



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,  
VINCULACIÓN Y POSGRADO**

**DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL CON MENCIÓN EN  
RECURSOS HÍDRICOS**

**TEMA:**

**“DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA  
CHIMBORAZO CON EL COMPONENTE DE CAMBIO CLIMÁTICO”**

**AUTOR:**

Ing. German Gonzalo Shagñay Sigcho

**TUTOR:**

Ing. Mauro José Jiménez Granizo, MSc.

**Riobamba – Ecuador**

2025

## Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA CHIMBORAZO CON EL COMPONENTE DE CAMBIO CLIMÁTICO”, ha sido elaborado por el Ing. German Gonzalo Shagñay Sigcho, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta anti plagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 27 de marzo, de 2025



---

Ing. Mauro José Jiménez Granizo, MSc.  
**TUTOR**

## Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, German Gonzalo Shagñay Sigcho, con número único de identificación 0603178880, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA CHIMBORAZO CON EL COMPONENTE DE CAMBIO CLIMÁTICO”, previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 27 de marzo, de 2025



GERMAN SHAGÑAY SIGCHO

---

**Ing. German Gonzalo Shagñay Sigcho**

N.U.I. 0603178880

## **Agradecimiento**

Por su inmenso apoyo y comprensión, ya que me impulsaron día tras día para culminar este trabajo investigativo. A mí amada familia, Fanny, Dylan, Elian y Eidan. A mis padres y hermanos que con mucho esfuerzo, cariño y sacrificio supieron apoyarme. Este trabajo investigativo es un testimonio de todo lo que hago, en homenaje a ustedes.

A la Universidad Nacional de Chimborazo UNACH.

***German Gonzalo Shagñay Sigcho***

## **Dedicatoria**

Al haber culminado el presente trabajo investigativo, desde lo más profundo de mi ser, dejo constancia de mi agradecimiento sincero, a Dios por darme salud y vida, y a la vez hago extensivo mi más sincero agradecimiento al Mgs. Mauro José Jiménez Granizo por brindarme todo el apoyo necesario con sus aportes y orientaciones en la elaboración de tesis. También reconozco de una manera muy especial al PhD. Benito Guillermo Mendoza Trujillo por su colaboración con la ejecución del presente.

***German Gonzalo Shagñay Sigcho***

## Índice General

<b>Certificación del Tutor</b> .....	
<b>Declaración de Autoría y Cesión de Derechos</b> .....	
<b>Agradecimiento</b> .....	
<b>Dedicatoria</b> .....	
<b>Índice General</b> .....	
<b>Índice de Tablas</b> .....	
<b>Índice de Figuras</b> .....	
<b>Resumen</b> .....	
<b>Abstract</b> .....	
<b>Introducción</b> .....	<b>13</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>14</b>
<b>Generalidades</b> .....	<b>14</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	14
1.2 Justificación de la Investigación.....	14
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo General.....	16
1.3.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>17</b>
<b>Estado del Arte y la Práctica</b> .....	<b>17</b>
2.1 Antecedentes investigativos .....	17
2.2 Fundamentación legal.....	18
2.3 Fundamentación teórica.....	19
2.3.1 Fundamentos conceptuales del diagnóstico hidrológico y cambio climático.....	19
2.3.2 Cambio climático y su relación con los recursos hídricos.....	20
2.3.3 Caracterización geomorfológica e hidráulica de microcuencas .....	21
2.3.4 Estudio multitemporal de cobertura vegetal y uso de suelo .....	22
2.3.5 Modelamiento hidrológico con escenarios de cambio climático.....	23
2.3.6 Características físicas de las cuencas .....	25
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>26</b>
<b>Diseño Metodológico</b> .....	<b>26</b>
3.1 Enfoque de la investigación.....	26

3.2	Diseño de la investigación.....	27
3.2.1	Recolección de Datos Hidrometeorológicos: Se recopilaron datos históricos de precipitación y temperatura provenientes de estaciones meteorológicas locales.....	27
3.2.2	Procesamiento de Datos Cartográficos: Se utilizaron herramientas de teledetección y SIG para analizar la cobertura del suelo y los parámetros geomorfológicos.....	27
3.2.3	Modelación Hidrológica: Se empleó el software HEC-HMS para simular la escorrentía y el caudal, evaluando la oferta hídrica bajo diferentes escenarios.....	27
3.3	Área de estudio.....	27
3.3.1	Condiciones Climáticas:.....	27
3.3.2	Cobertura Vegetal:.....	27
3.4	Técnicas e instrumentos de muestreo y recolección de datos.....	28
3.4.1	Datos Utilizados:.....	28
3.5	Población de estudio y tamaño de la muestra.....	28
3.5.1	Población y muestra.....	28
3.6	Métodos de análisis.....	29
3.6.1	Procesamiento cartográfico:.....	29
3.6.2	Cálculo del número de curva (CN):.....	29
3.6.3	Modelación hidrológica:.....	29
3.6.4	Análisis estadístico:.....	29
3.7	Procesamiento de datos.....	29
	<b>Capítulo 4 4. Análisis y Discusión de los Resultados.....</b>	<b>30</b>
4.1	Determinación de las características geomorfológicas, e hidráulicas.....	30
4.2	Modelamiento hidrológico con escenarios de cambio climático, relacionado a la precipitación y temperatura como variables del cambio climático para este estudio.....	36
4.3	Oferta hídrica microcuenca Chimborazo.....	40
4.4	Discusión de resultados.....	41
4.5	Impacto del Cambio Climático en la Oferta Hídrica.....	41
4.6	Relación Entre Precipitación, Temperatura y Escorrentía.....	42
4.7	Implicaciones para la Gestión del Recurso Hídrico.....	42
	<b>Capítulo 5.....</b>	<b>43</b>
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>43</b>
	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>45</b>

<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>46</b>
---	-----------

## Índice de Tablas

Tabla 1. Descripciones y fórmulas de los parámetros geomorfológicos de microcuencas .	25
Tabla 2. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca Chimborazo .....	30
Tabla 3. Área de estudio por cobertura de la tierra 2000 .....	32
Tabla 4. Área de estudio por cobertura de la tierra 2010 .....	33
Tabla 5. Área de estudio por cobertura de la tierra 2020 .....	34
Tabla 6. Calculo de cambios .....	34
Tabla 7. Numero de curva por año .....	35
Tabla 8. Parámetros hidráulicos de la microcuenca Chimborazo .....	36
Tabla 9. Caudal ofertado 1981-2000 .....	37
Tabla 10. Caudal ofertado 2001-2010 .....	38
Tabla 11. Caudal ofertado 2011-2024 .....	39
Tabla 12. Caudal ofertado Promedio .....	40

## Índice de Figuras

Figura 1. Microcuenca del río Chimborazo, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo	28
Figura 2. Curva hipsométrica de la microcuenca Chimborazo .....	31
Figura 3. Mapa de cobertura y uso de la tierra 2000 .....	32
Figura 4. Mapa de cobertura y uso de la tierra 2010 .....	33
Figura 5. Mapa de cobertura y uso de la tierra 2020 .....	34
Figura 6. Precipitación-Escorrentía 1981-2000.....	38
Figura 7. Precipitación-Escorrentía 2001-2010.....	39
Figura 8. Precipitación-Escorrentía 2011-2024.....	40

## Resumen

El objetivo de la presente investigación fue realizar un diagnóstico hidrológico de la microcuenca Chimborazo con componente de cambio climático, en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo, mediante el método precipitación-escorrentía. La zona abarca 174.94 km<sup>2</sup> con diversas coberturas vegetales, como bosque, páramos y áreas agrícolas, y presenta pendientes pronunciadas. La metodología incluyó tres fases: análisis cartográfico para delimitar la microcuenca y estudiar sus características geomorfológicas, cálculo del número de curva (CN) con herramientas como HEC-HMS, y modelación hidrológica para estimar caudales bajo diversas condiciones climáticas. Se utilizaron datos satelitales y meteorológicos, y análisis estadísticos para validar los resultados. El análisis reveló que la microcuenca tiene una red hidrográfica de cuarto orden, densidad de drenaje de 0.60 km<sup>-1</sup> y tiempo de concentración de 0.64 horas, lo que indica una respuesta hidrológica rápida. La curva hipsométrica muestra erosión activa y escasa infiltración, en un estado de madurez. Además, se observó una disminución en la cobertura de páramo (-9.9%) y glaciares (-0.6%) entre 2000 y 2020, mientras que la cobertura mosaico agropecuario aumentó (+10.4%), por esta razón se redujo la retención hídrica y aumentó la escorrentía superficial. Los modelos climáticos proyectan disminuciones de precipitación (3% a 7%) y aumentos de temperatura (1.2°C a 2.5°C), lo que afectaría la oferta hídrica. Entre 1981 y 2000, el caudal mostró una disminución progresiva, afectando el abastecimiento de agua para consumo humano y riego. Estos cambios subrayan la necesidad de estrategias para mitigar la pérdida de recursos hídricos en la microcuenca.

**Palabras clave:** Cambio climático, cobertura vegetal, escorrentía superficial, microcuenca Chimborazo, modelación hidrológica y oferta hídrica.

## Abstract

This research aimed to conduct a hydrological diagnosis of the Chimborazo micro basin, with a climate change component, in the canton of Riobamba, province of Chimborazo, using the precipitation-runoff method. The area covers 174.94 km<sup>2</sup> with diverse vegetation cover, such as forest, moorland, and agricultural regions, and has steep slopes. The methodology included three phases: cartographic analysis to delimit the micro basin and study its geomorphological characteristics; calculation of the curve number (CN) with tools such as HEC-HMS; and hydrological modeling to estimate flows under various climatic conditions. Satellite and meteorological data were used, and statistical analysis was used to validate the results. The study revealed that the micro basin has a fourth-order hydrographic network, a drainage density of 0.60 km<sup>-1</sup>, and a time of concentration of 0.64 hours, indicating a rapid hydrological response. The hypsometric curve shows active erosion and scarce infiltration in a mature state.

Furthermore, a decrease in moorland (-9.9%) and glacier (-0.6%) coverage was observed between 2000 and 2020, while agricultural use increased (+10.4%), reducing water retention and increasing surface runoff by 18%. Climate models project decreases in precipitation (3%-7%) and temperature increases (1.2°C-2.5°C), which would affect water supply. Between 1981 and 2000, flow showed a progressive decrease, affecting water supply for human consumption and irrigation. These changes underscore the need for strategies to mitigate the loss of water resources in the micro basin.

**Keywords:** *Climate change, vegetation cover, surface runoff, Chimborazo micro-basin, moorland, hydrological modeling, and water supply.*



Firmado electrónicamente por:  
ANA ELIZABETH  
MALDONADO LEÓN

Reviewed by:  
Ms.C. Ana Maldonado León  
ENGLISH PROFESSOR  
C.I.0601975980

## Introducción

La gestión sostenible de los recursos hídricos es un desafío global que se evidencia gracias a los efectos del cambio climático alrededor del mundo. En este contexto, el diagnóstico hidrológico de microcuencas adquiere una gran relevancia, ya que permite evaluar la disponibilidad, calidad y variabilidad del agua en sistemas locales altamente sensibles a las alteraciones climáticas y antrópicas (IPCC, 2021). La microcuenca Chimborazo, ubicada en la parte alta de la provincia de Chimborazo es de vital importancia para la provisión de servicios ecosistémicos hídricos, ya que es el inicio de la cuenca hidrográfica Pastaza, que es de las cuencas más importantes a nivel nacional (Campos, 2024).

