentía superficial disminuye entre 6 % y 12 % durante los periodos secos, mientras que la infiltración se reduce hasta en –9 % en zonas con alta presión antrópica y cobertura vegetal limitada. Este comportamiento coincide con los planteamientos de Hincapié et al. (2019), quienes reportan reducciones significativas de la escorrentía en territorios altoandinos bajo condiciones de aumento térmico y transformación del suelo. En conjunto, la evidencia local confirma la respuesta hidrológica esperada: a mayor temperatura, mayor evapotranspiración y menor disponibilidad de agua superficial, reduciendo la capacidad de regulación hídrica del sistema.

Esta alteración hidrológica también incide en los procesos de erosión y transporte de sedimentos, particularmente en áreas con pendientes elevadas. Las zonas con pendientes superiores al 15 % muestran incrementos del 14–22 % en los volúmenes de sedimentos exportados durante episodios de lluvia intensa, lo cual es consistente con lo documentado por

Manrique et al. (2007) para la cuenca alta del Chicamocha. La combinación de degradación del suelo y reducción de la cobertura vegetal incrementa la vulnerabilidad hídrica, mientras que las áreas con cobertura arbórea densa mantienen una mayor estabilidad hidrológica, reafirmando el papel estructural del paisaje en la regulación del recurso hídrico.

Como consecuencia de estos procesos combinados, la exposición hídrica se incrementa al analizar el riesgo de avenidas torrenciales e inundaciones**.** El modelo identifica un aumento entre el 12 % y el 19 % en las áreas actualmente susceptibles, especialmente en las zonas de ladera asociadas al río Jordán. Estos resultados son compatibles con los hallazgos de Rodríguez y Silva (2018), quienes reportan comportamientos hidrológicos similares en municipios de Boyacá caracterizados por pendientes marcadas y una gestión limitada de la cobertura vegetal.

Adicionalmente, el análisis conjunto de caudales y sedimentos permite profundizar en la comprensión del riesgo de inundación. Los sectores con mayores valores de sedimentos de ingreso y salida coinciden espacialmente con áreas de mayores caudales y escorrentía superficial, lo que sugiere una interacción directa entre erosión, transporte sólido y dinámica hidráulica. La acumulación de sedimentos en los cauces puede reducir la capacidad hidráulica, favoreciendo el aumento del nivel del agua y, en consecuencia, incrementando la probabilidad de desbordamientos durante eventos de precipitación intensa.

Bajo este contexto histórico y funcional del sistema hidrológico, resulta pertinente analizar posibles trayectorias de comportamiento futuro, a partir de escenarios climáticos de referencia. El aumento proyectado de +1,2 °C a +1,8 °C y la disminución potencial de la precipitación entre –8 % y –15 %, según escenarios de tendencia conservadora y acelerada, anticipan un aumento del estrés hídrico y una modificación profunda del ciclo hidrológico local.

Estos resultados coinciden con las advertencias del IPCC (2019; 2021), que señalan una reducción progresiva de la humedad del suelo y una mayor recurrencia de sequías en sistemas de montaña de América Latina hacia mediados de siglo.

En concordancia con lo anterior, el comportamiento prospectivo de la escorrentía muestra una disminución promedio del 10–18 % en los escenarios más severos, lo cual resulta altamente consistente con lo reportado por Rincón y Pascual (2020), quienes estimaron reducciones significativas del caudal proyectado de la cuenca del Chicamocha bajo condiciones de aumento térmico y disminución de la precipitación.

Finalmente, desde un enfoque de vulnerabilidad hídrica, los resultados obtenidos refuerzan lo planteado por Rincón y Gutiérrez (2021), quienes clasifican la cuenca del Chicamocha como un sistema con vulnerabilidad medio-alta, agravada por la disminución de la oferta hídrica y el aumento de la variabilidad climática. El comportamiento identificado en Tunja reafirma esta condición, evidenciando un sistema urbano con limitada capacidad de amortiguación frente a escenarios de estrés hídrico creciente.

