



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 MENCIÓN RECURSOS

HÍDRICOS

TEMA:

**“DIAGNÓSTICO HIDROLÓGICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO SICALPA CON
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO”**

AUTOR:

Ing. Hernán Vinicio Arias Zapata

TUTOR:

Ing. Mauro José Jiménez Granizo, Mgs.

Riobamba – Ecuador

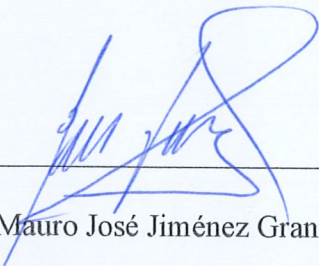
2025

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “Diagnóstico hidrológico de la microcuenca del río Sicalpa con escenarios de cambio climático”, ha sido elaborado por el Ingeniero Hernán Vinicio Arias Zapata, 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, Mgs.

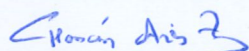
TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Hernán Vinicio Arias Zapata**, con número único de identificación **060334205-6**, 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 del río Sicalpa con escenarios de cambio climático.” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental 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



Ing. Hernán Vinicio Arias Zapata

N.U.I. 060334205-6

Agradecimiento

Una eterna gratitud a Dios por ser nuestra guía, fuente de sabiduría y amigo fiel. A la Universidad Nacional de Chimborazo por darnos la bienvenida al mundo del conocimiento, a la Maestría en Ingeniería Ambiental Mención en Recursos Hídricos por brindarnos una formación profesional y humanista con valores morales y éticos para afrontar los problemas de la sociedad.

Al Mgs. Mauro Jiménez quien con su amistad y profesionalismo supo guiarme por el camino de la excelencia y finalizar exitosamente este trabajo de investigación.

Al PhD. Benito Mendoza quien con su amistad, motivación y orientación profesional ha sabido guiarme en el trabajo investigativo.

Al presidente y miembros del tribunal, quienes han sido de gran ayuda en el proyecto de investigación.

Un agradecimiento no menos importante, a catedráticos que impartieron sus enseñanzas en el transcurso de duración de la maestría. Gracias a todas las personas que estuvieron compartiendo experiencias y conocimientos en este período de investigación.

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. Con gratitud desde el fondo de mi corazón a mis padres (Cecilia y Marco) por ser la luz que guía mi camino, por darme todo sin pedir nada, son el mejor regalo que Dios me ha dado. A mi sobrino (Mathías André) una de las razones para seguir adelante y una de las personas más importantes en mi vida, a mi hermana y hermano (Esthelita y Marco) por su apoyo incondicional, por estar siempre pendientes de mí, han sido el pilar fundamental en mi formación, también es de vital importancia mencionar a mi abuelito Cesar Arias (+), abuelita Hortencia Muñoz (+) y tía Esthelita Arias (+), quienes me bendicen y me guían, un abrazo al cielo, cuñada, tíos, primos y amigos, gracias a ustedes mis días son alegres soy afortunado de tenerlos a mi lado.

Índice General

Certificación del Tutor.....	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos.....	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria.....	v
Índice General	vi
Índice de Tablas.....	x
Índice de Ilustraciones	xi
Índice de Mapas Temáticos	xi
Resumen	xii
Introducción.....	1
Capítulo 1.....	2
Generalidades	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Justificación de la Investigación.....	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
Capítulo 2.....	4
Estado del Arte y la Práctica	4
2.1. Antecedentes Investigativos.....	4
2.1.1. Estudio hidrológico, para la evaluación cuantitativa del recurso hídrico del municipio de Chaparral Tolima, mediante herramientas informáticas HEC-HMS.....	4
2.1.2. Use of the HEC-HMS model for the evaluation of land use change and surface runoff. .	5
2.1.3. Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su efecto en los caudales máximos para la cuenca del río Guaguí en el municipio de Barbacoas, Nariño.	5
2.1.4. Assessment of Land Use and Land Cover Changes on Hydrological Responses in the Wadi Soummam Watershed, Algeria Using the HEC–HMS Model.	6
2.1.5. Determinación de la oferta hídrica en las microcuencas de los ríos Ishpi, Daldal, Uldán y quebrada Cachipata, en la Provincia de Chimborazo.	6
2.2. Fundamentación Teórica.....	6
2.2.1. Cuenca Hidrográfica.....	6
2.2.2. Geomorfología	6
2.2.3.2. Perímetro de la cuenca (P).....	7
2.2.3.1. Área de la cuenca (A).....	7

2.2.3. Características Físicas de las Cuencas	7
2.2.3.3. Índice de compacidad (Ic)	7
2.2.3.4. Factor de Forma (Ff)	7
2.2.3.5. Relación de Elongación (Re).....	7
2.2.3.6. Relación de circularidad (Rci).....	8
2.2.4. Parámetros de Relieve	8
2.2.4.1. Diagrama de frecuencias altimétricas.....	8
2.2.4.2. Pendiente de la cuenca	8
2.2.4.3. Curva Hipsométrica.....	8
2.2.4.4. Relación del relieve (Rr)	8
2.2.5. Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca	9
2.2.5.1. Componentes de la red de drenaje.....	9
2.2.5.2. Densidad de drenaje (Dd).....	9
2.2.5.3. La pendiente media (Sm)	9
2.2.6. Sistema de información geográfica	9
2.2.7. Sistemas de teledetección	9
2.2.8. Google Earth Engine	10
2.2.9. Modelo Hidrológico	10
2.2.10. Modelo Hidrológico mediante el software HEC-HMS	10
2.2.10.1. Datos de entrada.....	11
2.2.10.2. Modelo de la cuenca.....	11
2.2.10.3. Modelo de precipitación.....	12
2.2.10.4. Módulo de control	12
2.2.11. Precipitación esorrentía	12
Capítulo 3	13
Diseño Metodológico	13
3.1. Tipo de Investigación	13
3.2. Metodología de la investigación	13
3.2.1. Identificación del área de estudio	14
3.2.2. Descripción del área de estudio y selección de puntos de muestreo	14
3.2.3. Determinación de parámetros geomorfológicos.	15
3.2.4. Análisis multitemporal de la cobertura vegetal	15
3.2.5. Procesamiento de datos en Google Earth Engine.	15
3.2.5.1. Colección de ASTER L1T Radiance.....	15

3.2.5.2. Colección de Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.....	16
3.2.5.3. Clasificación de la cobertura.....	17
3.2.6. Detección de cambios.....	18
3.2.6.1. Método de clasificación directa.....	18
3.2.6.2. Random Forest.....	18
3.2.6.3. Árbol de decisión.....	18
3.2.7. Validación de la precisión de datos obtenidos.....	18
3.2.7.1. Evaluación de fiabilidad.....	18
3.2.7.2. Índice Kappa.....	18
3.2.7.3. Matriz de confusión.....	20
3.2.8. Velocidad de cambios.....	20
3.2.8.1. Evaluación de la velocidad de cambios de uso de la tierra.....	20
3.2.9. Determinar la capacidad de campo (CN).....	21
3.2.9.1. Cálculo y asignación de número de curva (CN).....	21
3.2.9.2. Capacidad de campo o potencial máximo de retención (S).....	21
3.2.9.3. Capacidad de campo de la microcuenca del río Sicalpa.....	22
3.2.10. Modelación para obtener la relación de precipitación - escorrentía.....	23
3.2.10.1. SCS Hidrograma Unitario.....	23
3.2.10.2. Tiempo de pico T_p	23
3.2.10.3. Caudal pico Q_p	23
3.2.10.4. Forma del hidrograma unitario.....	23
Capítulo 4.....	24
Resultados y Discusión.....	24
4.1. Geomorfología de la microcuenca del río Sicalpa.....	24
4.2. Análisis multitemporal.....	25
4.2.1. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000 en la microcuenca del río Sicalpa.....	26
4.2.2. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2010 en la microcuenca del río Sicalpa.....	27
4.2.3. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2020 en la microcuenca del río Sicalpa.....	28
4.3. Detección de Cambios.....	30
4.4. Velocidad de cambios.....	30
4.5. Capacidad de campo.....	31
4.6. Modelación para obtener la relación de precipitación – escorrentía.....	32

4.6.1. Relación precipitación-escorrentía de la microcuenca del río Sicalpa	32
4.6.1.1. Relación precipitación – escorrentía periodo 1981 al 2000	32
4.6.1.1.1. Oferta hídrica periodo 1981 al 2000.....	32
4.6.1.2. Relación precipitación – escorrentía periodo 2001 al 2011	33
4.6.1.2.1. Oferta hídrica periodo 2001 al 2011.....	34
4.6.1.3. Relación precipitación – escorrentía periodo 2012 al 2023	34
4.6.1.3.1. Oferta hídrica periodo 2012 al 2023.....	35
4.6.1.4. Variación de la oferta hídrica en la microcuenca del río Sicalpa	35
Conclusiones	37
Recomendaciones	38
Referencias Bibliográficas	39
Anexos	45
Anexo 1. Inventario y concesiones de uso de agua del cantón Colta.....	45
Anexo 2. Tipo de concesiones en el cantón Colta.....	45
Anexo 3. Relación precipitación – escorrentía periodo 1981-2023	46
Anexo 4. Oferta hídrica periodo 1981-2023.	46
Anexo 5. Variación de la oferta hídrica periodo 1981-2023.	47

Índice de Tablas

Tabla 1. Catálogo de datos Earth Engine “ASTER L1T Radiance.	16
Tabla 2. Catálogo de datos de "H2 Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.....	17
Tabla 3. Clases seleccionadas de cobertura terrestre.	17
Tabla 4. Matriz de confusión para multiclases.....	20
Tabla 5. Valoración del índice Kappa.....	20
Tabla 6. Intervalos de clases para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo.....	20
Tabla 7. Asignación de HSG y CN para la microcuenca del río Sicalpa.....	22
Tabla 8. Asignación de HSG y CN para la microcuenca del río Sicalpa.....	22
Tabla 9. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca del río Sicalpa.....	24
Tabla 10. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000.....	27
Tabla 11. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2010.....	28
Tabla 12. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2020.....	29
Tabla 13. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000-2020.....	30
Tabla 14. Evaluación de la velocidad de degradación de los cambios de uso de la tierra.....	30
Tabla 15. Parámetros hidráulicos en la microcuenca del río Sicalpa.....	31
Tabla 16. Caudal ofertado periodo 1981-2000.....	32
Tabla 17. Caudal ofertado periodo 2001-2011.....	34
Tabla 18. Caudal ofertado periodo 2012-2023.....	35
Tabla 19. Variación de la oferta hídrica.....	36
Tabla 20. Concesiones de agua del cantón Colta según el tipo de uso y caudal utilizado.....	45
Tabla 21. Tipo de concesiones en el cantón Colta.....	45
Tabla 22. Oferta hídrica periodo 1981-2023.....	46