El presente estudio tiene como objetivo principal diagnosticar el estado hidrológico de la microcuenca Chimborazo considerando el componente de cambio climático. Para alcanzar este propósito se plantearon tres objetivos específicos: (1) Determinar las características geomorfológicas, e hidráulicas; (2) Realizar un estudio multitemporal de las características de cobertura vegetal y uso de suelo relacionadas con la capacidad hídrica de la microcuenca Chimborazo y (3) Efectuar el modelamiento hidrológico con escenarios de cambio climático, relacionado a la precipitación y temperatura como variables del cambio climático. Para ello, se emplearon metodologías cuantitativas basadas en datos hidrometeorológicos, modelación hidrológica y análisis de tendencias climáticas (Romero et al., 2018).

El problema que motiva esta investigación radica en la creciente incertidumbre sobre la disponibilidad de recursos hídricos en la microcuenca Chimborazo debido a los cambios en los patrones climáticos y la influencia de actividades humanas (Tapia & Ulloa, 2020). A pesar de la importancia de la microcuenca en la regulación del agua para los ecosistemas y comunidades locales, los estudios que integren un análisis hidrológico con un enfoque de cambio climático a escala local son limitados (Berrones & Moreta, 2018).

En este sentido, el presente estudio contribuirá a la comprensión de la dinámica hidrológica en la región y proporcionará información clave para el diseño de estrategias de adaptación y gestión hídrica. El estudio es relevante científicamente porque analiza el impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la microcuenca, proporcionando datos clave para su planificación y gestión sostenible. En términos sociales, los resultados de esta investigación ayudarán a comunidades locales, instituciones gubernamentales y organismos de

conservación, al brindar información técnica que facilite la toma de decisiones en torno a la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático (Cotacachi & Aguirre, 2024).

## **Capítulo 1**

### **Generalidades**

#### **1.1 Planteamiento del problema**

El acceso y la disponibilidad de recursos hídricos en zonas de alta montaña están siendo afectados por el cambio climático, las actividades antrópicas y desastres naturales. La microcuenca Chimborazo, al ser una fuente crucial de agua para comunidades locales, regionales y nacionales, presenta una creciente vulnerabilidad frente a los escenarios de cambio climático, la deforestación, el sobrepastoreo y la expansión de actividades agrícolas. Estos factores han generado alteraciones en el ciclo hidrológico, afectando la cantidad y calidad del agua disponible (Berrones & Moreta, 2018).

Uno de los principales problemas identificados es la disminución en los caudales y la modificación en los ciclos de precipitación, lo que repercute directamente en la seguridad hídrica de las poblaciones. Estudios previos han evidenciado una reducción en la cobertura de nieve y glaciares en los Andes ecuatorianos, lo interviene directamente en la regulación natural del agua en la microcuenca (Tapia & Ulloa, 2020). Sin embargo, el conocimiento sobre los efectos específicos del cambio climático en esta microcuenca es limitado, lo que dificulta la implementación de estrategias efectivas de adaptación y mitigación.

Dada esta problemática, se hace necesario un diagnóstico integral que permita comprender las dinámicas hidrológicas de la microcuenca Chimborazo y evaluar su vulnerabilidad frente a escenarios climáticos futuros. Esto permitirá generar insumos técnicos para la toma de decisiones en la gestión sostenible del agua y el desarrollo de medidas de adaptación que garanticen la disponibilidad del recurso en el mediano y largo plazo.

#### **1.2 Justificación de la Investigación**

El presente estudio es de gran relevancia tanto a nivel científico como social, ya que proporciona información fundamental sobre la dinámica hidrológica de la microcuenca Chimborazo en el contexto del cambio climático. La creciente presión sobre los recursos hídricos hace imperativo contar con herramientas de diagnóstico que permitan evaluar el

estado actual del agua y proyectar escenarios futuros para su gestión sostenible (IPCC, 2021). Este diagnóstico hidrológico contribuirá a la generación de conocimiento sobre la variabilidad de los recursos hídricos en ecosistemas altoandinos. La modelación hidrológica y el análisis de tendencias climáticas permitirán identificar patrones de disponibilidad de agua, lo que servirá de base para futuras investigaciones y políticas de conservación (Romero et al., 2018).

En el ámbito social, los resultados del estudio son de utilidad para comunidades locales, organismos gubernamentales y entidades de conservación, ya que proporcionarán información clave para la planificación y gestión del agua. La disponibilidad de este recurso es un factor determinante para la seguridad alimentaria, la salud y el desarrollo económico de las poblaciones asentadas en la microcuenca (CONDESAN, 2018).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Evaluar el diagnóstico hidrológico de la microcuenca Chimborazo con componente de cambio climático.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar las características geomorfológicas, e hidráulicas.
2. Realizar un estudio multitemporal de las características de cobertura vegetal y uso de suelo relacionadas con la capacidad hídrica de la microcuenca Chimborazo.
3. Efectuar el modelamiento hidrológico con escenarios de cambio climático, relacionado a la precipitación y temperatura como variables del cambio climático para este estudio.

## Capítulo 2

### Estado del Arte y la Práctica

#### 2.1 Antecedentes investigativos

El análisis de antecedentes sobre la oferta hídrica en microcuencas altoandinas requirió revisar investigaciones previas a nivel nacional e internacional, centradas en modelos hidrológicos. Estas investigaciones proporcionaron un marco de referencia para abordar la gestión de recursos hídricos sostenible.

Larrea & Maldonado, (2022) estudiaron la oferta hídrica en la microcuenca del río Guamote y la quebrada Compuene Gorge. Su trabajo de investigación dio a conocer la necesidad de datos precisos en una región agrícola sin estaciones meteorológicas, en este sentido lo que ellos realizaron fue un levantamiento de información satelital. Mediante el método precipitación-escorrentía, herramientas SIG e imágenes satelitales, analizaron parámetros geomorfológicos, capacidad de campo y cobertura vegetal. Encontraron que la vegetación y el tipo de suelo afectan el número de curva (CN), por lo que el río Guamote tenían varios tipos de suelo entre ellos una zona de desierto en la parte de palmira.

La modelación hidrológica con HEC-HMS permitió calcular caudales en periodos de retorno de 2, 5, 10 años, esto lo realizaron mediante análisis probabilísticos con datos de 40 años de satélites, esto les llevo a determinar ofertas hídricas de 0.14 m<sup>3</sup>/s para el río Guamote y 0.77 m<sup>3</sup>/s para la quebrada Compuene Gorge. Estos valores resaltan su potencial para riego, siempre que se maneje el recurso de forma sostenible.

Por su parte, Jaya & Rodriguez, (2023) evaluaron la oferta hídrica en las microcuencas de los ríos Ishpi, Daldal, Uldán y la quebrada Cachipata, en la subcuenca del río Chambo. Dada la demanda agrícola y la ausencia de monitoreo en tiempo real, utilizaron el método precipitación-escorrentía y herramientas SIG para identificar áreas críticas. Detectaron que el avance agrícola y el sobrepastoreo afectan negativamente el suelo, reduciendo su capacidad de infiltración.

Como se pudo evidencias en las investigaciones anteriores, podemos concluir que el agua es un recurso vital para todos los seres humanos, la investigación en las microcuencas altoandinas en los últimos tiempos ha sido crucial para entender el daño que tenemos a nivel

hidrológico en el país, por esta razón se ha puesto en evidencia la necesidad de comprender cómo el cambio climático está afectando su disponibilidad. Investigaciones previas han revelado que el retroceso de los glaciares y las alteraciones en los patrones de precipitación están reduciendo la cantidad de agua disponible, lo que a su vez impacta su calidad (Crispin, 2023; Rosales, 2019). Para anticiparse a estos cambios y buscar soluciones, científicos han empleado modelos hidrológicos que permiten simular distintos escenarios futuros y diseñar estrategias de adaptación. Herramientas como el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y los análisis de tendencias climáticas se han convertido en aliados clave para entender la evolución de la microcuenca y tomar decisiones informadas sobre su gestión (Crispin, 2023; Farfán et al., 2020).

En la zona andina, el incremento de la temperatura está alterando el ciclo hidrológico en las microcuencas, afectando los ecosistemas que se encuentra dentro de ellas. En el caso de la microcuenca Chimborazo, se han detectado variaciones en los caudales de los ríos, en gran parte debido al retroceso glaciar y a cambios en la estacionalidad de las lluvias (Berrones & Moreta, 2018). La modelación con HEC-HMS y el método de servicio de conservación de suelo (SCS) nos ayudara a comprender la realidad hidrológica que estamos viviendo y la necesidad de realizar políticas públicas para ralentizar el cambio climático.

## **2.2 Fundamentación legal**

El derecho ambiental, como parte del derecho internacional, evoluciona constantemente, con los convenios internacionales adquiriendo un papel clave en las normativas globales y nacionales. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) ha liderado este proceso, destacando con la presentación del informe Brundtland en 1987 y la actualización de la Carta Mundial sobre la Diversidad Biológica. La Cumbre de la Tierra y la Declaración de Río fortalecieron el marco legal ambiental, proceso que culminó con la Cumbre del Clima de París en 2015 (ONU, 2014).

En Ecuador, la Constitución reconoce el acceso al agua como un derecho humano fundamental y patrimonio público inalienable, garantizando su calidad y cantidad. Esta normativa, influenciada por el la comunidad científica y las demandas indígenas, obliga al Estado a gestionar el recurso de forma sostenible, priorizando las necesidades presentes y futuras bajo principios de sostenibilidad y restauración ambiental (Sofia et al., 2020).

## 2.3 Fundamentación teórica

### 2.3.1 *Fundamentos conceptuales del diagnóstico hidrológico y cambio climático*

#### 2.3.1.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso continuo de circulación del agua en la Tierra, que incluye la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía. Este ciclo es fundamental para la distribución del agua dulce en la superficie terrestre y subterránea (Hernando, 2017).

- **Componentes del balance hídrico:** El balance hídrico representa la relación entre la entrada, almacenamiento y salida de agua en un sistema hidrológico. Sus principales componentes son la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía superficial, la infiltración y el almacenamiento subterráneo (Guevara, 2015).

#### 2.3.1.2 Procesos de escorrentía, infiltración y evaporación

Los procesos de escorrentía, infiltración y evaporación son componentes fundamentales del ciclo hidrológico que determinan el movimiento y distribución del agua en la superficie terrestre (Larrea & Maldonado, 2022).

- **Escorrentía:** Movimiento del agua sobre la superficie terrestre hacia cuerpos de agua. Se ve influenciada por la pendiente del terreno, tipo de suelo y cobertura vegetal (Diaz, 2018).
- **Infiltración:** Proceso mediante el cual el agua se introduce en el suelo, afectado por la porosidad y permeabilidad del terreno (Zarta, 2022).
- **Evaporación:** Conversión del agua líquida a vapor debido a la radiación solar y condiciones atmosféricas (Larrea & Maldonado, 2022).

#### 2.3.1.3 Diagnóstico hidrológico en microcuencas

El diagnóstico hidrológico en microcuencas es una evaluación integral que analiza el ciclo hidrológico en áreas pequeñas, identificando la disponibilidad, calidad y dinámica del agua, considerando factores como precipitación, escorrentía, infiltración, evaporación, geomorfología, uso de suelo y cobertura vegetal. Su objetivo es brindar información técnica para la gestión sostenible del agua, planificación territorial y mitigación de riesgos

hidrometeorológicos. Utiliza herramientas como SIG, modelos hidrológicos y análisis multitemporales, siendo especialmente relevante en zonas altoandinas debido a su sensibilidad al cambio climático y la presión antrópica (CONDESAN, 2018; Duque et al., 2019).

- **Importancia del diagnóstico hidrológico:** Permite conocer la disponibilidad de agua, identificar problemas de escasez o contaminación y diseñar estrategias de manejo sostenible (Gómez, 2021).
- **Métodos y herramientas para el diagnóstico hidrológico:** Incluyen monitoreo de caudales, análisis de precipitación, uso de modelos hidrológicos (como HEC-HMS y SWAT) y herramientas geoespaciales (GIS y teledetección) (Samboni et al., 2011).
- **Aplicación de diagnósticos en zonas altoandinas:** En regiones altoandinas, estos diagnósticos son cruciales debido a la cobertura vegetal, el páramo y la dependencia de las comunidades locales de los recursos hídricos que se generan en la parte alta de las montañas (Duque et al., 2019).