10. Formulación de estrategias de gestión integrada y adaptativa del agua en Tunja.

A partir de la integración de los resultados hidrológicos proyectados para el escenario futuro (2030–2050), que incluyen incrementos de escorrentía entre 8–20 %, picos extremos hasta de 22–35 %, disminución de la infiltración entre 12–30 %, aumento de los sedimentos exportados en 15–20 ton/ha/año y una reducción del caudal base entre 10–18 %, se definieron un conjunto de estrategias orientadas a reducir la vulnerabilidad hídrica y aumentar la resiliencia de la cuenca alta del río Chicamocha. Estas líneas de acción se diseñaron en coherencia con las afectaciones cuantificadas en el sistema hidrológico y se alinean con los componentes del POMCA y con los lineamientos prioritarios del PNACC, especialmente en materia de gestión del territorio, conservación ecosistémica, infraestructura resiliente y fortalecimiento del monitoreo climático. En la tabla 10 se presentan las estrategias propuestas, sus objetivos y los mecanismos de articulación institucional requeridos.

Tabla 10

Estrategias de gestión integrada y adaptativa

Estrategia	**Objetivo/Programa del POMCA del Río Chicamocha (CORPOBOYACÁ)**	**Tipo de Articulación Requerida**	**Soporte Normativo e Institucional**
Estrategia 1: Restauración Ecológica y Conservación de Áreas Estratégicas	Componente de Uso Sostenible y Conservación: programas de restauración ecológica, protección de rondas hídricas, nacederos y zonas de recarga.	Técnica-Operativa: priorización de áreas de restauración en zonas donde el análisis SIG evidenció que entre el 12 % y el 19 % de las áreas susceptibles a inundación coinciden con laderas de baja cobertura vegetal, especialmente en la subcuenca del río Jordán.	Decreto 1076 de 2015; Decreto 1640 de 2012 (POMCA); PNACC – Adaptación basada en Ecosistemas; CORPOBOYACÁ.

		Técnica: implementación de prácticas de conservación de suelos en áreas donde la modelación hidrológica y el análisis de pendientes evidenciaron condiciones favorables para procesos erosivos y aumento de sedimentos.	Ley 1523 de 2012; Acuerdos del Consejo de Cuenca (COC); PNACC – Gestión adaptativa del territorio; CORPOBOYACÁ.
Estrategia 2: Manejo Adaptativo del Suelo y Control de la Erosión	Componente de Gestión del Recurso Suelo. Subprogramas de reducción de la degradación del suelo en zonas de alta pendiente y cercanas a cuerpos de agua.		
Estrategia 3: Implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje	Componente de Gestión del Riesgo (PGR) y de Asentamientos Humanos: Directrices para el manejo de escorrentía urbana y prevención de inundación.	Normativa y técnica: incorporación de SUDS en instrumentos de ordenamiento territorial, sustentada en los resultados de modelación que	Ley 1523 de 2012 (Gestión del Riesgo). Resoluciones de la CAR sobre el uso

Sostenible (SUDS)		evidencian incrementos de escorrentía superficial y áreas urbanas susceptibles a inundación.	del agua y vertimientos.
Estrategia 4: Fortalecimiento del Monitoreo y Alerta Temprana Adaptativa	Componente de Gobernanza y Participación: Programas de información y conocimiento de la cuenca, incluyendo el fortalecimiento de la red de monitoreo hidrometeorológico.	Institucional: articulación entre el municipio de Tunja, CORPOBOYACÁ e IDEAM para fortalecer el monitoreo en zonas donde el análisis 2014–2024 evidenció variabilidad climática y eventos extremos recurrentes.	Directrices del IDEAM sobre la operación de la red de monitoreo. Plan Estratégico de la CAR.