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Curva Hipsométrica.	25
Ilustración 2. Precipitación - Escorrentía periodo 1981-2000.....	32
Ilustración 3. Precipitación - Escorrentía periodo 2001-2011.....	33
Ilustración 4. Precipitación - Escorrentía periodo 2012-2023.....	35
Ilustración 5. Precipitación - Escorrentía periodo 1981-2023.....	46

Índice de Mapas Temáticos

Mapa Temático 1. Ubicación geográfica de la microcuenca del río Sicalpa.	14
Mapa Temático 2. Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000.	26
Mapa Temático 3. Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en el periodo 2010.	27
Mapa Temático 4. Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en el periodo 2020.	29

Resumen

El procesamiento y la interpretación de imágenes satelitales tienen una notable potencialidad de aplicación en diversos ámbitos, entre ellos los relacionados con los recursos hídricos. Las utilidades de la Teledetección conjuntamente con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten manipular gran cantidad de información con facilidad y rapidez, siendo de inestimable ayuda en tareas como proyecto, gestión e investigación de los recursos hídricos.

El propósito de esta investigación fue analizar las variaciones en la cobertura y utilización del suelo durante el periodo de 2000 a 2023, considerando las tendencias actuales y su patrón histórico, y comprobando el efecto de la modificación en la utilización del suelo en la dinámica hidrológica de la microcuenca del río Sicalpa, utilizando teledetección.

Una vez que se han obtenido los parámetros mencionados, se llevó a cabo la modelación matemática en el programa HEC-HMS, utilizando el método SCS de número de curva. Se utilizaron datos de la precipitación diaria, la evapotranspiración media mensual, las temperaturas diarias, así como resultados geomorfológicos como el límite de esorrentía, el tiempo de retraso y el número de curva, durante un periodo de 20 años, consiguiendo valores de caudal diarios desde 1981-2023.

El mayor cambio de cobertura de la microcuenca del río Sicalpa, se asocia a la actividad agropecuaria con el 28,26% de incremento que representa 3775 ha, La ampliación de la frontera agrícola es la principal razón para la modificación del uso del suelo y la disminución de la cobertura de vegetación. Por lo tanto, la investigación establece que las actividades humanas alteran la condición natural de la microcuenca.

La microcuenca del río Sicalpa posee una oferta hídrica media de 2,42 m³/s y cuenta con estabilidad de caudales ecológicos. La predominancia de la cobertura de páramo, la cual tiene una alta capacidad de retención del agua, afecta a esta estabilidad, lo que permite determinar la importancia de la conservación de la vegetación nativa.

Sobresale la necesidad de implementar iniciativas sostenibles que buscan la conservación y regeneración de páramos y cobertura boscosa.

Palabras clave: dinámica hidrológica, teledetección, modelación matemática, cambios de uso de suelo, oferta hídrica.

Abstract

The processing and interpretation of satellite images have notable application potential in various areas, including those related to water resources. The utilities of remote sensing, together with geographic information systems (GIS), allow a large amount of information to be manipulated easily and quickly, and they are invaluable in tasks such as projects, management, and research of water resources. The objective of this study is to evaluate the changes in land cover and use during the period 2000-2023, taking into account current use trends and their historical pattern, verifying the impact of the change in land use on the hydrological dynamics of the Sicalpa River micro-basin, using remote sensing. Once the described parameters are obtained, mathematical modeling is carried out in the HEC-HMS program, applying the SCS curve number method. Data on daily precipitation, average monthly evapotranspiration, and daily temperatures are used, along with geomorphological results such as runoff threshold, delay time, and curve number over 20 years, obtaining daily flow values from 1981-2023. The most significant change in coverage of the Sicalpa River micro-basin is associated with agricultural activity, with a 28.26% increase, representing 3,775 ha. The expansion of the agricultural frontier is the leading cause of the change in land use and loss of vegetation cover. For this reason, the study determines that anthropogenic activities affect the natural state of the micro-basin. The Sicalpa River micro-basin has an average water supply of 2.42 m³/s and stability in its ecological flows. The predominant coverage of paramo, with its high water retention capacity, contributes to this stability, demonstrating the importance of conserving native vegetation. The need to implement sustainability initiatives, which seek the conservation and/or regeneration of moors and forest cover, is highlighted.

Keywords: mathematical modeling, remote sensing, coverage changes, water supply, sustainability.

Abstract translation reviewed by



Dr. Narcisca Fuertes, PhD.

CC: 1002091161

Professor at Competencias Lingüísticas UNACH

Introducción

Actualmente, el aumento de la población y las transformaciones en las actividades productivas intensifican la competencia por los recursos acuáticos, generando un incremento en la demanda de agua. Es probable que en el futuro haya un escenario insostenible, que representará un gran desafío para los gestores de la cuenca en cuanto a la satisfacción de los usuarios de agua y los caudales ecológicos (Avilés et al., 2020).

El agua es el principal agente causante de cambios atmosféricos y, por lo tanto, del clima, de ahí que la hidrología está fuertemente enlazada con la meteorología y la climatología (López, X., & Patiño, D, 2017). La cobertura con especies vegetales sobre una cuenca hidrográfica mantiene influencia en el flujo de hídrico vertical (evapotranspiración e infiltración) y horizontal (escorrentía). El tipo de especies presentes define el paisaje fluvial en una cuenca, generando patrones característicos de distribución tanto en el cauce principal del río como en los diferentes sectores de una (Volonté et al., 2018).

Las cuencas hidrográficas ofrecen servicios ambientales clave y, con buena gestión, pueden impulsar el desarrollo socioeconómico local. Se prevé que la variabilidad climática y el cambio afecten los extremos meteorológicos e hidrológicos, impactando ecosistemas y los sectores urbanos, agrícola y de energía (Avilés et al., 2020).

Los modelos de cuencas hidrográficas son útiles para gestionar recursos hídricos en cuencas al evaluar la cantidad, calidad y el uso de agua y, además, hacer predicciones de flujos futuros simulando escenarios de uso del suelo, variabilidad climática y cambios antropogénicos (Vaca & Noboa, 2024). La modelación hidrológica enriquece esta metodología, permitiendo simular cambios en procesos cruciales como infiltración, escorrentía y transporte de sedimentos en diferentes escenarios de manejo (Mendoza et al., 2021).

Esta investigación busca hacer un análisis hidrológico utilizando tecnologías de teledetección y modelación matemática para medir los impactos que los cambios en el uso del suelo tienen en la microcuenca del río Sicalpa.

Capítulo 1

Generalidades

1.1.Planteamiento del problema

La pérdida de la vegetación en los páramos está ligada al detrimento de la calidad de las aguas superficiales. La ganadería, la agricultura, el crecimiento demográfico, la deforestación y el fenómeno de la desertificación por la actividad agrícola son los impactos más relevantes en esta área (Chancusig Quishpe, 2024).

Como resultado del crecimiento de la población y de las alteraciones en la utilización de la tierra, se espera que tanto los requisitos como la demanda de recursos hídricos aumenten. Por lo tanto, la planificación de recursos hídricos y gestión territorial en cuencas son esenciales para el suministro de agua para consumo humano e industrial, riego, energía hidroeléctrica y conservación de ecosistemas; también ayudan a reducir la intensidad de eventos extremos como inundaciones y sequías (Patiño, N, 2021).

Las modificaciones en el ciclo hidrológico están estrechamente vinculadas con la cobertura vegetal de las cuencas. Las coberturas son fundamentales, ya que disminuyen las pérdidas por escorrentía y retrasan la evacuación de las lluvias; así, una cuenca con poca vegetación presenta caudales picos más pronunciados que aquellas con vegetación media o alta (Bastidas González et al., 2020).

Es importante comprender los posibles impactos relacionados con el clima, dado que estos pueden interactuar de manera compleja con otros elementos del cambio global. Lo anterior, debido a que no solo se esperan cambios en la hidrología media, sino también en la variabilidad hidrológica, los cuales son importantes para la gestión de los recursos hídricos (Gómez, A, 2021). Por lo que, se plantea utilizar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS, dada su facilidad de manejo y disponibilidad de la información de entrada (Torres Elizalde, 2019).

Por lo tanto, el presente estudio busca utilizar la modelación hidrológica y teledetección como herramientas para la predicción de caudales y cambio en el uso del suelo sobre la dinámica hidrológica de la microcuenca del río Sicalpa. Estas herramientas son muy útiles para la evaluación, desarrollo y gestión de los recursos hídricos.

1.2. Justificación de la Investigación

La atención en el análisis de las consecuencias del calentamiento global en una región hidrográfica ha ido creciendo en los últimos años, sobre todo en la parte relacionada a la planeación y el control de las inundaciones. Esto ocurre debido a la cada vez mayor concentración de gases invernadero en la atmósfera que modifica la temperatura y la pluviosidad, a los ríos y recursos hídricos (Orozco et al., 2018b).

Las alteraciones en la cobertura del suelo y el uso del suelo son contribuyentes principales que disminuyen los recursos hídricos dentro de la cuenca. Lo anterior puede ser llevado a cabo mediante modelos y simulaciones que usan como base información geográfica y pueden ser herramientas claves para la toma de decisiones desde el ordenamiento territorial (Jaramillo, M et al., 2021).

Se puede observar consecuencias directas del cambio climático con el aumento o disminución de la disponibilidad de las aguas superficiales (Pérez-Campomanes & Iannacone, 2020). Investigar el impacto potencial del Cambio Climático en los flujos y almacenamientos de una cuenca montañosa es fundamental, ya que afecta directamente la gestión de recursos hídricos y la respuesta hidrológica, provocando inundaciones y avenidas extraordinarias (Orozco et al., 2018b).