### ***2.3.2 Cambio climático y su relación con los recursos hídricos***

El cambio climático en la región Andina de nuestro país ha generado transformaciones significativas en la cantidad y calidad del recurso hídrico. Este fenómeno se manifiesta principalmente a través de variaciones en la temperatura y la precipitación, alterando los patrones tradicionales del ciclo hidrológico (Guerrero et al., 2021). El incremento de la temperatura acelera la pérdida del glaciar de los nevados, lo que inicialmente aumenta el caudal de los ríos, pero a largo plazo reduce las reservas hídricas permanentes. Por otro lado, los cambios en la intensidad, frecuencia y duración de las lluvias afectan la escorrentabaja, la infiltración y la recarga de acuíferos, generando periodos prolongados de sequía o lluvias extremas que provocan inundaciones y deslizamientos de tierra (Samboni et al., 2011).

Estos efectos repercuten directamente en las actividades agrícolas, la generación hidroeléctrica y el abastecimiento de agua potable, sectores fundamentales para las comunidades andinas. Además, la pérdida de cobertura vegetal y la expansión agrícola sin planificación agravan la erosión del suelo y disminuyen la capacidad de retención hídrica de las microcuencas (Tapia & Ulloa, 2020). Frente a este contexto, resulta crucial implementar estrategias de gestión integrada de los recursos hídricos que consideren la adaptación al cambio climático, la conservación de ecosistemas estratégicos como los páramos y la

promoción de prácticas sostenibles para garantizar la seguridad hídrica en la región (Rosales, 2019).

- **Definición y causas del cambio climático:** El cambio climático se refiere a variaciones significativas y prolongadas en los patrones climáticos, provocadas principalmente por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación (IPCC, 2021).
- **Impactos del cambio climático en la hidrología:** Afecta la distribución temporal y espacial de la precipitación, incrementando la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones (Romero et al., 2018).
- **Efectos sobre la disponibilidad y calidad del agua:** Se evidencian cambios en los caudales de los ríos, reducción de glaciares y alteración en la calidad del agua, afectando el acceso para consumo, riego y actividades industriales (Díaz, 2017).

### **2.3.3 Caracterización geomorfológica e hidráulica de microcuencas**

La caracterización geomorfológica e hidráulica de microcuencas consiste en analizar los parámetros de red, forma y relieve que influyen en la dinámica del agua. Este estudio evalúa parámetros como la pendiente, tipo de suelo, cotas y redes de drenaje, que determinan el comportamiento de la escorrentía, infiltración y caudales. Comprender estas características permite predecir caudales, identificar zonas vulnerables a inundaciones y diseñar estrategias para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Ramírez, 2018).

#### **2.3.3.1 Aspectos geomorfológicos de la microcuenca Chimborazo**

- **Relieve y topografía:** El relieve se refiere a las formas y elevaciones del terreno, mientras que la topografía describe las características superficiales, influyendo en el flujo y almacenamiento de agua (Tapia & Ulloa, 2020).
- **Uso de parámetros morfométricos:** Permiten cuantificar características físicas de la cuenca como área, perímetro, pendiente y densidad de drenaje, esenciales para modelar la respuesta hidrológica (Gómez, 2021).
- **Influencia del relieve en la dinámica hídrica:** Un relieve escarpado genera escorrentía rápida, mientras que terrenos planos favorecen la infiltración y retención de agua (Córdoba, 2021).

### 2.3.3.2 Aspectos hidráulicos

Los aspectos hidráulicos estudian el movimiento y comportamiento del agua dentro de la cuenca. Analizan variables como caudal, velocidad de flujo, dirección del flujo son fundamentales para entender la dinámica del agua y el transporte de sedimentos. Estos aspectos permiten evaluar la capacidad de conducción de ríos, prevenir inundaciones y diseñar infraestructuras hidráulicas eficientes. Su análisis es esencial para la gestión sostenible de recursos hídricos, especialmente en microcuencas con variaciones climáticas y presión antrópica (Cotacachi & Aguirre, 2024).

- **Conceptos básicos de hidráulica fluvial:** Estudia el comportamiento del flujo de agua en los cauces, considerando parámetros como velocidad, caudal y presión (Intriago et al., 2021).
- **Cálculo de caudales y velocidades de flujo:** Se basa en fórmulas como la ecuación de Manning para estimar la capacidad de transporte de los ríos (Larrea & Maldonado, 2022).
- **Factores que afectan el comportamiento hidráulico en microcuencas:** Incluyen la pendiente, rugosidad del cauce, vegetación ribereña y modificaciones antrópicas (Muñoz et al., 2020).

### 2.3.4 Estudio multitemporal de cobertura vegetal y uso de suelo

#### 2.3.4.1 Cobertura vegetal y su relación con la capacidad hídrica

- **Tipos de cobertura vegetal en la microcuenca:** Incluyen bosques, pastizales, áreas agrícolas y zonas urbanas, cada uno con distinto efecto sobre la infiltración y escorrentía (Meza, 2014).
- **Función de la vegetación en la regulación hídrica:** La vegetación reduce la velocidad de escorrentía, aumenta la infiltración y contribuye a la recarga de acuíferos (Popayan et al., 2019).
- **Cambios en la cobertura vegetal y sus efectos hidrológicos:** La deforestación y expansión agrícola y el cambio de uso de suelo daña la corteza terrestre lo que incrementan la escorrentía y erosión, afectando la calidad y disponibilidad del agua (Quiñonez, 2022).

#### 2.3.4.2 Uso de suelo y su impacto en la disponibilidad de agua

- **Clasificación de usos de suelo en la microcuenca:** Agrícola, ganadero, forestal, urbano y de conservación, con implicaciones directas en la dinámica hídrica (Zarta, 2022).
- **Efectos de la expansión agrícola, ganadera y urbana:** Provocan compactación del suelo, disminución de la infiltración y aumento de la escorrentía superficial (Muñoz et al., 2020).
- **Prácticas de manejo sostenible del suelo:** Incluyen la agroforestería, terrazas y reforestación para conservar la capacidad hídrica y prevenir la erosión (Popayan et al., 2019).

#### 2.3.4.3 Análisis multitemporal mediante herramientas geoespaciales

- **Uso de imágenes satelitales y SIG en estudios hidrológicos:** Permiten monitorear cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal a lo largo del tiempo (Bustamante et al., 2011).
- **Técnicas para la evaluación de cambios en la cobertura y uso de suelo:** Incluyen la clasificación supervisada, NDVI y análisis multitemporal para detectar variaciones significativas (Navarro et al., 2020)
- **Resultados de estudios previos en la región:** Han mostrado la reducción de áreas boscosas y el aumento de zonas agrícolas, afectando la capacidad de retención hídrica (Tapia & Ulloa, 2020).

### 2.3.5 *Modelamiento hidrológico con escenarios de cambio climático*

#### 2.3.5.1 Fundamentos del modelamiento hidrológico

- **Definición y objetivos del modelamiento:** Simula el comportamiento del ciclo hidrológico para prever caudales y evaluar impactos de variaciones climáticas (Duque et al., 2019).
- Modelos hidrológicos más utilizados: **HEC-HMS:** Enfocado en la simulación de eventos de precipitación-escorrentía y **WAT:** Permite evaluar el impacto de prácticas de uso de suelo y cambio climático en cuencas grandes (Ahmed et al., 2022; Tassew et al., 2019).

- **Parámetros esenciales para la modelación:** Incluyen precipitación, temperatura, uso de suelo, parámetros morfométricos y características del suelo (Tassew et al., 2019).

#### 2.3.5.2 Variables climáticas en el modelamiento hidrológico

- **Precipitación y su variabilidad temporal y espacial:** La distribución de la precipitación influye directamente en la esorrentía y disponibilidad de agua (Adolph, 2022).
- **Cambios en la temperatura y su impacto en la esorrentía:** El aumento de temperaturas acelera la evaporación y modifica la dinámica de deshielo en zonas montañosas (IPCC, 2021).
- **Relación entre variaciones climáticas y caudales fluviales:** Cambios en las variables climáticas pueden causar aumentos repentinos o disminuciones prolongadas en los caudales (Hernando, 2017).

#### 2.3.5.3 Escenarios de cambio climático

- **Proyecciones climáticas globales y regionales (IPCC):** El IPCC proporciona proyecciones basadas en distintos escenarios de emisiones que afectan la temperatura y precipitación global (IPCC, 2021).
- **Escenarios RCP y sus implicaciones hidrológicas:** Los RCP (Representative Concentration Pathways) representan trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero que afectan la hidrología futura (Crispin, 2023).
- **Aplicación de escenarios en la microcuenca Chimborazo:** Permite anticipar cambios en la oferta hídrica, considerando diferentes trayectorias de emisiones y su impacto en la región (Campos, 2024).

#### 2.3.5.4 Análisis de resultados del modelamiento

- **Interpretación de los caudales simulados bajo diferentes escenarios:** Ayuda a prever riesgos de sequías o inundaciones y planificar medidas preventivas (Romero et al., 2018).
- **Comparación con datos históricos:** Permite validar la precisión de los modelos y ajustar parámetros para mejorar las proyecciones (Duque et al., 2019).

- **Recomendaciones para la gestión hídrica basada en los resultados:** Incluyen estrategias para la conservación, uso eficiente y manejo integral de los recursos hídricos (Gómez, 2021).

### 2.3.6 Características físicas de las cuencas

Las características físicas de las cuencas comprenden aspectos geomorfológicos, topográficos y climáticos que influyen en el comportamiento hidrológico. Incluyen parámetros como el área, perímetro, pendiente, forma, longitud del cauce y relieve.

Estos factores determinan la capacidad de captación, la velocidad de escorrentía, infiltración y almacenamiento de agua. La forma de la cuenca afecta el tiempo de concentración, mientras que la pendiente influye en la erosión y transporte de sedimentos, esenciales para la gestión de recursos hídricos (Larrea & Maldonado, 2022).

En la siguiente tabla (1) se sintetiza las definiciones, fórmulas e interpretaciones clave para el análisis geomorfológico e hidráulico de las cuencas hidrográficas.

**Tabla 1.** Descripciones y fórmulas de los parámetros geomorfológicos de microcuencas

Parámetro	Descripción
Área de la cuenca (A)	Superficie total delimitada por las divisorias de aguas, donde la precipitación y escorrentía convergen hacia un punto común.
Perímetro de la cuenca (P)	Longitud total del contorno de la cuenca hidrográfica, que define la línea divisoria de aguas.
Índice de compacidad (Ic)	Relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área. $Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$
Factor de forma (Ff)	Relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima, que describe su forma. $Ff = \frac{A}{L^2}$
Relación de elongación (Re)	Compara la longitud máxima de la cuenca con el diámetro de un círculo de igual área. $Re = \frac{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L}$
Relación de circularidad (Rc)	Mide la semejanza de la cuenca con un círculo de igual área. $Rc = \frac{4\pi A}{P^2}$
Pendiente de la cuenca	Mide la inclinación promedio del terreno en la cuenca hidrográfica, expresada en porcentaje o grados. Influye en la velocidad del flujo, la erosión y la distribución de la escorrentía superficial. Se calcula con datos topográficos.