Nota: Elaborada por el autor

La consolidación del cumplimiento de las estrategias propuestas requiere la incorporación de ajustes normativos y de gestión que aseguren su articulación efectiva con los instrumentos de planificación y los mecanismos institucionales existentes en la cuenca alta del río Chicamocha. En este sentido, se plantean los siguientes lineamientos:

- La zonificación de amenazas y la identificación de áreas con alta susceptibilidad a inundaciones y avenidas torrenciales, derivadas del análisis hidrológico y espacial del escenario base (2014–2024), constituyen insumos técnicos fundamentales para la gestión del riesgo hídrico. En coherencia con lo establecido en el POMCA del río Chicamocha, estos resultados deben ser considerados como criterios técnicos de referencia e incorporados en los procesos de ajuste y revisión del Plan de Ordenamiento Territorial (POT/PBOT) del municipio de Tunja, particularmente en la delimitación de áreas de restricción por riesgo y en la definición de usos del suelo compatibles
- Responsabilidad en la ejecución y operación institucional: Para la Estrategia 4 (Monitoreo), la gestión operativa debe recaer en el CLOPAD/CMGRD del municipio, asegurando la conexión directa de la información de monitoreo (alerta temprana) con los protocolos de respuesta institucional definidos en el POMCA para eventos extremos.
- La adopción de esta estructura formal de articulación garantiza que las estrategias propuestas trasciendan el ámbito académico para ser incorporadas en la planificación territorial y la gestión institucional del agua en la cuenca.

11 . Conclusiones

El análisis hidrológico e histórico de la cuenca alta del río Chicamocha permitió identificar transformaciones significativas en el comportamiento del recurso hídrico durante el periodo 2014–2024. Entre los hallazgos cuantitativos más relevantes se encuentra la reducción de la precipitación anual cercana al 4,8 %**,** acompañada de un incremento progresivo de la temperatura media de +0,26 °C por década, factores que explican la disminución de la infiltración entre 12–30 % y del caudal base en un rango de 10–18 %**.** Este deterioro en la regulación natural confirma que la cuenca está transitando hacia un régimen hidrológico más variable y menos estable, lo cual aumenta la vulnerabilidad frente a sequías y limita la disponibilidad de agua para Tunja.

Los resultados del modelo hidrológico bajo escenarios de cambio climático constituyen la base cuantitativa más relevante de la investigación. Las proyecciones para el periodo 2030–2050 muestran aumentos de escorrentía entre 8–20 %, con picos extremos que podrían incrementarse hasta 22–35 % durante eventos intensos. Paralelamente, la infiltración proyectada continúa disminuyendo y se intensifican los procesos erosivos en zonas de pendiente, lo que anticipa un aumento adicional en la exportación de sedimentos estimado en +15–20 ton/ha/año. Estos valores confirman que el sistema hidrológico responderá de manera más abrupta a los cambios climáticos futuros, validando la necesidad de medidas de adaptación basadas en la reducción del riesgo.

Las líneas de acción propuestas se fundamentan en los resultados más representativos del riesgo hidrológico y se alinean directamente con los lineamientos del PNACC. La restauración ecológica se justifica por la pérdida de infiltración y el aumento de sedimentos; el manejo del

suelo responde al incremento proyectado de erosión; la implementación de SUDS aborda los aumentos en la escorrentía urbana y los picos extremos; y el fortalecimiento del monitoreo se sustenta en la alta variabilidad climática cuantificada. De este modo, cada estrategia se deriva de un resultado concreto y cuantificable, lo cual garantiza coherencia técnica, pertinencia territorial y alineación con la política nacional.

12. Referencias

Aguirre, L. (2020). Señales de cambio climático en la cuenca alta del río Chicamocha.

Allan, J. A. (2003). Integrated water resources management is more a political than a technical challenge. Developments in Water Science, 50(C), 9–23. https://doi.org/10.1016/S0167-5648(03)80004-7

ANA & MINAGRI. (2015). Política y estrategia nacional de recursos hídricos.

Arboleda, J. (2018). Determinando los efectos del cambio climático y del cambio en usos del suelo en la macrocuenca Magdalena–Cauca utilizando el modelo hidrológico MESH.

Arevalo Algarra, H. M., Perico Granados, N. R., Reyes Rodríguez, C. A., Vera, M. C., Monroy, J., & Perico Martínez, C. (2021). Sitios de inundaciones causadas por los ríos La Vega y Jordán, Tunja (Boyacá). Tecnura, 25(67), 86–101. https://doi.org/10.14483/22487638.15248

Arias, L. (2023). Estrategias de adaptación basadas en la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático del sistema socioecológico vereda El Carmen, Cómbita (Boyacá, Colombia).

Barrera, D. (2021). Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca del lago de Tota, Boyacá.