Analizar tanto la lluvia, como la escorrentía es crucial en el aspecto de la conservación de recursos y la mitigación de los efectos del cambio climático y la alteración del uso del suelo. Los páramos son muy afectados por factores globales como el cambio en el uso del suelo y el cambio climático (Cabrera-Balarezo et al., 2019).

Estudiar la modelación hidrológica se ha convertido en una herramienta útil al momento de evaluar, desarrollar y gestionar los recursos hídricos. Los modelos de precipitación-escorrentía permiten determinar los caudales máximos, mínimos y medios, que son importantes para el dimensionamiento de obras y diseño de operación (Torres Elizalde, 2019). Por ello, es útil emplear nuevas herramientas tecnológicas de modelización hidrológica para optimizar la gestión de los recursos hídricos y conocer la disponibilidad de agua ante diversos escenarios como el cambio climático, aumento poblacional, etc (Patiño, N, 2021).

El presente estudio evaluará el impacto del cambio climático en la hidrología de la microcuenca Sicalpa, a través de un estudio multitemporal y modelación hidrológica de las características de la cobertura vegetal y cambio de uso de suelo, y proyección de escenarios de cambio climático relacionado a la precipitación y temperatura.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar el diagnóstico hidrológico de la microcuenca del río Sicalpa con escenarios de cambio climático.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características geomorfológicas e hidráulicas de la microcuenca.
- Efectuar el estudio multitemporal de las características de cobertura vegetal y uso de suelo.
- Realizar el modelamiento hidrológico con escenarios de cambio climático (precipitación, temperatura).

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1. Antecedentes Investigativos

2.1.1. Estudio hidrológico, para la evaluación cuantitativa del recurso hídrico del municipio de Chaparral Tolima, mediante herramientas informáticas HEC-HMS.

Autores: Cruz Gómez & Lancheros Hernández. (2024).

Los autores tuvieron como objetivo principal evaluar la capacidad hídrica de la subcuenca de la quebrada San Jorge; la cual suministra de agua a la bocatoma del municipio de Chaparral, mediante la modelación en la herramienta informática HEC-HMS. Para lograr este objetivo, se realizó: el procesamiento de datos históricos de precipitaciones para las estaciones ubicadas en el área de influencia del municipio de Chaparral, mediante la información suministrada por Cortolima a nivel municipal, y del IDEAM a nivel nacional; la modelación hidrológica utilizando el software HEC- HMS, construyendo un modelo que simule el comportamiento hidrológico de la subcuenca de la Quebrada San Jorge. En conclusión, se

evaluó la capacidad hídrica de la subcuenca de la quebrada San Jorge, la cual suministra agua al municipio de Chaparral-Tolima, a partir de la información recopilada de las entidades públicas relacionadas, la modelación hidrológica en la herramienta informática HEC-HMS; se modeló, a partir del método lluvia-Escorrentía y la herramienta informática HEC-HMS, dando como resultado una simulación de las precipitaciones reales, a fin de obtener el caudal para cada fuente de recurso hídrico.

2.1.2. Use of the HEC-HMS model for the evaluation of land use change and surface runoff.

Autores: Palacios Cabrera, T., Valdés Abellán, J., Jódar Abellán & A. Alulema, R. (2020).

Los autores tuvieron como objetivo principal estudiar los cambios en el espacio temporal de la respuesta hidrológica sobre doce sub-cuencas y la dinámica vinculada a las variaciones en la forma de utilizar la tierra-cobertura de la tierra (CLC), en los años 1990, 2000, 2006, 2012 y 2018. Siendo el objetivo, analizar los cambios en la lluvia-escorrentía generada en las variaciones de la cobertura terrestre en el periodo 1990–2018 (cuenca del Embalse Guadalest - superficie de 122,5 km², mediante el modelo del Centro de Ingeniería Hidrológica Sistema de Modelado Hidrológico (HEC-HMS), bajo una remota detección diaria con la finalidad de identificar la dinámica hídrica compleja: técnicas de sistema de información geográfica (SIG). Finalmente, el análisis cíclico y de tendencia de los datos sobre la precipitación evidencia, ciclicidad de 5 años y una tendencia decreciente en el periodo de 1984-2018. Actualmente el uso de suelo ha transformando la foresta primaria de los pastizales naturales y tierras cultivables, lo que tiene relación con una disminución de la evapotranspiración (ET) e infiltración, con un incremento de la escorrentía al inicio, sin embargo, cuando transcurre el tiempo, esta se reduce como consecuencia de la mitigación en el agua disponible.

2.1.3. Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su efecto en los caudales máximos para la cuenca del río Guaguí en el municipio de Barbacoas, Nariño.

Autores: Bastidas González, E., Naranjo Moreno, L. T., & Salazar Sánchez, A. C. (2020).

El objetivo fue analizar los cambios en la cobertura vegetal en la cuenca del río Guaguí ubicada en Barbacoas, Nariño, utilizando análisis multitemporal, y evaluar su efecto en los caudales máximos.

2.1.4. Assessment of Land Use and Land Cover Changes on Hydrological Responses in the Wadi Soummam Watershed, Algeria Using the HEC–HMS Model.

Autores: Abdelkebir, B., Mokhtari, E., & Engel, B. (2024).

El objetivo principal de los investigadores fue reconocer las variaciones en la cobertura del suelo en la región hidrográfica de la cuenca Wadi Soummam utilizando el protocolo HEC-HMS, y llevar a cabo un análisis prospectivo para el periodo 2030-2050 con modelos de Markov. Mediante HEC-HMS y la teledetección, se simuló escorrentía en distintos escenarios de uso de suelo para prever comportamientos hidrológicos futuros.

2.1.5. Determinación de la oferta hídrica en las microcuencas de los ríos Ishpi, Daldal, Uldán y quebrada Cachipata, en la Provincia de Chimborazo.

Autores: Jaya, V. & Rodríguez, E. (2024).

El propósito de este estudio fue calcular la oferta hídrica en las micro-cuencas de Ishpi, Daldal, Uldán y la quebrada Cachipata utilizando los procesos de precipitación-escorrentía. Para ello, se llevaron a cabo análisis de la capacidad de campo y la geomorfología de las microcuencas, estableciendo puntos de muestreo en áreas seleccionadas según la cobertura vegetal y la taxonomía del suelo mediante el uso de SIG.

2.2. Fundamentación Teórica

2.2.1. Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica es un área donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce natural, delimitada por una divisoria de aguas que las dirige al mar (Zhicay, 2020).

El análisis de cuencas hidrográficas ayuda a comprender el ciclo del agua y los impactos de las actividades humanas en su calidad y cantidad, así como en la vida de los habitantes y ecosistemas locales (Yungan, 2024).

2.2.2. Geomorfología

Las características geomorfológicas son las propiedades particulares que posee cada cuenca, estableciendo parámetros importantes de forma preliminar para realizar estudios en la zona (Jiménez, 2021).

Los parámetros geomorfológicos de una cuenca incluyen su forma, relieve, características de la red de drenaje y las del cauce principal, que se detallan a continuación (Arias & Pérez, 2018):

2.2.3.2. Perímetro de la cuenca (P)

El borde del contorno de la cuenca que se proyecta en un plano horizontal obtenido tras la delimitación de la cuenca.

2.2.3.1. Área de la cuenca (A)

Superficie en proyección horizontal, definida por la divisoria de aguas, se registra en Km², a excepción de las cuencas pequeñas que se presentan en ha.

2.2.3. Características Físicas de las Cuencas

2.2.3.3. Índice de compacidad (Ic)

Es la relación entre el perímetro y área de la cuenca. $I_c \approx 1$ cuenca regular; $I_c \neq 1$ cuenca irregular y $I_c = 1$ la cuenca es de forma circular.

$$I_c = 0.282 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (1)$$

Dónde: A = área de la cuenca (Km²), I_c = índice de compacidad, P = perímetro de la cuenca (Km).

2.2.3.4. Factor de Forma (Ff)

Según Horton, se define como la relación entre el ancho medio de la cuenca y su longitud del cauce principal.

$$F_f = \frac{A}{L_c^2} \quad (2)$$

Dónde: L_c = longitud de la cuenca (Km), F_f = factor de forma, A = área de la cuenca (Km²).

2.2.3.5. Relación de Elongación (Re)

Establecido por Schumm, quien lo define como la proporción del diámetro respecto al área de la cuenca (A).

$$R_e = 1,1284 * \frac{\sqrt{A}}{L_c} \quad (3)$$

Dónde: L_c = longitud de la cuenca (Km), R_e = relación de elongación, A = área de la cuenca (Km²).

2.2.3.6. Relación de circularidad (Rci)

Se refiere al cociente entre la superficie de la cuenca y la del círculo cuyo perímetro coincide con el de la cuenca. La cuenca es circular si $R_{ci}=0.785$.

$$R_{ci} = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (4)$$

Dónde: P = perímetro de la cuenca (Km), Rci = relación de circularidad, A = área de la cuenca (Km²).

2.2.4. Parámetros de Relieve

2.2.4.1. Diagrama de frecuencias altimétricas

Es el gráfico que muestra la distribución porcentual de las superficies que se ocupan por distintas altitudes.

2.2.4.2. Pendiente de la cuenca

Está vinculado con la infiltración, el flujo superficial de agua, la humedad del suelo y la aportación del agua subterránea al flujo de los cauces.

2.2.4.3. Curva Hipsométrica

Es la representación gráfica del relieve de una cuenca, mostrando el porcentaje del área o superficie en kilómetros cuadrados que supera una cota específica, expresado en coordenadas rectangulares.

2.2.4.4. Relación del relieve (Rr)

Schumm (1956) sugiere una fórmula muy sencilla para describir el relieve, basándose en la longitud de la cuenca y en la variación de altura entre el punto más elevado en la divisoria de la cuenca (h).

$$R_r = \frac{h}{L} \quad (5)$$

Dónde: L = longitud de la cuenca (m), Rr = relación del relieve, h = diferencia de alturas de la cuenca (m).

2.2.5. Parámetros de la Red Hidrográfica de la Cuenca

2.2.5.1. Componentes de la red de drenaje

El sistema de drenaje de una cuenca incluye el río principal y los ríos afluentes.

2.2.5.2. Densidad de drenaje (Dd)

Horton (1945) Representa la relación entre la longitud total de los cauces que forman parte de su red de drenaje y la superficie de la cuenca.