Curva hipsométrica	Representa gráficamente la distribución proporcional de áreas de la cuenca respecto a la elevación. Permite identificar patrones de erosión y madurez geomorfológica. Curvas convexas indican cuencas jóvenes; cóncavas, terrenos erosionados y maduros.
Diagrama de frecuencias altimétricas	Muestra la distribución porcentual de áreas en diferentes rangos de elevación. Facilita la comprensión de la configuración del relieve y su impacto en la escorrentía, retención de agua y erosión. Es útil para estudios geomorfológicos y planificación ambiental.
Relación del relieve (Rr)	Evalúa la diferencia entre las elevaciones máximas y mínimas. Altos valores indican potencial para caudales rápidos y erosivos; valores bajos reflejan terrenos más homogéneos y estables.
Componentes de la red de drenaje	Incluyen cursos de agua jerárquicos (según Horton-Strahler): cabeceras, tributarios y cauces principales. Se analizan en función de su interconexión, influenciada por geología, topografía y cobertura del suelo, que afectan la densidad y eficiencia de drenaje.
Densidad de drenaje (Dd)	Relaciona la longitud total de los cursos de agua con el área de la cuenca (km/km <sup>2</sup> ). Valores altos indican terrenos de baja infiltración y alta escorrentía; valores bajos, suelos permeables y vegetación densa. Se usa para evaluar riesgos de inundación.
Pendiente media (Sm)	Promedio de las pendientes del terreno, calculada con la diferencia entre altitudes máxima y mínima sobre la distancia horizontal. Influye en la velocidad del flujo, la erosión y la infiltración. Altos valores generan flujos rápidos; bajos, mayor almacenamiento de agua.

**Fuente:** Damian et al., (2017).

## Capítulo 3

### Diseño Metodológico

#### 3.1 Enfoque de la investigación

Esta investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, centrado en la recopilación, análisis y modelación de datos hidrológicos para estimar la disponibilidad de agua en la microcuenca del río Chimborazo. Se aplicó un método descriptivo-explicativo con el fin de identificar las variables que inciden en el balance hídrico y comprender la interacción entre la precipitación, la escorrentía y los caudales. La investigación adoptó un diseño no experimental y longitudinal, lo que permitió analizar las variables en su estado natural a lo largo del tiempo, sin intervenir en ellas. Para simular el comportamiento del caudal bajo diversos escenarios, se empleó el software HEC-HMS, utilizando datos históricos de precipitación y cobertura vegetal. Esta metodología permitió cuantificar la oferta hídrica, evaluar la capacidad del sistema para satisfacer las demandas ecológicas y productivas, así como detectar vulnerabilidades frente a fenómenos climáticos extremos.

## **3.2 Diseño de la investigación**

El diseño metodológico se estructuró en tres etapas principales:

**3.2.1 Recolección de datos hidrometeorológicos:** Se recopilaron datos históricos de precipitación y temperatura provenientes de estaciones meteorológicas locales y del sistema Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) de la NASA.

**3.2.2 Procesamiento de datos cartográficos:** Se utilizaron herramientas de teledetección y SIG para analizar la cobertura del suelo a lo largo de los años y los parámetros geomorfológicos de la cuenca a estudiar.

**3.2.3 Modelación hidrológica:** Se empleó el software HEC-HMS para simular la escorrentía y el caudal, evaluando la oferta hídrica bajo diferentes escenarios, hidrológicos, climáticos y de tipo de suelo.

Este diseño permitió analizar el comportamiento hidrológico de la microcuenca y cuantificar la oferta hídrica disponible.

## **3.3 Área de estudio**

La investigación se desarrolló en la microcuenca del río Chimborazo, ubicada en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo, Ecuador (Figura 1). La microcuenca abarca un área de 174.94 km<sup>2</sup> y presenta características geomorfológicas variables, con pendientes promedio del 23.14%.

### **3.3.1 Condiciones Climáticas:**

- Temperatura media anual: 8 a 12 °C.
- Precipitación media anual: 800 a 1200 mm.

### **3.3.2 Cobertura Vegetal:**

- Bosque.
- Área antrópica
- Páramos.
- Otras tierras.
- Glaciar.
- Áreas agrícolas (mosaico agropecuario).

### 3.4 Técnicas e instrumentos de muestreo y recolección de datos

Se utilizaron herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) para la recopilación y procesamiento de información espacial.

#### 3.4.1 Datos Utilizados:

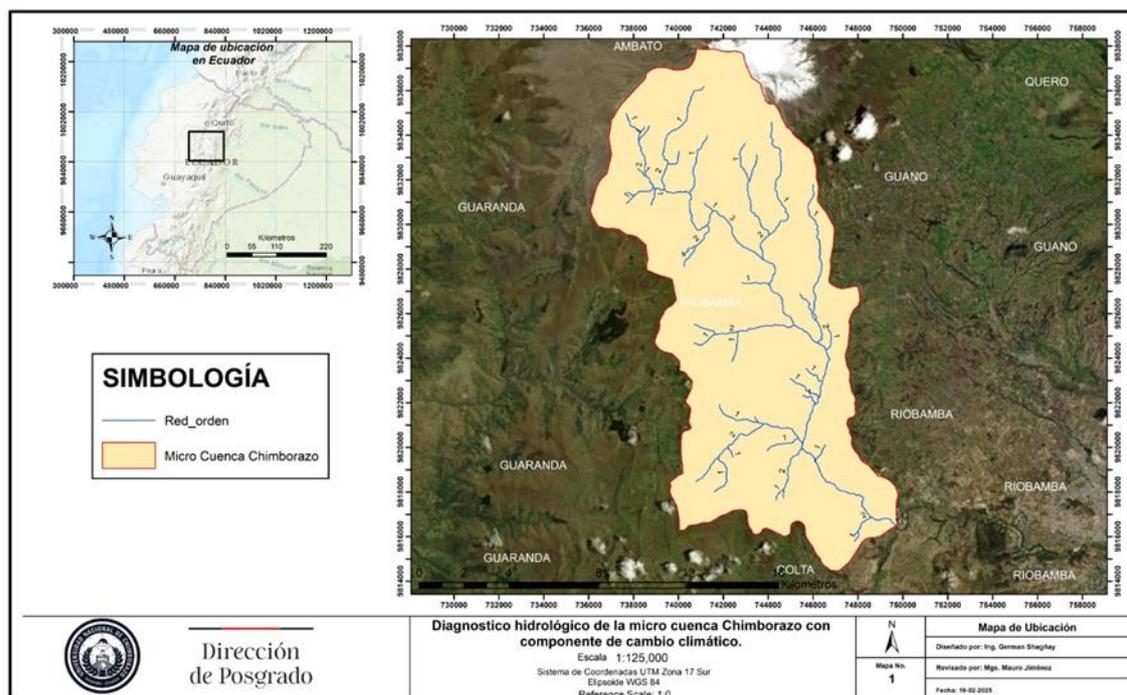
- Cobertura Vegetal y Uso del Suelo: Imágenes satelitales Sentinel-2 MSI y ASTER L1T procesadas en *Google Earth Engine*.
- Datos Hidrometeorológicos: Información histórica de estaciones meteorológicas locales.
- Geomorfología: Parámetros calculados a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE) obtenidos del software ArcGIS.

### 3.5 Población de estudio y tamaño de la muestra

#### 3.5.1 Población y muestra

La población de estudio estuvo conformada por toda la microcuenca del río Chimborazo. Para el análisis, se seleccionaron puntos de muestreo estratégicos en función de accesibilidad, representatividad de la cobertura vegetal y conectividad con la red de drenaje.

**Figura 1.** Microcuenca del río Chimborazo, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo



### **3.6 Métodos de análisis**

El procesamiento y análisis de datos se estructuró en las siguientes fases:

#### **3.6.1 Procesamiento cartográfico:**

- Delimitación de la microcuenca y análisis de parámetros geomorfológicos de red y relieve.
- Clasificación del uso del suelo mediante algoritmos supervisados (Random Forest) y validación mediante matrices de confusión e índice Kappa.

#### **3.6.2 Cálculo del número de curva (CN):**

- Asignación de valores de número de curva CN basados en la cobertura vegetal y el tipo de suelo, según el método del SCS (*Soil Conservation Service*).

#### **3.6.3 Modelación hidrológica:**

- Implementación del modelo HEC-HMS para simular la relación precipitación–escorrentía.
- Estimación de caudales máximos, ecológicos y ofertados bajo condiciones históricas y actuales.

#### **3.6.4 Análisis estadístico:**

- Cálculo de promedios, desviaciones estándar y coeficientes de correlación ( $R^2$ ) para evaluar la relación entre precipitación y escorrentía, dentro del software HEC-HMS.

### **3.7 Procesamiento de datos**

El procesamiento de los datos recopilados se realizó utilizando herramientas como ArcGIS, Excel y HEC-HMS. Los resultados se validaron mediante análisis estadísticos y se compararon con datos históricos para evaluar la precisión del modelo, y así poder identificar los potenciales errores que nos da la modelación hidrológica.

## Capítulo 4

### 4. Análisis y Discusión de los Resultados

#### 4.1 Determinación de las características geomorfológicas, e hidráulicas

Después de realizar la modelación de la parámetros de red, forma y relieve en la tabla 2 podemos evidenciar el tipo de cuenca de acuerdo a todos los parámetros encontrados:

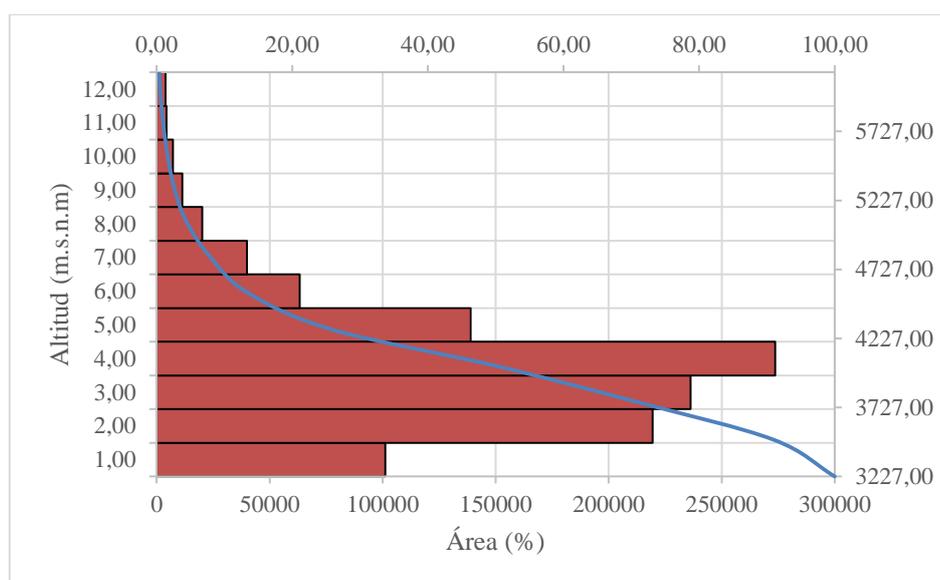
**Tabla 2.** Parámetros geomorfológicos de la microcuenca Chimborazo

Nombre	Sigla	Unidad	Valores
Área	A	km <sup>2</sup>	174.937829
Perímetro	P	km	69.763732
Índice de compacidad	Ic	adimensional	1.4874
Ancho medio	B	adimensional	5.114
Longitud media	Lc	km	34.2049
Factor de forma	Ff	adimensional	0.149523
Relación de elongación	Re	adimensional	0.436332
Relación de circularidad	Rci	adimensional	0.451685
Área sobre la curva	AS	km <sup>2</sup>	2761370.785
Área bajo curva	Ab	km <sup>2</sup>	316129.2147
Pendiente media de la microcuenca	Pmc	%	23.14186679
Longitud del cauce principal	Lc	km	34.2049
Orden de la red hídrica	Or	adimensional	4
Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	km	105.592
Densidad de drenaje	Dd	km-1	0.60
Numero de canales	Nt	adimensional	75.00
Densidad hidrográfica	Dh	km-1	0.43
Altura Máxima rio	Hmax	msnm	6288
Altura mínima del rio	Hmin	msnm	3094
Pendiente media del cauce principal	Sm	adimensional	93.37843408
Tiempo de concentración	Tc	horas	0.64386376
Tiempo de Retardo	Tr	min	17.97
Relación hipsométrica	Rh	%	8.734943362

**Fuente:** Autor.

Estos valores indican que la microcuenca tiene una morfología irregular con alta variabilidad altitudinal, lo que genera un régimen de escorrentía con respuesta rápida a eventos de precipitación. La curva hipsométrica obtenida muestra que la microcuenca se encuentra en una fase de madurez, lo que significa que el proceso de erosión sigue activo y que aún no ha alcanzado un equilibrio entre la erosión y la sedimentación. Esto implica que las pendientes pronunciadas contribuyen a una mayor velocidad de escorrentía y menor infiltración Figura 2.