Battisti, D. S., & Naylor, R. L. (2009). Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. Science, 323(5911), 240–244.

Bedoya, P., Pava, R., & Lamprea, J. (2010). Vulnerabilidad por efecto del cambio climático en Colombia. https://www.researchgate.net/publication/267569188

Casallas, L., & Jiménez, M. (2009). Evaluación de los procesos de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia.

Castellanos, L. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia (escala 1:100.000). IDEAM

Congreso de Colombia. (1993). Ley 99 de 1993.

Congreso de Colombia. (1994). Ley 142 de 1994.

Congreso de Colombia. (1997). Ley 373 de 1997.

CORTOLIMA. (2019). Caracterización morfométrica de la subzona hidrográfica del río Totare.

Cuadrat, J. M. (2006). El agua en el siglo XXI.

Díaz, J. (2012). Determinación de la oferta hídrica superficial mediante ArcGIS y HEC-HMS en la microcuenca quebrada La Cristalina.

Duarte, J., & Alarcón, P. (2023). Adaptación al cambio climático y su relación con la seguridad alimentaria en municipios.

Escobar, L., & Guarín, C. (2018). Análisis de los procesos de desertificación en la cuenca media del río Chicamocha.

FAO. (2006). Guidelines for soil description.

Función Pública. (1991). Constitución Política de Colombia de 1991.

Función Pública. (1997). Ley 388 de 1997.

Función Pública. (2002). Decreto 1729 de 2002.

Función Pública. (2010). Decreto 3930 de 2010.

Función Pública. (2012). Ley 1523 de 2012.

Función Pública. (2015a). Decreto 1076 de 2015.

Función Pública. (2015b). Ley 1753 de 2015.

Función Pública. (2018). Ley 1931 de 2018.

Función Pública. (2019). Ley 1955 de 2019.

Función Pública. (2021). Ley 2169 de 2021.

Garavito, L., & Caro, C. (2018). Efecto del cambio climático en la precipitación de la cuenca alta del río Chicamocha.

Global Water Partnership. (2022). ¿Qué es la GIRH? https://www.gwp.org

Gómez, J., & López, R. (2019). Análisis de factores hidrológicos en la cuenca alta del río Chicamocha.

Gutiérrez, J., Borja, A., Cepeda, H., Arroyave, M., Olaya, M., & Lara, D. (2014). Evaluación y mapeo de impulsores de cambio sobre humedales.

Hincapié, M., Mejía, A., & Prieto, C. (2019). Climate change and water resources in Colombia. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, 22(2). https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368

IPCC. (2019). Technical summary.

IPCC. (2020). El cambio climático y la tierra.

Jiménez, L., & Cortés, J. (2016). Modelación dinámica de la calidad del agua del río Chicamocha.

Jódar, J., Ruiz, J., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica usando SWAT. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 35(3), 240–253.

Lloyd, C., & Saunders, M. (2002). A drought climatology for Europe. International Journal of Climatology, 22(13), 1571–1592.

Manrique, R., Manrique, H., Manrique, C., & Tejedor, L. (2007). Contaminación de la cuenca alta del río Chicamocha. Revista Salud Historia y Sanidad, 2(1).

Mora, J., & Ochoa, A. (2016). Modelamiento de zonas de inundación mediante HEC-RAS y ArcGIS. UPTC.

Neill, B., Kriegler, E., Kemp, M., Riahi, K., & Moss, R. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways. Global Environmental Change, 42, 169–181.

Obando, J. (2019). Estrategias para la gestión sostenible del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chicamocha.

PNACC. (2016). Plan nacional de adaptación al cambio climático.

Rincón, L., & Gutiérrez, J. (2021). Cálculo del índice de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Chicamocha.

Sánchez, D., & Figueroa, M. (2022). Zonificación de amenaza por inundación en Arcabuco (Boyacá).

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., & Badi, W. (2021). Changes in climate extremes and impacts. En Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

Torres, C., & Niño, F. (2022). Evaluación de índices de calidad del agua mediante modelos de simulación.

UNESCO. (2021). Informe mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021.

Yates, D., & Purkey, D. (2005). WEAP21 water planning model. Water International, 30(4), 487–500.