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (6)$$

Dónde: A = área de la cuenca (Km²), Dd = densidad de drenajes, Lt = longitud total de los cauces (Km).

2.2.5.3. La pendiente media (Sm)

Es la relación entre la longitud del cauce principal y su altura.

$$S_m = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{L} \quad (7)$$

Dónde: **H_{mín}** = altura de la cota mínima (m), **L** = longitud del cauce principal (m), **Sm** = pendiente media, **H_{máx}** = altura de la cota máxima (m).

2.2.6. Sistema de información geográfica

Un SIG es un sistema de métodos, herramientas y datos que trabajan juntos para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar información geográfica y sus atributos con diversos fines (Cruz Romero, Gaspari, Rodríguez Vagaría, Carrillo González, & Téllez López, 2015). Los SIG son una herramienta para manejar y examinar datos espaciales, que nació de la necesidad de acceder rápidamente a información para abordar problemas y responder preguntas de manera inmediata (Larrea & Maldonado, 2022).

2.2.7. Sistemas de teledetección

La Teledetección permite generar información a distancia, sin la necesidad de un contacto directo. Para lograr esto, es preciso que haya algún tipo de interacción entre los objetos

observados, ya sea en tierra, mar o atmósfera, y un sensor en una plataforma, aunque no haya contacto material (Larrea & Maldonado, 2022).

2.2.8. Google Earth Engine

En 2010 Google introdujo “Google Earth Engine” (GEE) como la versión mejorada de Google Earth. Esta plataforma simboliza una nueva era de herramientas en la nube, que brinda un amplio catálogo de imágenes satelitales y posibilita análisis globales eficaces usando varios conjuntos de datos geofísicos, climáticos, demográficos, etc (Maldonado, 2024).

En la actualidad, Google Earth Engine otorga servicios gratuitos destinados a investigaciones, sin fines de lucro, obviando el aspecto comercial. La plataforma dispone de un entorno web integrado, llamado Editor de Código de Earth Engine, creado para simplificar el uso de la interfaz de programación de aplicaciones, aplicaciones externas o bibliotecas de cliente (Sudmanns et al., 2020). Las peticiones se envían a los servidores mediante la API, lo que permite a los usuarios ejecutar scripts en el Editor de Código (Maldonado, 2024).

2.2.9. Modelo Hidrológico

Un modelo hidrológico es el proceso utilizado para la representación y comprensión de la vida real de fenómeno precipitación – escorrentía en una cuenca hidrográfica con el fin de obtener resultados y conocer su comportamiento fruto de la precipitación. Se utiliza información propia de la zona para generar un modelo (Jiménez, 2021).

La modelación hidrológica representa la cuenca como un sistema, estimando la escorrentía (hidrograma) en tres fases: precipitaciones y datos físicos (entradas), procesos intermedios y producción de caudal (salidas) (Jiménez, 2021).

2.2.10. Modelo Hidrológico mediante el software HEC-HMS

El Software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center –Hydrologic Modeling System) por sus siglas en inglés, fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos de Norteamérica con el fin de simular procesos de precipitación-escorrentía, según su tipología es un considerado un modelo de evento, lineal y semi distribuido, estas características son clasificaciones de los modelos matemáticos (Jiménez, 2021).

El modelo HEC-HMS ha sido desarrollado para ser empleado en una diversidad de contextos geográficos, siendo capaz de simular el flujo de agua en escalas diarias, mensuales y estacionales. Los elementos disponibles son subcuenca, alcance, unión, reservorio, desvío, fuentes y sumideros; la computación avanza de elementos aguas arriba a abajo; hay una clasificación de métodos para simular pérdidas de infiltración (Palacios et al., 2020). En el modelo HEC-HMS, el cálculo de la escorrentía superficial se aborda considerando una serie de interacciones complejas que incluyen el clima, la cobertura del dosel arbóreo, la escorrentía directa de la precipitación, el flujo base y el enrutamiento de los cauces, además de la evaporación y los procesos relacionados con la nieve. El "tiempo de concentración" y "coeficiente de almacenamiento" para definir la curva. Las opciones para el modelado del método de pérdida incluyen el número de curva SCS, La fase de descarga máxima en HEC-HMS puede ajustarse tanto por el módulo de transformación como por el módulo de enrutamiento de flujo (Palacios et al., 2020).

La finalidad de trabajar en un modelo hidrológico es poder cuantificar los caudales es una sección específica del río a través de un hidrograma tomando en cuenta los diferentes aspectos que pueden influir en la superficie (Jiménez, 2021).

El software HEC HMS se maneja mediante cuatro componentes básicos mediante los cuales se definen los datos de entrada y la estructura de la cuenca hidrográfica que se desea representar:

2.2.10.1. Datos de entrada

El software requiere información de entrada, los mismos que son obligatorios para cada uno de los componentes que el modelado requiere o necesita para poder realizar su ejecución; estos datos describen de una forma más clara las características de la cuenca hidrográfica en la que se va a trabajar (Jiménez, 2021).

2.2.10.2. Modelo de la cuenca

Representa las características físicas de la zona de estudio, el programador representa el modelo hidrográfico de la zona de estudio y lo relaciona con diferentes elementos hidrológicos tratando de simular condiciones reales; para los elementos hidrológicos se utiliza un modelo matemático con el fin de poder describir los procesos físicos que se realizan en la cuenca (Jiménez, 2021).

2.2.10.3. Modelo de precipitación

Componente que calcula la precipitación que pertenece a la zona de estudio, el software permite el manejo de información específica o de forma distribuida a través de la zona de estudio, manejo que resulta muy beneficioso ya que al ser un modelo semi distribuido permite el manejo de información independiente para zonas diferentes y no una sola información generalizada (Jiménez, 2021).

Para el funcionamiento del componente se requiere de un hietograma de diseño, calculado con los diferentes métodos existentes.

2.2.10.4. Módulo de control

Supervisor a cargo de monitorear los períodos de duración de las simulaciones; esta sección define la fecha de inicio, fecha de culminación y el intervalo de tiempo para el estudio en análisis (Jiménez, 2021).

2.2.11. Precipitación escorrentía

El método de precipitación-escorrentía se aplica en hidrología para modelar y estimar el volumen de agua que se convierte en escorrentía superficial después de la lluvia en una cuenca. Este método estudia la respuesta de la Cuenca Poncho con respecto a cómo la lluvia se convierte en escorrentía, infiltración o almacenamiento, teniendo en cuenta los suelos disponibles, la cobertura vegetal, la pendiente y el uso del suelo (Maldonado, 2024).

Así como en otros estudios, aquí hay un pronóstico muy común que se utiliza para la implementación del método de lluvia-desagüe y es el HEC-HMS. Al igual que todos los modelos, este modelo presenta una serie de parámetros de la cuenca como, por ejemplo, el número de curva (CN) del SCS que hace posible modelar el escurrimiento que se genera a partir de una lluvia determinada (Bosznay, 1989). Mientras se modela la hidrología, estimar la precipitación-escurrimiento es crucial ya que no solo proporciona el flujo máximo, sino que también ofrece los volúmenes de escurrimiento asociados con varios eventos de lluvia, y de esta manera es útil para evaluar la disponibilidad de agua y la gestión de recursos dentro de la cuenca estudiada (Maldonado, 2024).

Capítulo 3

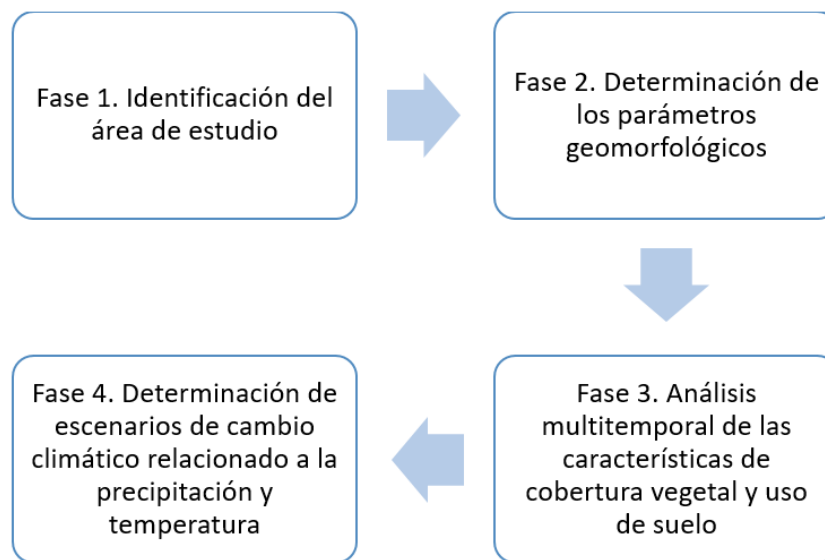
Diseño Metodológico

3.1. Tipo de Investigación

El método de investigación del presente trabajo es experimental y de diagnóstico, puesto que la información es levantada directamente del lugar de estudio; además se requiere de la manipulación de diferentes métodos y variables para el análisis multitemporal de la cobertura vegetal y uso de suelo de la microcuenca y así poder observar qué factores fueron los que han cambiado con el tiempo, se realiza mediciones in situ y ex situ con el fin de obtener datos hidrológicos, para aplicar en el modelo matemático. En el marco de este estudio se utiliza el método inductivo, que implica la recolección y análisis de datos para generar nueva información.