**Figura 2.** Curva hipsométrica de la microcuenca Chimborazo



**Fuente:** Autor.

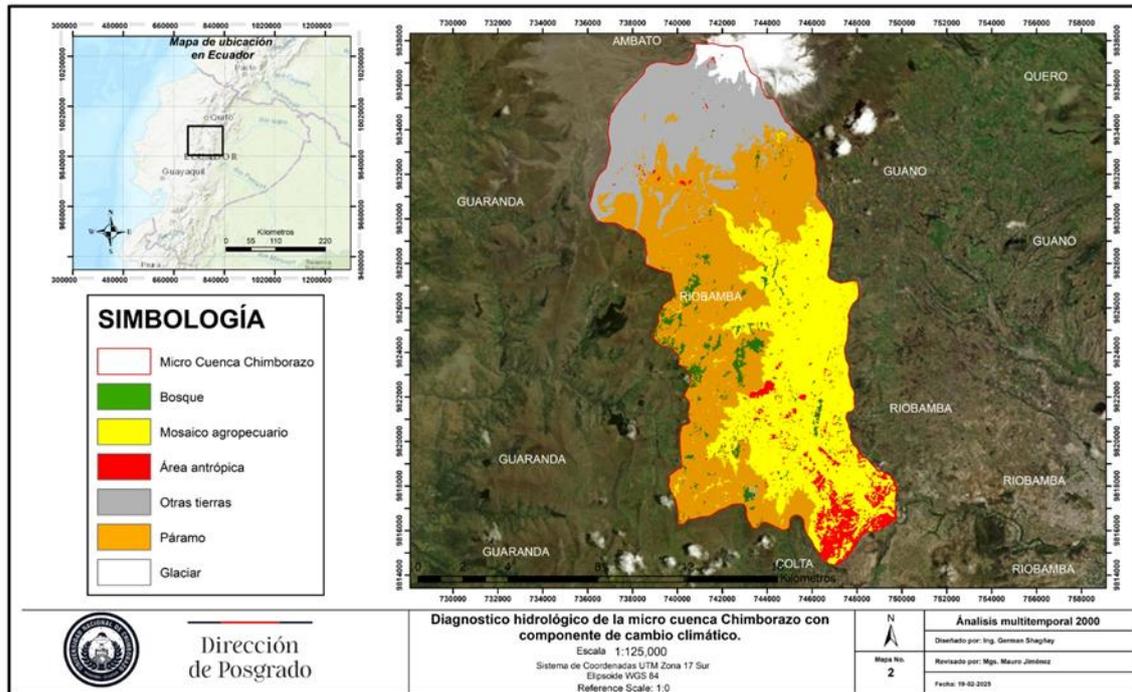
El orden de la red hidrográfica es de orden 4 lo que indica una microcuenca de tamaño intermedio con un sistema de drenaje bueno, lo que influye en la capacidad de retención y regulación del agua. El análisis de los caudales y el tiempo de concentración permitió determinar que el tiempo de respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación es rápido, con un  $T_c$  de 0.64 horas y un  $T_r$  de 17.97 minutos. Esto significa que la cuenca tiene una respuesta rápida ante eventos de precipitación.

Estudio multitemporal de las características de cobertura vegetal y uso de suelo relacionadas con la capacidad hídrica de la unidad hidrológica Chimborazo.

El estudio de la cobertura vegetal y el uso del suelo es fundamental para comprender la dinámica hídrica de la microcuenca Chimborazo. A través del análisis multitemporal, se identificaron los cambios en la distribución de la vegetación y las transformaciones en el uso del suelo, los cuales tienen un impacto significativo en la disponibilidad de agua en la región.

Para evaluar los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo, se utilizaron imágenes satelitales de los años 2000, 2016 y 2022. La clasificación de imágenes se realizó mediante el software Google Earth Engine y el algoritmo Random Forest, permitiendo la identificación de las coberturas predominantes dentro de la microcuenca (Figura 3). La validación de la clasificación se efectuó utilizando puntos de control y datos históricos proporcionados por el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) y el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP).

**Figura 3.** Mapa de cobertura y uso de la tierra 2000



Fuente: Autor.

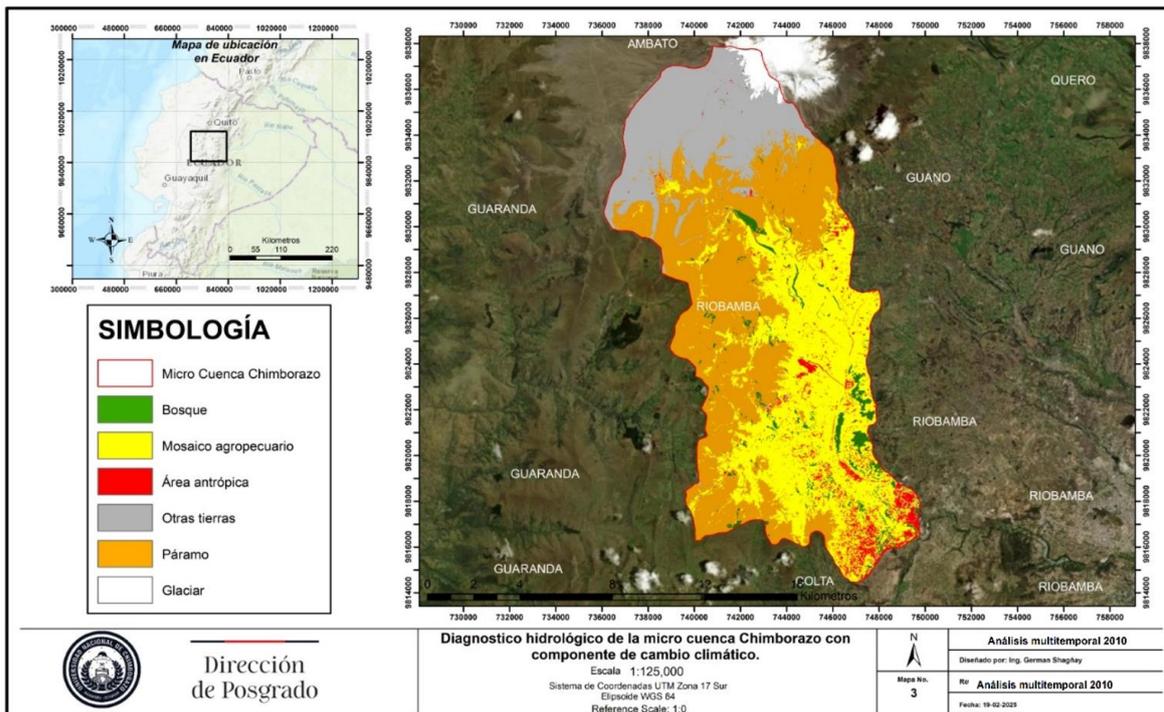
**Tabla 3.** Área de estudio por cobertura de la tierra 2000

2000	Conteo de pixeles	Área (ha)	Porcentaje
Bosque	46299	462.12	2.65%
Mosaico agropecuario	570658	5708.42	32.62%
Área antrópica	73322	730.87	4.19%
Otras tierras	333732	3337.29	19.08%
Paramo	696212	6962.91	39.80%
Glaciar	29113	291.13	1.66%
<b>Total</b>	<b>1749336</b>	<b>17492.76</b>	<b>100</b>

Fuente: Autor.

En la figura 3 podemos ver que la capa con mayor extensión de tierra es Paramo con un 39%, mosaico agropecuario es la segunda con un 32%, como se puede identificar la cuenca en el año 2000 tiene mucha expansión agrícola frente al paramo que lo rodea.

**Figura 4.** Mapa de cobertura y uso de la tierra 2010



Fuente: Autor.

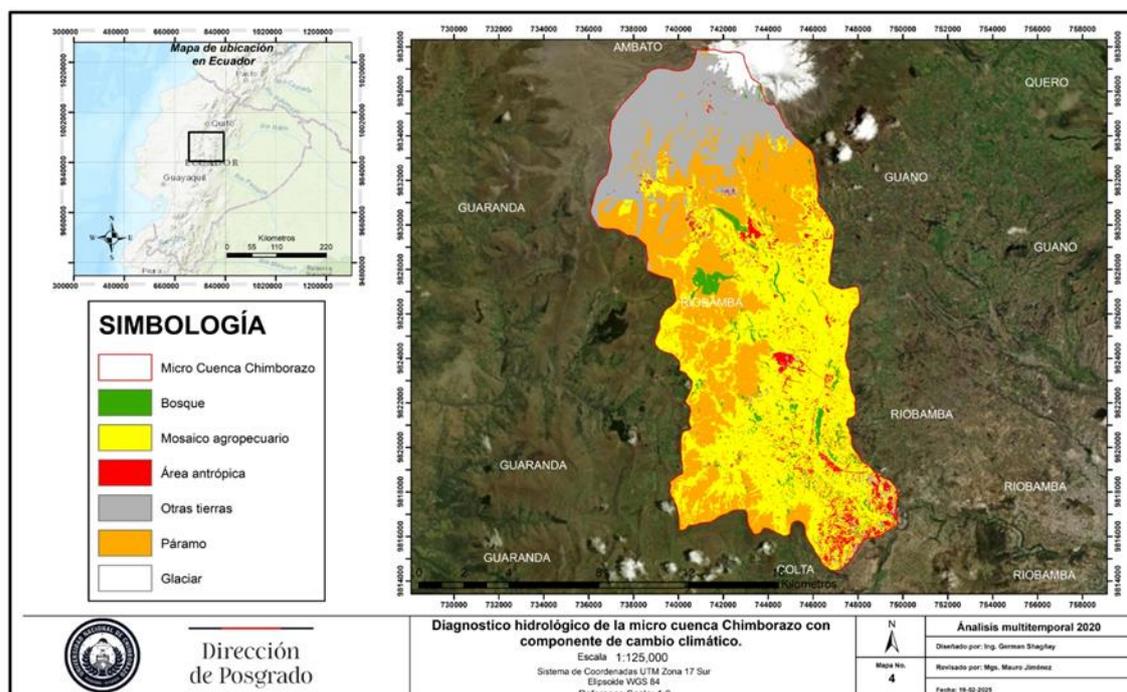
**Tabla 4.** Área de estudio por cobertura de la tierra 2010

2010	Conteo de pixeles	Área (ha)	Porcentaje
Bosque	51705	506.19	2.96%
Mosaico agropecuario	601837	6044.54	34.40%
Área antrópica	65076	634.02	3.72%
Otras tierras	336982	3365.73	19.26%
Paramo	672462	6729.59	38.44%
Glaciar	21274	212.86	1.22%
<b>Total</b>	<b>1749336</b>	<b>17492.96</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor.

En la figura 4 podemos ver que la expansión agrícola sigue en constante crecimiento aumentando 1% frente al año anterior, el paramo pierde proporcionalmente el área, esto quiere decir que en 10 años las comunidades que se encuentran dentro de la microcuenca han tenido un crecimiento exponencial en actividades agrícolas y ganaderas.

**Figura 5.** Mapa de cobertura y uso de la tierra 2020



Fuente: Autor.

**Tabla 5.** Área de estudio por cobertura de la tierra 2020

2020	Conteo de pixeles	Área (ha)	Porcentaje
Bosque	47632	469.58	2.72%
Mosaico agropecuario	735706	7399.39	42.06%
Área antrópica	72600	705.44	4.15%
Otras tierras	332900	3323.98	19.03%
Paramo	541374	5402.76	30.95%
Glaciar	19124	191.37	1.09%
<b>Total</b>	<b>1749336</b>	<b>17492.54</b>	<b>100%</b>

Fuente: Autor.

#### 4.2.1 Cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo

**Tabla 6.** Cálculo de cambios

Cobertura/Usos de suelo	2000 (ha)	2010 (ha)	2020 (ha)	Variación (%)
Bosque	4,629.90	5,170.50	4,763.20	<b>2.72</b>
Mosaico agropecuario	57,065.80	60,183.70	73,570.60	<b>10.4</b>
Área antrópica	7,332.20	6,507.60	7,260.00	<b>0.4</b>
Otras tierras	33,373.20	33,698.20	33,290.00	<b>-0.8</b>
Páramo	69,621.20	67,246.20	54,137.40	<b>-9.9</b>

Fuente: Autor.

Los valores evidencian una reducción de casi 10% del páramo y 0.6% de los glaciares, lo que indica una menor capacidad de regulación hídrica en la microcuenca

#### 4.2.2 Relación con la capacidad hídrica

La capacidad hídrica de la microcuenca está directamente relacionada con el tipo de cobertura y su distribución espacial. Los páramos y bosques nativos tienen un papel fundamental en la regulación del agua, ya que contribuyen a la infiltración y recarga de acuíferos. Su disminución ha generado un aumento en la escorrentía superficial y una reducción en la disponibilidad de agua en períodos secos.

Para evaluar el impacto de estos cambios en la disponibilidad hídrica, dentro del software se utilizó el modelo precipitación–escorrentía utilizando el mediante del Número de Curva (CN) del SCS (*Soil Conservation Service*). Se establecieron cuatro grupos hidrológicos (A, B, C y D) en función de la cobertura y el tipo de suelo, asignando valores de CN entre 30 y 99. Los valores más altos corresponden a áreas urbanizadas o antropicas, mientras que los valores más bajos representan zonas de alta infiltración, como paramos o suelos muy bien conservados.

Los resultados evidencian la creciente expansión agrícola que tiene la microcuenca esto puede incrementar la escorrentía superficial, lo que sugiere una reducción en la capacidad de retención hídrica de la microcuenca. Esta tendencia puede traducirse en una mayor vulnerabilidad a eventos extremos, como inundaciones y sequías, afectando tanto los ecosistemas como las comunidades que viven dentro de la microcuenca, en la tabla 7 podemos ver los valores del CN de cada uno de los años evidenciando la baja del valor para los años 2000 a comparación del 2020.

**Tabla 7.** Numero de curva por año

Usos de suelo	2000	2010	2020
Bosque	74.39	74.16	74.20
Mosaico agropecuario	73.97	73.86	73.89
Área antrópica	76.75	74.66	74.56
Otras tierras	74.05	74.92	74.92
Paramo	73.97	73.75	73.49
Glaciar	75	76.4	76.00
Total	74.68	74.62	74.51

Fuente: Autor.

## 4.2 Modelamiento hidrológico con escenarios de cambio climático, relacionado a la precipitación y temperatura como variables del cambio climático para este estudio

El modelamiento hidrológico de la microcuenca Chimborazo se llevó a cabo con el propósito de evaluar los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua. Para ello, se utilizaron datos históricos y proyecciones de temperatura y precipitación, considerando diferentes escenarios climáticos propuestos por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021). Se aplicaron modelos hidrológicos utilizando el software HEC-HMS, ajustando las variaciones esperadas en la precipitación y temperatura con base en escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero.

### 4.3.1 Parámetros Hidráulicos de la Microcuenca

El análisis de los parámetros hidráulicos reflejó una disminución progresiva en la capacidad de campo. En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos para los años 2000, 2010 y 2024, destacando cambios en la capacidad de campo (S), número de curva (CN), y el tiempo de retardo (Tr), estas variables son muy necesarias para el cálculo de la precipitación-escurrentia.

**Tabla 8.** Parámetros hidráulicos de la microcuenca Chimborazo

Años	Área (km <sup>2</sup> )	Lc (km)	Cota mayor (msnm)	Cota menor (msnm)	Capacidad de Campo (S)	CN	Tiempo de Retardo (min)	Inicial abstracción
2000					95.12	74.68	5.07	19.02
2010	174.9	34.2	6288	3094	95.39	74.62	5.06	19.08
2024					95.89	74.51	5.06	19.18

Fuente: Autor.

Los resultados indican que el cambio de uso de suelo podría generar un incremento en la escurrentía superficial, lo que ha reducido la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en la microcuenca.

### 4.3.2 Variabilidad Climática y Proyecciones de Escenarios

El análisis de variabilidad climática mostró que las precipitaciones han presentado una tendencia decreciente en los últimos 40 años, con una disminución promedio del 5% en comparación con los registros históricos de la década de 1980. La temperatura, en cambio,

ha evidenciado un aumento de 0.8°C en el mismo período, lo que coincide con estudios previos sobre el calentamiento regional en los Andes ecuatorianos (Cevallos & Yagchirema, 2023)

En base a estos datos, se establecieron escenarios de cambio climático considerando dos tendencias principales:

- **Escenario de Moderado Cambio Climático (RCP 4.5):** Disminución del 3% en la precipitación media anual y aumento de 1.2°C en la temperatura promedio.
- **Escenario de Cambio Climático Extremo (RCP 8.5):** Disminución del 7% en la precipitación media anual y aumento de 2.5°C en la temperatura promedio.

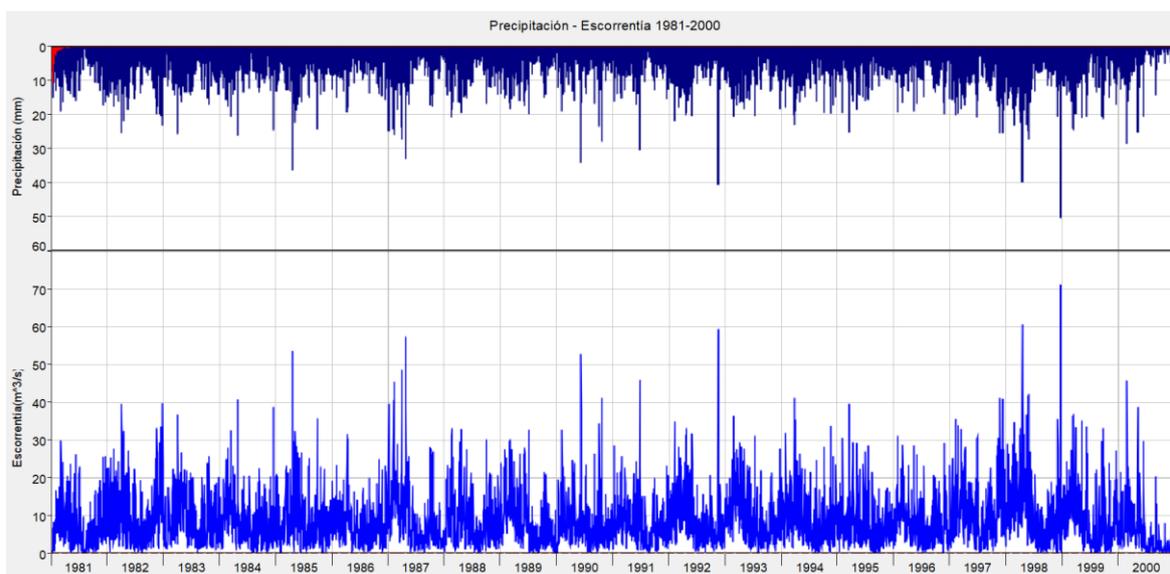
Para evaluar la oferta hídrica futura, se simuló el caudal disponible en la microcuenca bajo ambos escenarios. En la Tabla 9 se presentan los valores estimados de caudal ofertado entre 1981 y 2000, como se puede apreciar el caudal medio fluctúa entre un 7 y 8m<sup>3</sup>/s, excepto en años como 2000 y 1981 que tiene caudales ofertados bajos.

**Tabla 9.** Caudal ofertado 1981-2000

<b>Años</b>	<b>Caudal medio</b>	<b>Caudal Ecológico</b>	<b>Caudal Autorizado</b>	<b>Caudal Ofertado</b>
1981	6.436712329	0.643671233	0.4630	5.3300
1982	9.450684932	0.945068493	0.4630	8.0426
1983	8.934520548	0.893452055	0.4630	7.5780
1984	8.052459016	0.805245902	0.4630	6.7842
1985	8.367671233	0.836767123	0.4630	7.0679
1986	7.375342466	0.737534247	0.4630	6.1748
1987	9.116164384	0.911616438	0.4630	7.7415
1988	8.367486339	0.836748634	0.4630	7.0677
1989	8.351232877	0.835123288	0.4630	7.0531
1990	7.811506849	0.781150685	0.4630	6.5673
1991	7.61260274	0.761260274	0.4630	6.3883
1992	8.556010929	0.855601093	0.4630	7.2374
1993	9.572054795	0.957205479	0.4630	8.1518
1994	8.947123288	0.894712329	0.4630	7.5894
1995	7.181369863	0.718136986	0.4630	6.0002
1996	7.75273224	0.775273224	0.4630	6.5144
1997	10.4339726	1.04339726	0.4630	8.9275
1998	11.02328767	1.102328767	0.4630	9.4579
1999	9.366849315	0.936684932	0.4630	7.9671
2000	5.004644809	0.500464481	0.4630	4.0411
Total	8.385721461	0.838572146	0.4630	7.0841

Fuente: Autor.

Figura 6. Precipitación-Escurrentía 1981-2000



Fuente: Autor.

El análisis del caudal ofertado en la microcuenca Chimborazo durante el período 2001-2010 permite evaluar la variabilidad de la oferta hídrica en función de las condiciones climáticas y la disponibilidad del recurso. La Tabla 10 nos muestra el caudal ofertado baja considerablemente, que en el anterior periodo de tiempo, con un valor promedio de 5.22 m<sup>3</sup>/s

Tabla 10. Caudal ofertado 2001-2010

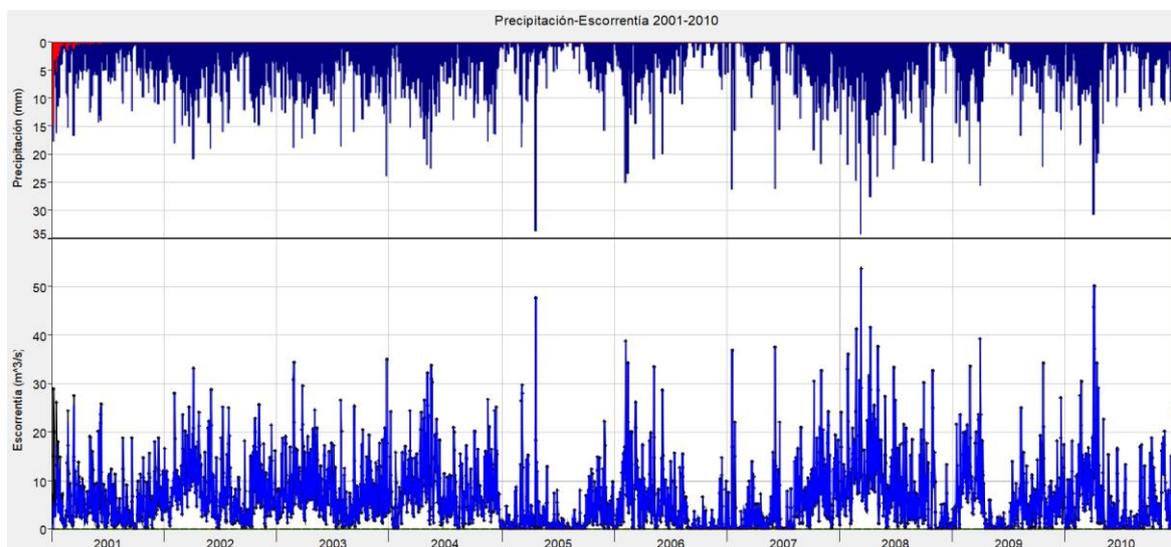
Años	Caudal medio	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2001	5.320273973	0.532027397	0.4630	4.3252
2002	8.265205479	0.826520548	0.4630	6.9757
2003	8.053972603	0.80539726	0.4630	6.7855
2004	8.26010929	0.826010929	0.4630	6.9711
2005	2.838630137	0.283863014	0.4630	2.0917
2006	4.658082192	0.465808219	0.4630	3.7292
2007	4.86	0.486	0.4630	3.9110
2008	8.845901639	0.884590164	0.4630	7.4983
2009	5.937808219	0.593780822	0.4630	4.8810
2010	6.139452055	0.613945205	0.4630	5.0625
Total	6.317943559	0.631794356	0.4630	5.2231

Fuente: Autor.