3.2. Metodología de la investigación

Para el desarrollo de la investigación se consideró cinco fases metodológicas (ilustración 1), las cuales se describen a continuación:



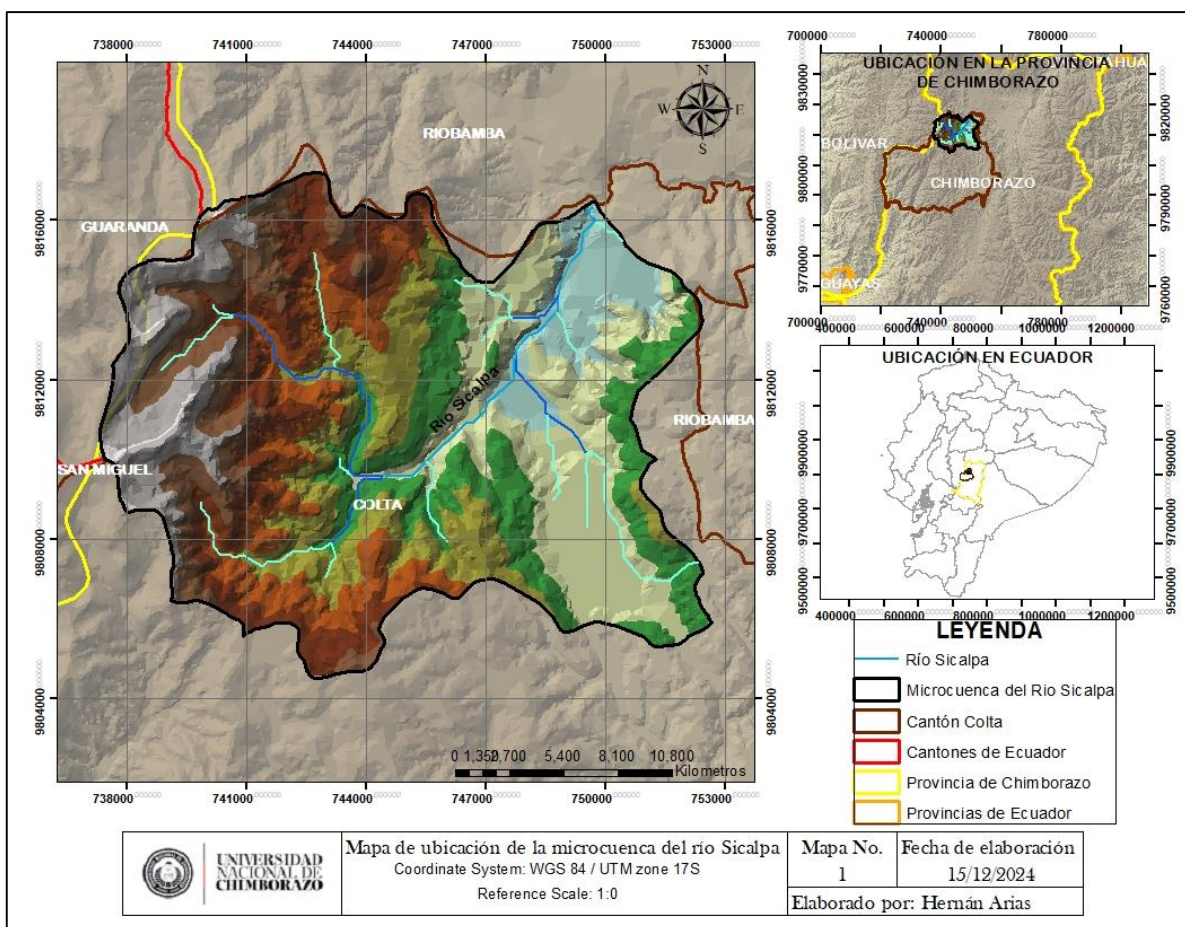
*Ilustración 1. Fase metodológica.
Elaborado por: Autor.*

3.2.1. Identificación del área de estudio

Durante esta etapa de la investigación, se llevará a cabo la determinación de la ubicación geográfica y la identificación de los sitios específicos para la recolección de datos importantes como el caudal y la batimetría.

3.2.2. Descripción del área de estudio y selección de puntos de muestreo

El estudio se llevó a cabo en la microcuenca del río Sicalpa, en el cantón Colta, provincia de Chimborazo (mapa temático 1). Su altitud varía de 3052 m.s.n.m a 4283 m.s.n.m, abarca 13 351 hectáreas y su curso principal mide 9.59 km (Tierra, 2013).



Mapa Temático 1. Ubicación geográfica de la microcuenca del río Sicalpa.
Elaborado por: Autor.

El río Sicalpa y sus afluentes forman parte de la subcuenca del río Chambo. El área específicamente fue a 10 km de la cabecera cantonal y abarca varias comunidades de la parroquia de Sicalpa, incluyendo Guacona San Isidro, Santa Rosa de Culluctus, Guacona

Santa Isabel, Guacona La Merced, Guacona San José, 15 de Agosto, San Jacinto de Culluctus y La Vaquería.

3.2.3. Determinación de parámetros geomorfológicos.

La geomorfología de la microcuenca fue analizada utilizando las ecuaciones numeradas del 1 al 7, que se detallan en la sección de fundamentación teórica del estudio.

3.2.4. Análisis multitemporal de la cobertura vegetal

Para determinar los cambios de las coberturas con el paso del tiempo, se aplicó la siguiente ecuación para conocer la tasa de deforestación actual (Salazar, 2015).

$$r = 1 - \left(1 - \frac{a_1 - a_2}{a_1}\right)^{\frac{1}{t}} \quad (12)$$

Dónde: r: Tasa de deforestación, a_1 : Área de bosque anterior (km^2), a_2 : Área de bosque actual (km^2), t: Cantidad de años transcurridos.

3.2.5. Procesamiento de datos en Google Earth Engine.

En esta fase del proyecto, se obtuvieron datos geoespaciales fundamentales, como imágenes satelitales y bases de datos creadas específicamente para esto.

Con respecto a la colección de Radiancia ASTER L1T del año 2000, así como la colección Harmonized Sentinel-2 MSI MultiSpectral Instrument Level-2A del 2010 y 2020, se eligieron por su posterior corrección atmosférica y resolución (Maldonado, 2024).

A partir del 2015, esta empresa empezó a operar una flota de microsátélites que hacen capturas de la Tierra a una resolución de dos metros, para el análisis se definieron bandas de predicción para el tipo de imagen satelital que se utilizó. (Maldonado, 2024).

3.2.5.1. Colección de ASTER L1T Radiance.

El ASTER o Radiómetro de Emisión y Reflexión Térmica Avanzado, es un sensor con características multispectrales inaugurado en diciembre de 1999 durante el lanzamiento del satélite Terra que pertenece a la NASA. ASTER adquiere datos en 14 bandas espectrales: desde la luz visible hasta el infrarrojo térmico.

Tabla 1. Catálogo de datos Earth Engine "ASTER L1T Radiance."

Nombre	Descripción	Mínimo	Máximo	Resolución	Longitud de onda
B01	VNIR_Banda1 (verde/Amarillo visible)	1	255	15 metros	0,520-0,600 μm
B02	VNIR_Banda 2 (rojo visible)	1	255	15 metros	0,630-0,690 μm
B3N	(Infrarrojo cercano, que apunta al nadir)	1	255	15 metros	0,780-0,860 μm
B04	SWIR_Band4 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	1,600-1,700 μm
B05	SWIR_Band5 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,145-2,185 μm
B06	SWIR_Band6 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,185-2,225 μm
B07	SWIR_Band7 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,235-2,285 μm
B08	SWIR_Band8 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,295-2,365 μm
B09	SWIR_Band9 (infrarrojos de onda corta)	1	255	30 metros	2,360-2,430 μm
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros	

Fuente: Earth Engine Data Catalog.

3.2.5.2. Colección de Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.

Por otro lado, la misión Sentinel-2 permite ajustar los datos de las últimas imágenes para comparar con las imágenes anteriores. Proporciona imágenes multiespectrales de alta resolución para el programa Copernicus, apoyando el monitoreo de vegetación, suelos, coberturas de agua, y zonas costeras e interiores navegables.

Tabla 2. Catálogo de datos de "H2 Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.

Nombre	Escala	Tamaño de Píxel	Longitud de onda	Descripción
B2	0,0001	10 metros	496,6nm (S2A) / 492,1nm (S2B)	Azul
B3	0,0001	10 metros	560nm (S2A) / 559nm (S2B)	Verde
B4	0,0001	10 metros	664,5nm (S2A) / 665nm (S2B)	Roja
B5	0,0001	20 metros	703,9nm (S2A) / 703,8nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B6	0,0001	20 metros	740,2nm (S2A) / 739,1nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B7	0,0001	20 metros	782,5nm (S2A) / 779,7nm (S2B)	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B8	0,0001	10 metros	835,1nm (S2A) / 833nm (S2B)	NIR
B11	0,0001	20 metros	1613,7nm (S2A) / 1610,4nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B12	0,0001	20 metros	2202,4nm (S2A) / 2185,7nm (S2B)	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
DEM	Modelo de elevación digital del terreno	0	6000	30 metros

Fuente: Earth Engine Data Catalog.

3.2.5.3. Clasificación de la cobertura

Los tipos de cobertura para detectar cambios se basaron en la cobertura del MAATE, publicada en 2022 (Maldonado, 2024).

Esta cobertura terrestre de Ecuador está disponible de forma gratuita y proporciona datos con una resolución de 1 metro, utilizando información de Sentinel-1 y Sentinel-2, e incluye once categorías de cobertura terrestre verificadas (Maldonado, 2024). En los sitios evaluados se identificó que las clases más representativas, con el uso de la colección del MAATE, fueron las expuestas en la Tabla 3.

Tabla 3. Clases seleccionadas de cobertura terrestre

Valor	Color	Descripción
10	#0a7607	Bosque
20	#edd700	Tierra agropecuaria
30	#da0000	Zona antrópica
40	#544141	Otras tierras
50	#e07b18	Páramo

Fuente: Ministerio de Ambiente, agua y transición ecológica.

3.2.6. Detección de cambios

3.2.6.1. Método de clasificación directa

El análisis implicó la fusión de imágenes de distintas fechas a través de Google Earth Engine, empleando una técnica de clasificación de variaciones que aprovecha las bandas multiespectrales aprovechables.

Para el análisis de cambios de cobertura entre las décadas, se utilizó una imagen satelital del año 2000 proveniente de la Colección ASTER L1T Radiance y otra del año 2020 de la Colección Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.

3.2.6.2. Random Forest

El método de Random Forest, o bosque aleatorio, integra múltiples clasificadores de árboles de decisión, cada uno desarrollado a partir de un vector aleatorio que se muestrea de manera independiente del conjunto de datos de entrada.

Clasificado como un clasificador de conjunto, el algoritmo Random Forest genera distintos árboles de decisión, pues estos son originarios de un subconjunto aleatorio de muestras y variables del conjunto de datos.