Los valores reflejan una variabilidad significativa en el caudal ofertado, con años de menor disponibilidad hídrica, como 2005, donde el caudal medio descendió hasta 2.83 m<sup>3</sup>/s, lo que redujo la oferta a 2.09 m<sup>3</sup>/s. En contraste, los años 2002 y 2008 mostraron los valores más

altos, con caudales ofertados de 6.97 m<sup>3</sup>/s y 7.49 m<sup>3</sup>/s, respectivamente (Figura 7). Esta variabilidad está directamente influenciada por las fluctuaciones en la precipitación anual y las condiciones de escorrentía en la microcuenca.

**Figura 7.** Precipitación-Escorrentía 2001-2010



Fuente: Autor.

El análisis del caudal ofertado en la microcuenca Chimborazo durante el período 2011-2024 evidencia una variabilidad en la disponibilidad hídrica, influenciada por factores climáticos y posibles cambios en el uso del suelo.

En la Tabla 11, se presentan los valores del caudal medio, ecológico, autorizado y ofertado, con respecto a los periodos anteriores podemos identificar un aumento en el caudal ofertado de 7.04 m<sup>3</sup>/s, eso se da a las tareas de restauración del páramo en la parte alta de la microcuenca.

**Tabla 11.** Caudal ofertado 2011-2024

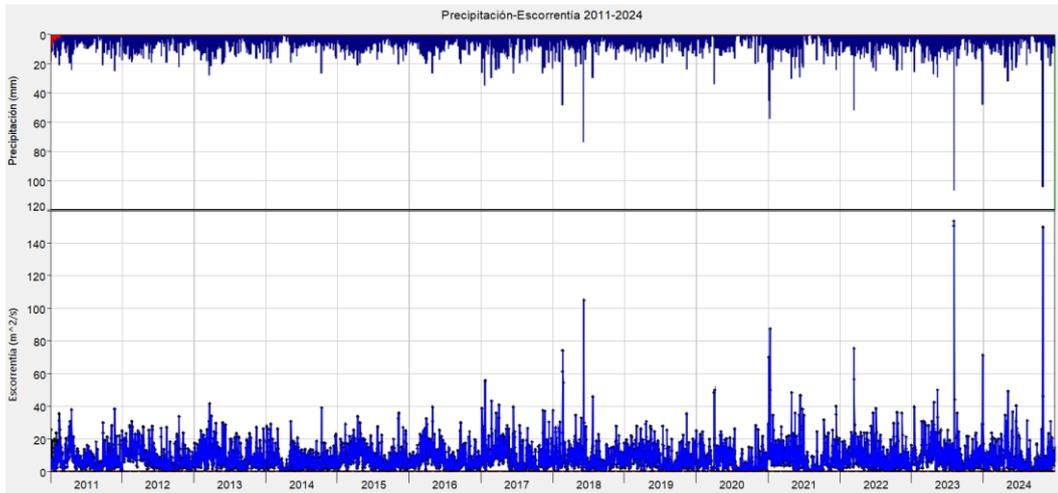
Años	Caudal Medio	Caudal Ecológico	Caudal Autorizado	Caudal Ofertado
2011	7.288219178	0.728821918	0.4630	6.0964
2012	8.959289617	0.895928962	0.4630	7.6003
2013	8.700547945	0.870054795	0.4630	7.3675
2014	6.273424658	0.627342466	0.4630	5.1830
2015	8.502739726	0.850273973	0.4630	7.1894
2016	8.090163934	0.809016393	0.4630	6.8181
2017	9.692876712	0.969287671	0.4630	8.2606
2018	8.968493151	0.896849315	0.4630	7.6086
2019	8.129589041	0.812958904	0.4630	6.8536
2020	6.286612022	0.628661202	0.4630	5.1949
2021	9.274246575	0.927424658	0.4630	7.8838
2022	8.418356164	0.841835616	0.4630	7.1135

2023	10.48438356	1.048438356	0.4630	8.9729
2024	7.763661202	0.77636612	0.4630	6.5243
Total	8.345185963	0.834518596	0.4630	7.0476

Fuente: Autor.

El caudal ofertado promedio en este período ha sido de 7.05 m<sup>3</sup>/s, reflejando un aumento respecto al período anterior (2001-2010), donde el promedio fue de 5.22 m<sup>3</sup>/s (Figura 8).

**Figura 8.** Precipitación-Escorrentía 2011-2024



Fuente: Autor.

### 4.3 Oferta hídrica microcuenca Chimborazo

Para una comparación temporal más amplia, la Tabla 12 presenta los valores de caudal ofertado promedio en tres períodos clave: 2000, 2010 y 2020. Se identifica una reducción en el caudal medio desde 8.38 m<sup>3</sup>/s en el año 2000 a 6.31 m<sup>3</sup>/s en 2010, seguida de un ligero incremento hasta 8.34 m<sup>3</sup>/s en 2020. Esta variabilidad es un reflejo de la influencia de eventos climáticos y del impacto de las condiciones hidrográficas de la microcuenca.

**Tabla 12.** Caudal ofertado Promedio

Año	Caudal medio	Caudal ecológico	Caudal autorizado	Caudal ofertado
2000	8.3857	0.8386	0.4630	7.0841
2010	6.3179	0.6318	0.4630	5.2231
2020	8.3452	0.8345	0.4630	7.0476

Fuente: Autor.

#### **4.4 Discusión de resultados**

Los resultados obtenidos mediante la modelación hidrológica con HEC-HMS permitieron evaluar la respuesta de la microcuenca Chimborazo bajo diferentes escenarios de cambio climático, considerando la variabilidad climática.

#### **4.5 Impacto del Cambio Climático en la Oferta Hídrica**

El análisis de los caudales ofertados en los períodos 2001-2010 (Tabla 10) y 2011-2024 (Tabla 11) muestra una tendencia general de variabilidad en el caudal, influenciada por fluctuaciones en la precipitación y temperatura. En términos generales, se identificaron tres patrones principales:

- Reducción de la oferta hídrica en años secos:

Durante el período 2001-2010, se registró una disminución significativa en la oferta hídrica en 2005, con un caudal medio de 2.83 m<sup>3</sup>/s. Este valor contrasta con el año de mayor precipitación como 2008, donde el caudal medio alcanzó 8.84 m<sup>3</sup>/s. La variabilidad en estos valores demuestra que esta cuenca necesita de precipitación para tener un afluente.

- Tendencia de recuperación en la última década:

Durante el período 2011-2024, se observa un aumento promedio en los caudales ofertados en comparación con la década anterior. En general, los registros muestran una mejora en la disponibilidad hídrica, destacando el año 2023 con un caudal medio que alcanzó los 10.48 m<sup>3</sup>/s. Este dato sugiere que en ciertos años se ha logrado una recuperación parcial. No obstante, esta tendencia no ha sido constante, ya que también se evidencian descensos significativos en años 2014 y 2020, lo que refleja una variabilidad importante en el comportamiento hidrológico de la microcuenca.

- Aumento en la variabilidad climática y su impacto en la disponibilidad de agua:

Al comparar los períodos 2001-2010 y 2011-2024, se observa que la variabilidad de los caudales incrementa significativamente. Esto sugiere que los eventos climáticos extremos, como lluvias intensas seguidas de períodos secos prolongados, se han vuelto más frecuentes dentro de la cuenca. Este tipo de fluctuaciones es típico de los impactos del cambio climático en ecosistemas de alta montaña, donde el aumento de la temperatura y los cambios en los

patrones de precipitación están provocando un desequilibrio en la disponibilidad del recurso hídrico.

#### **4.6 Relación Entre Precipitación, Temperatura y Escorrentía**

La modelación hidrológica mostro que la relación precipitación-escorrentía es altamente sensible a los cambios en las condiciones climáticas. Como se muestra en la Tabla 11, aunque algunos años experimentaron un aumento en la precipitación, la escorrentía no siempre respondió de manera proporcional. Este comportamiento puede explicarse por los siguientes factores:

- Incremento de la temperatura y mayor evapotranspiración:

El incremento de la temperatura media anual, especialmente bajo escenarios climáticos extremos como el RCP 8.5, ha generado mayores pérdidas de agua por evaporación. Esto reduce la cantidad de agua disponible en el suelo, lo que a su vez disminuye la escorrentía y los caudales en determinados períodos.

- Cambio en la cobertura del suelo y capacidad de retención hídrica:

La pérdida de cobertura vegetal, en especial en áreas de páramo, ha debilitado la capacidad del ecosistema para almacenar agua. Como resultado, el agua fluye más rápidamente por la superficie y se infiltra menos, lo que afecta la estabilidad de los caudales base, sobre todo en temporadas secas.

- Eventos extremos y distribución irregular de lluvias:

En algunos años, las lluvias se han concentrado en lapsos muy cortos, provocando crecidas repentinas. Esto explica por qué, a pesar de registrarse caudales altos en ciertos momentos, no se ha logrado un incremento sostenido de la oferta hídrica a largo plazo.

#### **4.7 Implicaciones para la Gestión del Recurso Hídrico**

Los resultados de este estudio tienen un impacto directo en la forma en que se debe planificar y gestionar el recurso hídrico en la microcuenca Chimborazo. A partir del análisis realizado, se proponen tres estrategias clave para enfrentar los efectos del cambio climático:

- Fortalecimiento de la conservación de ecosistemas altoandinos:

Recuperar el páramo y promover programas de reforestación con especies nativas puede aumentar la capacidad de la cuenca para retener agua, ayudando a estabilizar la escorrentía y mejorar la regulación hídrica natural.

- Monitoreo y actualización de modelos climáticos:

Instalar estaciones hidrometeorológicas para una mejor comprensión del comportamiento climático en la cuenca. Esto permitiría ajustar las estrategias de manejo del agua de forma más precisa ante los distintos escenarios de cambio climático.