3.2.6.3. Árbol de decisión

Para construir un clasificador para los análisis de imágenes satelitales, se utilizó la biblioteca javascript “ee.Classifier”, que se especializa en árboles de decisión. Para el clasificador con un árbol de decisión, se usaron 50 divisiones, lo cual mejora la precisión del modelo al tener más granular los patrones que captura en los datos de entrenamiento (Maldonado, 2024).

3.2.7. Validación de la precisión de datos obtenidos

3.2.7.1. Evaluación de fiabilidad

Este estudio evaluó los usos del suelo en distintas fechas y calculó la variación en fiabilidad multiplicando las fiabilidades de ambas evaluaciones (Maldonado, 2024).

3.2.7.2. Índice Kappa

El coeficiente kappa se utilizó como medida de precisión en la clasificación de imágenes para la creación de mapas temáticos, debido a su eficacia en ajustar los resultados por coincidencias aleatorias y su aplicabilidad a diversas escalas de interpretación. Se aplicó una

notación similar a la de Cohen (1960), donde el coeficiente kappa (κ), se estima a partir de la ecuación 13:

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (13)$$

Para calcular el coeficiente kappa, se estima el nivel de concordancia aleatoria (Maldonado, 2024). En la matriz de confusión, la proporción de concordancia (P_o) se calcula usando la ecuación 14:

$$P_o = \frac{a + d}{n} \quad (14)$$

El kappa de Cohen se fundamenta en el análisis de los valores marginales de filas y columnas (Maldonado, 2024). Esto permite calcular la proporción de concordancia esperada por azar P_e en la ecuación 15:

$$P_e = \left(\left(\frac{a + c}{n} \right) \left(\frac{a + b}{n} \right) \right) + \left(\left(\frac{b + d}{n} \right) \left(\frac{c + d}{n} \right) \right) \quad (15)$$

Se calcula el coeficiente kappa condicional para medir la precisión por clase (Maldonado, 2024). Para la clase i , etiquetada como $+$ o $-$, puede estimarse usando la ecuación 16. :

$$K_i = \frac{nn_{ii} - n_i x n_i}{nn_i - n_i x n_i} \quad (16)$$

La varianza de kappa, puede expresarse en términos del error estándar, σ_k , que es la raíz cuadrada de la varianza (ecuación 19), en las que se aplican también las ecuaciones 17 y 18 con la Tabla 4 (Maldonado, 2024).

$$P_o = \sum_{i=1}^m P_{ii} \quad (17)$$

$$P_o = \sum_{i=1}^m P_i x P_{.i} \quad (18)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{(1 - P_e)\sqrt{n}} \sqrt{P_e + P_e^2 - \sum_{i=1}^m P_i x P_{.i} (P_i + P_{.i})} \quad (19)$$

3.2.7.3. Matriz de confusión

Se utiliza específicamente para evaluar la precisión de la clasificación. En todo momento, la selección de los casos para construir la matriz de confusión se realizó a través del muestreo aleatorio (Maldonado, 2024).

Tabla 4. Matriz de confusión para multiclases.

Clase	1	2	m	Σ
1	P_{11}	P_{12}	P_{1m}	P_1
2	P_{21}	P_{22}	P_{2m}	P_2
□				
	P_{m1}	P_{m2}	P_{mm}	P_m
Σ	P_1	P_2	P_m	1

Fuente: Cohen (1960).

El coeficiente puede ir de 0 a 1; cuanto más se acerque a 1, mayor será la concordancia entre los dos métodos. Este índice organiza en seis categorías (Tabla 5) y según esta clasificación se puede aceptar o rechazar la nueva evaluación (Maldonado, 2024).

Tabla 5. Valoración del índice Kappa.

Coefficiente Kappa	Fuerza de concordancia
0,00	Pobre
0,01-0,20	Leve
0,21-0,40	Aceptable
0,41-0,60	Moderada
0,61-0,80	Considerable
0,81-1,00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Kotch (1977).

3.2.8. Velocidad de cambios

3.2.8.1. Evaluación de la velocidad de cambios de uso de la tierra

Para evaluar la velocidad de degradación del uso del suelo, se aplicó la fórmula adaptada de FAO (1984) y Ortiz-Solorio et al. (1994) a través de las Ecuaciones 20 y 21; y parámetros para cada categoría presentados en la Tabla 6 (Maldonado, 2024).

$$ID = \frac{(\% \text{ de US del último año} - \% \text{ de US del año anterior})}{\% \text{ de US del último año}} * 100 \quad (20)$$

$$ID \text{ en } \% \text{ por año} = \frac{ID}{\text{Número de años del periodo evaluado}} \quad (21)$$

Dónde: ID: incremento de la degradación, US: uso de suelo

Tabla 6. Intervalos de clases para evaluar la velocidad de cambios de uso del suelo.

Intervalo	Clase
-----------	-------

< 0,01	Recuperación (R)
0,0	Nula (N)
0,0 – 2,49	Ligera (L)
2,5 – 4,99	Moderada (M)
5,0 – 7,49	Severa (S)
> 7,5	Muy Severa (MS)

Fuente: FAO (1984).

Las categorías de cambio en la cobertura del suelo se definieron de la siguiente manera: 1. Recuperación, con un aumento en la extensión del uso del suelo; 2. Nula, sin cambios en la superficie; 3. Ligero, con efectos perjudiciales menores; 4. Moderado, donde los cambios representan un daño notable; 5. Severo, con un impacto considerable en la reducción de la superficie; 6. Muy severo, en el cual el uso del suelo se vuelve impracticable o antieconómico.

3.2.9. Determinar la capacidad de campo (CN)

En esta etapa se determina el número de curva (CN), la capacidad de campo (S) y la relación lluvia-escorrentía (Larrea & Maldonado, 2022).

3.2.9.1. Cálculo y asignación de número de curva (CN)

Los valores de CN se calcularán usando el método NRCS, una técnica que permite conocer la infiltración según las características de escorrentía del terreno, considerando el grupo hidrológico del suelo (HGS), la humedad previa, el uso del suelo y el manejo de la cuenca (Larrea & Maldonado, 2022).

$$CN = \frac{25400}{254 + S} \quad (22)$$

Dónde: CN: Número de curva, S: Capacidad de campo.

3.2.9.2. Capacidad de campo o potencial máximo de retención (S)

Antes de realizar el cálculo del número de curva (CN), es preciso definir los valores de la capacidad de campo o potencial máximo de retención (S) del suelo. De esta manera, se vinculan el suelo y las condiciones de cobertura en las microcuencas mediante los valores de CN, aplicando la ecuación siguiente (Larrea & Maldonado, 2022):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (23)$$

Dónde: S: Capacidad de campo, CN: Número de curva.

3.2.9.3. Capacidad de campo de la microcuenca del río Sicalpa

Esta conserva alta relación con la cobertura vegetal, la taxonomía y la textura del suelo. Además, el porcentaje de porosidad y la tasa de infiltración del suelo varían considerablemente y se ven afectadas por la permeabilidad del subsuelo, clasificándose en cuatro HGS (A, B, C y D) según el porcentaje mínimo de infiltración, que se obtiene para el suelo desnudo tras la humidificación prolongada (Larrea & Maldonado, 2022).

Para asignar los grupos hidrológicos (tablas 7 y 8), se considera el uso y cobertura vegetal del área, estableciéndose un rango de 1 a 100, donde 100 representa clases como humedales, zonas urbanas, agua y nieve, por ser impermeables; además, en clases de cultivo, páramo, plantaciones forestales y vegetación arbustiva, su CN se determina según tipo de vegetación y condición hidrológica (Larrea & Maldonado, 2022).

Tabla 7. Asignación de HSG y CN para la microcuenca del río Sicalpa.

Clase	Textura	HSG	CN
Cultivo	Arcillo Limoso	B	71
Vegetación Arbustiva	Arcilloso Arenoso	B	66
Páramo	Arcillo Limoso	B	58
Plantaciones Forestales	Franco Arenoso	B	66
	Arcilloso		

Fuente: (Larrea & Maldonado, 2022)

Tabla 8. Asignación de HSG y CN para la microcuenca del río Sicalpa.

Clase	Textura	HSG	CN
Cultivo	Arenoso Franco	A	55
Páramo	Franco Arenoso	A	30
Pasto cultivado	Franco Arenoso	A	47
Plantaciones Forestales	Arenoso Franco	A	36
Cultivo	Franco Limoso	B	69
Vegetación Arbustiva	Franco Limoso	B	56
Cultivo	Franco Arcilloso	C	78
Páramo	Franco Arcilloso	C	71
Pasto cultivado	Franco Arcilloso	C	81
Fuente de Agua		D	99
Zona Urbana		D	92

Fuente: (Larrea & Maldonado, 2022)

3.2.10. Modelación para obtener la relación de precipitación - escorrentía

Posteriormente, se llevará a cabo el modelado hidrológico utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG) y el software HEC-HMS. Este proceso permitirá analizar y simular la conversión de la precipitación captada por las estaciones meteorológicas seleccionadas en la zona de estudio en escorrentía superficial.

$$P_{sb}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{em}(i,j)w(j)}{\sum_{j=1}^n w(j)} \quad (24)$$

Definiciones: $P_{sb}(i)$ representa la precipitación media uniforme de una subcuenca durante el intervalo i ; $P_{em}(i, j)$ es la precipitación registrada en el intervalo i en la estación j ; $w(j)$ indica el área de influencia de la estación j en la microcuenca; y n es el número de estaciones meteorológicas que influyen en la cuenca.

3.2.10.1. SCS Hidrograma Unitario

Este método se usa para convertir el escurrimiento en un hidrograma de caudal según varía el tiempo. Se presentan las fórmulas principales para crear el hidrograma unitario SCS (Maldonado, 2024).

3.2.10.2. Tiempo de pico T_p

El tiempo de pico se calcula con la fórmula (Maldonado, 2024):

$$T_p = 0,133 * T_c \quad (25)$$

Dónde: T_p : es el tiempo al pico del hidrograma unitario (horas), T_c : es el tiempo de concentración de la cuenca (horas).

3.2.10.3. Caudal pico Q_p

El caudal pico del hidrograma unitario es (Maldonado, 2024):

$$Q_p = \frac{484 * A}{T_p} \quad (26)$$

Dónde: Q_p : es el caudal máximo (m^3/s), A : es el área de la cuenca (km^2), T_p : es el tiempo al pico del hidrograma (horas).

3.2.10.4. Forma del hidrograma unitario

El hidrograma unitario SCS tiene una forma estándar con subida y bajada simétricas alrededor del tiempo pico T_p (Maldonado, 2024).

Capítulo 4

Resultados y Discusión

4.1. Geomorfología de la microcuenca del río Sicalpa.

El análisis geomorfológico de la microcuenca (Tabla 9), permite caracterizar la morfología, cobertura vegetal, la naturaleza y uso del suelo, pues las características físicas inciden directamente en su comportamiento hidrológico.

La microcuenca del río Sicalpa abarca 133.51 km², clasificándose como pequeña. Posee un río que fluye de sur a norte por 9.59 km antes de unirse al Chimborazo, formando el Chibunga. Tiene un índice de compacidad de 1.40, lo que indica una forma ovalada-alargada. Indica susceptibilidad moderada a la lluvia.

Tabla 9. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca del río Sicalpa.

PROPIEDADES DE LA CUENCA				
Nombre	Sigla	Unidad	Valores	
Área	A	Km ²	133,51	
Perímetro	P	Km	57,19	
Cota máxima	Hmax	Msnm	4360	
Cota mínima	Hmin	Msnm	3080	
Centroide x	Cx		744888	
Cnetroide y	Cy		9810931	
Centroide z	Cz		3739	
Índice de compacidad	Ic	Adimensional	1,40	
Ancho medio	B	Adimensional		
Longitud media	Lc	Km	14,19	
Factor de forma	Ff	Adimensional	0,66	
Relacion de elongacion	Re	Adimensional	0,92	
Relacion de circularidad	Rci	Adimensional	0,51	
Area sobre la curva	AS	Km ²	1967588,57	
Area bajo curva	Ab	Km ²	185911,43	
Altura media	Amed	Msnm	3739	
Altitud más frecuente	Amf	Msnm	3346,67	
Altitud de frecuencia media	Afm	Msnm	3684,67	
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	13,47	
PROPIEDADES DE LA RED HÍDRICA				
Nombre	Sigla	Unidad	Valores	
Longitud del cauce principal	Lc	M	9,59	
Orden de la red hídrica	Or	Adimensional	3	

Sumatoria de las longitudes de la red hídrica	Lt	Km	53,99
Densidad de drenaje	Dd	km-1	0,40
Número de canales	Nt	Adimensional	27
Densidad hidrográfica	Dh	km-1	0,20
Altura máxima rio	Hmax	Msnm	4360
Altura mínima del rio	Hmin	Msnm	3080
Pendiente media del cauce principal	Sm	Adimensional	133,47
Tiempo de concentración	Tc	H	0,12
Relación hipsométrica	Rh	%	10,58

Elaborado por: Autor

La curva hipsométrica (Figura 3) indica que la unidad hidrográfica está madura y equilibrada, con una curva tipo B, mostrando una erosión moderada.

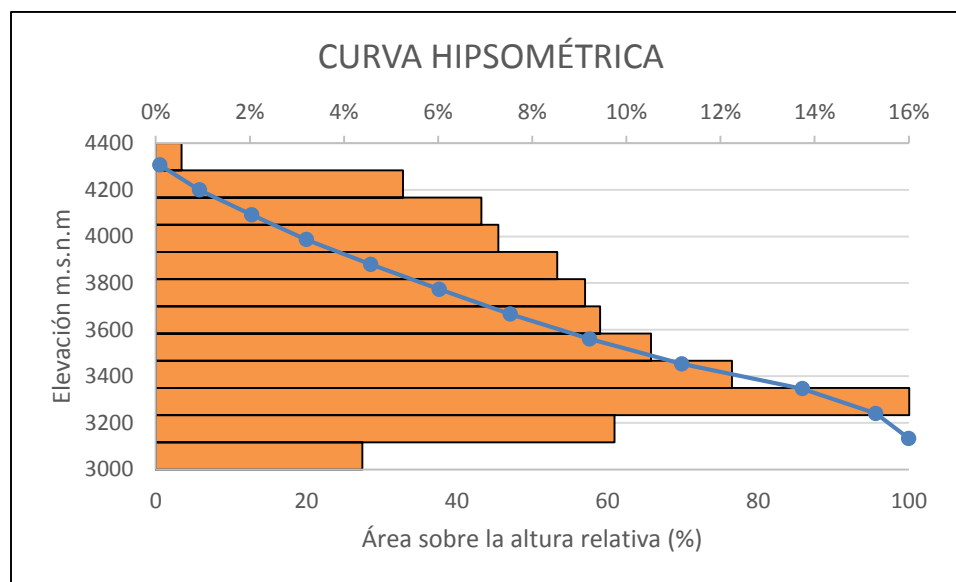


Ilustración 1. Curva Hipsométrica.

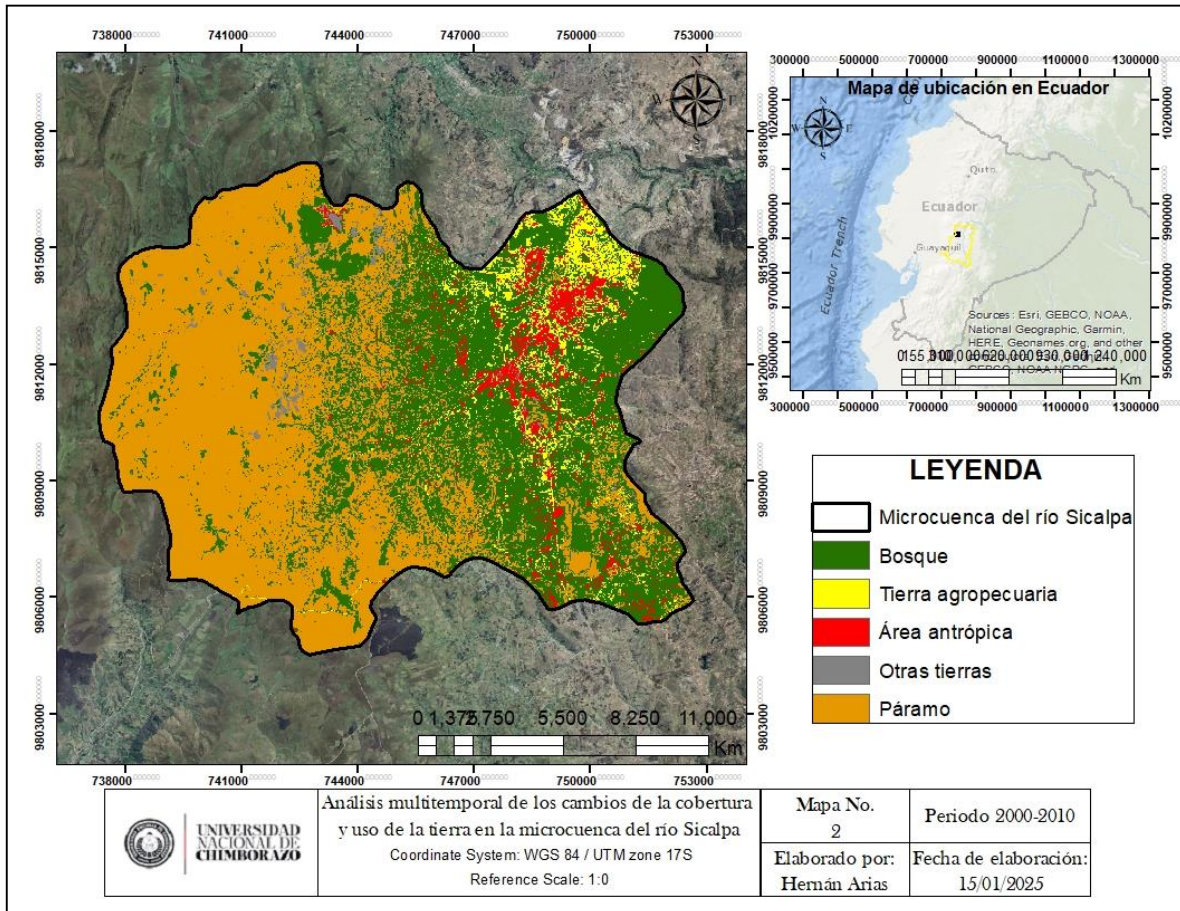
Elaborado por: Autor

4.2. Análisis multitemporal

En el área evaluada se asigna frecuencia (%) según sea la predominancia, de cada clase tomando en cuenta su área total, y la cantidad de puntos de validación.

4.2.1. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000 en la microcuenca del río Sicalpa

El mapa temático 2 presenta un panorama de la microcuenca del río Sicalpa en el año 2000, donde se evidencia que las clases que predominan son el páramo, que se concentra en las partes altas de la microcuenca; y el bosque en las partes medias y bajas de la microcuenca, seguido de las clases tierra agropecuaria y área antrópica en las partes medias y bajas de la microcuenca, y otras tierras una presencia mínima en la microcuenca.



Mapa Temático 2. Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000.
Elaborado por: Autor.

La tabla 10 muestra la distribución de los distintos ecosistemas de la microcuenca del río Sicalpa en el año 2000, predominando el páramo con un área de 6 767 ha que corresponde al 50,66%, el bosque con 5 125 ha correspondiente al 38,36%, seguido de la tierra agropecuaria con 678 ha equivalente al 5,08%, el área antrópica con 583 ha que corresponde al 4,36%, y la presencia mínima de otras tierras con 206 ha que equivale al 1,54%, con una precisión global del 95% y un índice Kappa del 93%, lo que describe una concordancia casi perfecta.