## **Capítulo 5**

### **Conclusiones**

- La microcuenca Chimborazo cuenta con una extensión de 174.94 km<sup>2</sup> y un rango altitudinal que va desde los 3,094 hasta los 6,288 msnm. El análisis de la morfología reveló una densidad de drenaje de 0.60, lo cual indica que la microcuenca tiene una buena capacidad de respuesta ante lluvias intensas. Además, la relación de elongación de 0.44 señala una forma alargada, influyendo en cómo se distribuye el caudal durante los eventos de precipitación.
- El análisis multitemporal de la cobertura vegetal mostró que entre 2000 y 2020, la superficie de páramo se redujo en un 9.9% (15,483.8 km), mientras que el mosaico agropecuario aumentó en un 10.4% (16,504.8 km). Estos cambios han generado una disminución en la capacidad de campo. Esto confirma que el deterioro de la cobertura vegetal está afectando la estabilidad hidrológica de la microcuenca. El cálculo del Número de Curva (CN) reflejó una tendencia a la baja en la capacidad de infiltración del suelo, pasando de 74.68 en el año 2000 a 74.51 en 2024. Este cambio, aunque leve, indica un aumento en la compactación del suelo y una menor capacidad de absorción de agua, lo que puede agravar los efectos de eventos climáticos extremos.
- En cuanto a la oferta hídrica, los datos revelan una variabilidad significativa a lo largo de las últimas décadas. Entre 2001 y 2010, el caudal medio descendió a 6.31 m<sup>3</sup>/s en comparación con los 8.38 m<sup>3</sup>/s registrados entre 1981 y 2000. Sin embargo, entre 2011 y 2024 se observó una leve recuperación, con un promedio de 8.34 m<sup>3</sup>/s. Este repunte se asocia en parte a iniciativas de restauración ambiental en zonas altas, pero también refleja

la creciente influencia de fenómenos climáticos extremos que generan altibajos marcados en la disponibilidad de agua.

- La modelación hidrológica confirmó que la relación entre precipitación y escorrentía es muy sensible a los cambios en las condiciones climáticas. Aunque hubo años con lluvias abundantes, no siempre se aumentó la escorrentía, debido a factores como el aumento de la evapotranspiración por el incremento de la temperatura, la pérdida de cobertura vegetal y la concentración de lluvias en períodos cortos.
- Finalmente, los resultados de este estudio destacan la urgencia de implementar estrategias de conservación y manejo sostenible del agua. Es fundamental reforzar la protección de los páramos y fortalecer los sistemas de monitoreo climático para anticipar y gestionar los efectos del cambio climático en la microcuenca Chimborazo.

## **Recomendaciones**

los resultados del estudio confirman que la microcuenca Chimborazo presenta una alta vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático, evidenciada por la creciente variabilidad en la oferta hídrica. La pérdida de cobertura vegetal, sumada al aumento progresivo de la temperatura, ha alterado la capacidad natural de la cuenca para regular el agua. Esta situación pone en evidencia la urgencia de aplicar acciones concretas de conservación y gestión eficiente del recurso hídrico.

Se plantea estrategias de restauración ambiental, la reforestación de las zonas de páramo y la disminución de las zonas agropecuarias en el páramo. Estas acciones contribuirán a mejorar la capacidad del suelo para retener agua. Finalmente, se considera fundamental fortalecer la red de monitoreo hidrometeorológico en la microcuenca, incorporando nuevas estaciones y mejorar el registro de datos permitirá afinar las proyecciones climáticas y diseñar estrategias de adaptación más precisas y eficaces, asegurando así una gestión sostenible del agua en el territorio.

## Referencias Bibliográficas

- Adolph, R. (2022). Efecto de captadores de niebla y enriquecimiento con especies nativas en la recuperación de la oferta hídrica de la microcuenca del páramo pan de azúcar, Duitama-Boyacá. *[Tesis Pregrado]*, *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 1–147.
- Ahmed, S., Rudra, R., Goel, P., Khan, A., Gharabaghi, B., & Sharma, R. (2022). A Comparative Evaluation of Using Rain Gauge and NEXRAD Radar-Estimated Rainfall Data for Simulating Streamflow. *Hydrology*, 9(8), 1–36. <https://doi.org/10.3390/hydrology9080133>
- Berrones, J., & Moreta, J. (2018). Evaluación de la huella hídrica de la microcuenca del río Chimborazo en el fortalecimiento de su gestión y política comunitaria. In *[Tesis Pregrado]*, *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*.
- Bustamante, M., Albán, M., & Argüello, M. (2011). *Los Paramos De Chimborazo Un Estudio Socioambiental Para La Toma De Decisiones*.
- Campos, E. (2024). Mecanismo de compensación sostenible del páramo de la microcuenca del río Chimborazo. In *[Tesis Posgrado]*, *Universidad Nacional Agraria La Molina*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2131/L02-C389-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CONDESAN. (2018). *Gestión integral del agua en los Andes: Desafíos y oportunidades*. Consorcio Para El Desarrollo Sostenible de La Ecorregión Andina. <https://www.condesan.org>
- Córdoba, E. (2021). Evaluación del índice de escasez para aguas superficiales mediante el cálculo de la oferta y demanda hídrica en la microcuenca del río palo en el municipio de Puerto Tejada (Cauca). In *[Tesis Pregrado]*, *Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria*. <http://repositorio.uniautonomo.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/596>
- Cotacachi, H., & Aguirre, P. (2024). Programa de educación ambiental para la conservación de los recursos hídricos en la microcuenca del río escudillas. In *[Tesis Posgrado]*, *Universidad Técnica del Norte*. <https://www.mendeley.com/reference-manager/reader->

v2/03daf073-d723-39a1-beca-d5375debc9b1/430a9ddb-647c-25cd-05ce-911385d5959a

- Crispin, M. (2023). Valor de la Agrobiodiversidad ante Cambios en la Oferta Hídrica. Resultado de un Modelo Hidroeconómico, Microcuenca Mariño, Apurímac. In *[Tesis Posgrado]*, Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://agroeco.org/wp-content/uploads/2010/10/Libro-Agroecologia.pdf>
- Damian, D., Marquéz, C., García, V., Recalde, C., Rodríguez, M., & Ayala, J. (2017). *Priorización de microcuencas en los Andes ecuatorianos usando parámetros morfométricos, WSA y GIS*. 38–61.
- Díaz, D. (2018). 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. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/1450>
- Díaz, J. (2017). Determinación de la disponibilidad hídrica superficial mediante balance hídrico en la Cuenca del Río Cumbaza-San Martín, 2016. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Peruana Unión. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/957>
- Duque, P., Patiño, D., & López, X. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. *Información Tecnológica*, 30(6), 351–362. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000600351>
- Farfán, J., Palacios, K., Ulloa, J., & Avilés, A. (2020). A hybrid neural network-based technique to improve the flow forecasting of physical and data-driven models: Methodology and case studies in Andean watersheds. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27(January), 100652. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100652>
- Gómez, A. (2021). Cálculo de la oferta hídrica superficial de la microcuenca río tejo del municipio de Ocaña, norte de Santander para el año 2020 a través de la metodología lluvia-escurrentía para la conservación, manejo y uso sostenible del recurso hídrico. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Guerrero, H., García, D., & Seguí, L. (2021). Industrial water productivity in Mexico: Efficiency analysis for eight sectors. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(1), 313–357.

<https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-01-08>

- Guevara, D. (2015). Propuesta para determinar la oferta hídrica neta de una cuenca contemplando escenarios extremos: Caso de estudio microcuenca del río Upín. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Católica de Colombia.
- Hernando, L. (2017). Oferta hídrica en la microcuenca del río Pará, región central de Costa Rica. In *[Tesis Posgrado]*, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Intriago, P., Rodríguez, M., Caicedo, M., & Espinales, F. (2021). Estudio hidromorfológico de la cuenca efímera Maconta con relación al riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 8(no SPE2), 1–21.
- IPCC. (2021). *Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Jaya, V., & Rodriguez, E. (2023). Determinación de la oferta hídrica en las microcuencas de los ríos Ishpi, Daldal, Uldán y quebrada Cachipata, en la Provincia de Chimborazo. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Nacional de Chimborazo. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10872>
- Larrea, A., & Maldonado, C. (2022). Determinación de la oferta hídrica de la microcuenca Guamote y quebrada Compuene Gorge, en la provincia de Chimborazo. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Nacional de Chimborazo. [http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10251/1/Larrea\\_Maldonado\\_2022\\_Determinación de la oferta hídrica de la microcuenca Guamote y quebrada Compuene Gorge%2C en la provincia de Chimborazo %281%29.pdf](http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/10251/1/Larrea_Maldonado_2022_Determinación%20de%20la%20oferta%20hídrica%20de%20la%20microcuenca%20Guamote%20y%20quebrada%20Compuene%20Gorge%2C%20en%20la%20provincia%20de%20Chimborazo%20-%202022.pdf)
- Meza, Y. (2014). Determinación de la oferta y demanda hídrica de la microcuenca el silencio localizada en el corregimiento de Otare del municipio de Ocaña en apoyo para su reglamentación. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Muñoz, J., Gentili, J., & Bustos, R. (2020). Uso agrícola del suelo y demanda de agua para riego en la cuenca del río Vinces (Ecuador) durante el período 1990 – 2014. *Investigaciones Geográficas*, 59, 91–104. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2020.56958>

- Navarro, D., Vallejo, I., & Navarro, M. (2020). Analysis of social vulnerability to natural risk using multivariate statistical techniques. *Investigaciones Geográficas*, 2020(74), 29–49. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.NVN>
- ONU. (2014). Informe sobre el primer período de sesiones de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente del Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente. *Programa de La Naciones Unidas Para El Medio Ambiente*, 1–69.
- Popayan, E., León, J., & Madroñero, S. (2019). Evaluación de la regulación hídrica: oferta y calidad de la quebrada Telléz, microcuenca Ortiz. *Boletín Informativo CEI*, 6(2), 92–95.  
<http://editorial.umariana.edu.co/revistas/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/2013>
- Quiñonez, E. (2022). Determinación del número de curva (CN) a partir de imágenes satelitales, cuenca río Mapuey, municipio Ezequiel Zamora, Estado Cojedes. *Revista Científica VIPICREA*, 3, 1–14.
- Ramirez, U. (2018). Oferta y demanda hídrica de la microcuenca Curpaga para el distrito de riego Interveredal, Cacota de Velasco-Norte de Santander. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Pamplona.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gde.2016.09.008><http://dx.doi.org/10.1007/s00412-015-0543-8><http://dx.doi.org/10.1038/nature08473><http://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2009.01.007><http://dx.doi.org/10.1016/j.jmb.2012.10.008><http://dx.doi.org/10.1038/s41598>
- Romero, J., Buitrago, A., Quintero, T., & Francés, F. (2018). Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. *Ribagua*, 5(1), 63–78.  
<https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574>
- Rosales, A. (2019). Oferta hídrica para uso agrario en la microcuenca Huancallima utilizando ArcGIS y el modelo de Lutz Scholtz. In *[Tesis Pregrado]*, Universidad Federico Villareal.
- Samboni, N., Aldemar, R., & Yesid, C. (2011). Aplicación de los indicadores de calidad y contaminación del agua en la determinación de la oferta hídrica neta Application of the quality indicators and contamination of the water in the determination of net hydric

- supply. *Environmental Engineering*, 60(2), 49–60.
- Sofia, L. I., Sergio, G., & Marlon, P. (2020). *Aplicación de índices bióticos para la evaluación de la calidad del agua de un río Andino Amazónico*. May.
- Tapia, L., & Ulloa, A. (2020). Transiciones en los cambios de uso y cobertura de suelo en la Reserva de Producción Faunística Chimborazo. In *[Tesis Pregrado], Universidad Nacional de Chimborazo*.  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/5753/3/33T0160.pdf>
- Tassew, B., Belete, M., & Miegel, K. (2019). Application of HEC-HMS Model for Flow Simulation in the Lake Tana Basin: The Case of Gilgel Abay Catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrology*, 6(21), 1–17.  
<https://doi.org/10.3390/hydrology6010021>
- Zarta, S. (2022). Desarrollo de un modelo hidrológico para determinar la oferta hídrica de la microcuenca de la quebrada Calostros en el municipio de la Calera, Cundinamarca. In *[Tesis Pregrado], Universidad Católica de Colombia*.