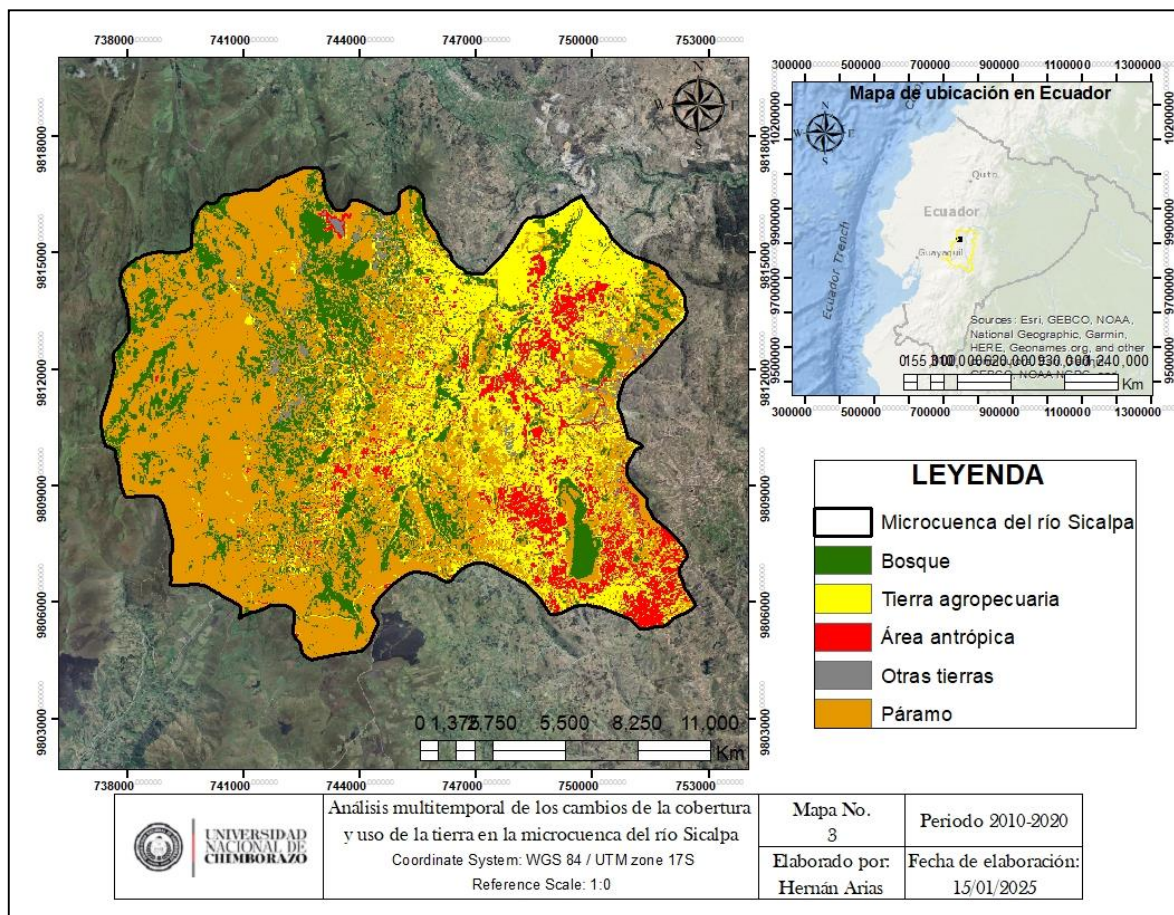
Tabla 10. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000.

CLASE	Conteo de Píxeles	Área (ha)	Porcentaje(%)
Bosque	56946	5125	38,36
Tierra agropecuaria	7534	678	5,08
Área antrópica	6477	583	4,36
Otras tierras	2287	206	1,54
Paramo	75192	6767	50,66
Total	148437	13359	100

Elaborado por: Autor

4.2.2. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2010 en la microcuenca del río Sicalpa

El mapa temático 3, el cual determina la realidad de la microcuenca del río Sicalpa para el año 2010, presenta una disminución de las clases páramo y bosque, se puede verificar un aumento notable en la tierra agropecuaria y área antrópica, así como también, la clase otras tierras con un mínimo aumento en la microcuenca; esta modificación de los ecosistemas en relación con el periodo 2000, se debe al crecimiento urbano y a la producción agrícola.



Mapa Temático 3. Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en el periodo 2010.

Elaborado por: Autor

La tabla 11 muestra la distribución de los distintos ecosistemas de la microcuenca del río Sicalpa en el año 2010, predominando el páramo con un área de 6 605 ha que corresponde al 49,44%, el bosque con 2 447 ha correspondiente al 18,31%, seguido de la tierra agropecuaria con 2 953 ha equivalente al 22,11%, el área antrópica con 1 080 ha que corresponde al 8,08%, y la presencia mínima de otras tierras con 274 ha que equivale al 2,05%, con una precisión global del 98% y un índice Kappa del 97%, reflejando una concordancia casi perfecta.

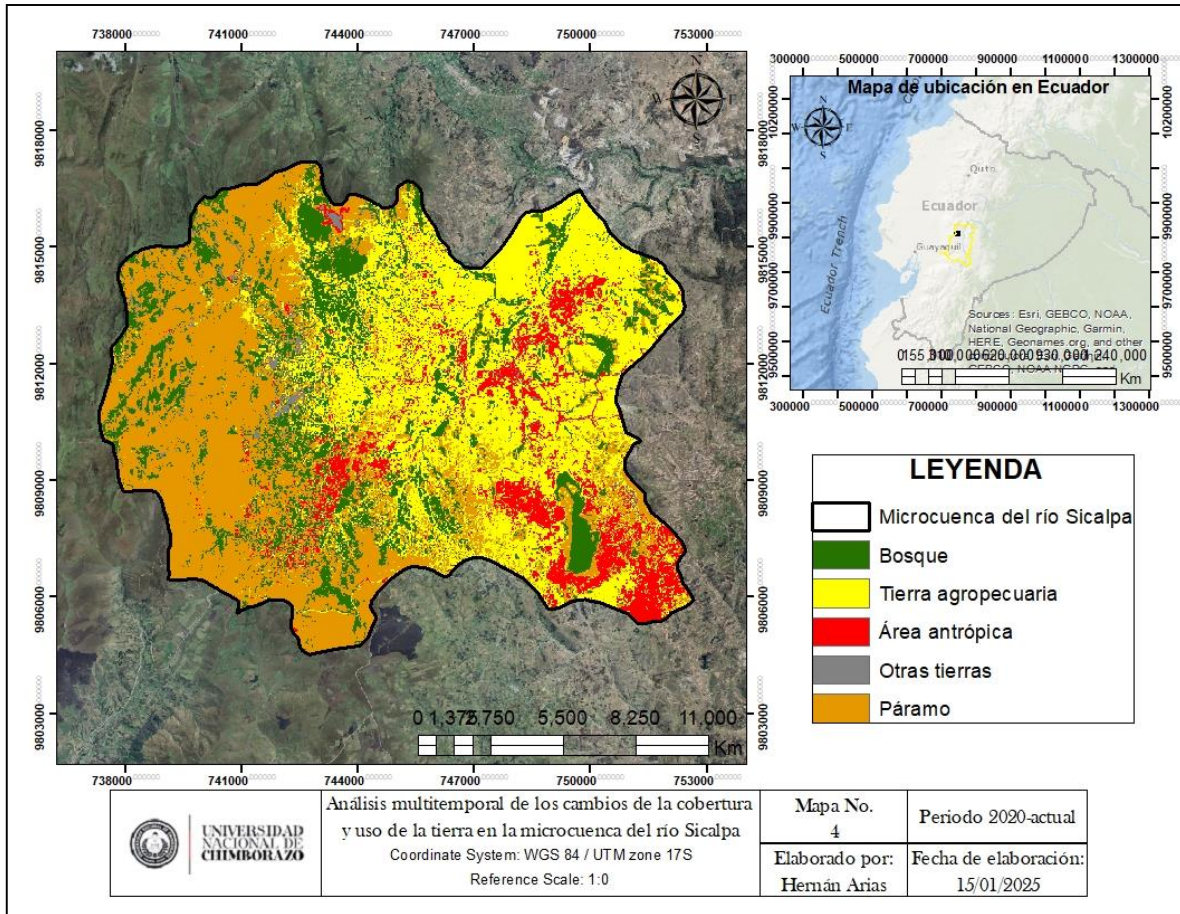
Tabla 11. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2010.

CLASE	Conteo de Píxeles	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque	27184	2447	18,31
Tierra agropecuaria	32815	2953	22,11
Área antrópica	11999	1080	8,08
Otras tierras	3047	274	2,05
Paramo	73392	6605	49,44
Total	148437	13359	100

Elaborado por: Autor

4.2.3. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2020 en la microcuenca del río Sicalpa

El mapa temático 4, el cual determina la realidad de la microcuenca del río Sicalpa para el año 2020, se observa que el páramo presenta una disminución considerable, la clase bosque también disminuye pero en menor proporción, se verifica un aumento notable en la tierra agropecuaria y área antrópica, así como también, la clase otras tierras con una mínima disminución en la microcuenca; esta modificación de los ecosistemas en relación con el periodo 2010, se debe al crecimiento urbano y a la producción agrícola.



Mapa Temático 4. Análisis multitemporal de los cambios de cobertura y uso de la tierra en el periodo 2020.
Elaborado por: Autor

La tabla 12 muestra la distribución de los distintos ecosistemas de la microcuenca del río Sicalpa en el año 2020, predominando el páramo con un área de 5 014 ha que corresponde al 37,53%, la tierra agropecuaria con 4 453 ha correspondiente al 33,34%, seguido del bosque con 2 369 ha equivalente al 17,73%, el área antrópica con 1 289 ha que corresponde al 9,65%, y la presencia mínima de otras tierras con 234 ha que equivale al 1,75%, con una precisión global del 87% y un índice Kappa del 82%, reflejando una concordancia casi perfecta.

Tabla 12. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2020.

CLASE	Conteo de Píxeles	Área (ha)	Porcentaje(%)
Bosque	26320	2369	17,73
Tierra agropecuaria	49483	4453	33,34
Área antrópica	14322	1289	9,65
Otras tierras	2600	234	1,75
Paramo	55712	5014	37,53
Total	148437	13359	100

Elaborado por: Autor

4.3. Detección de Cambios

Con la realización del análisis multitemporal en la microcuenca se evidencia un cambio en las coberturas entre el periodo de 2000 – 2020 (tabla 13), hay una reducción en las clases bosque y páramo con áreas de 2 759 ha que corresponde al 20,63% y 1 753 ha con un 13,12%, respectivamente; y un aumento en las clases tierra agropecuaria, área antrópica y otras áreas con áreas de 3 775 ha que corresponde al 28,26%, 706 ha con un 5,28% y 28 ha con un 0,21%, respectivamente. En la tabla 10 se muestra el cambio del área para cada una de las coberturas y tipo de suelo en los diferentes periodos.

Tabla 13. Cambios de la cobertura y uso de la tierra en el periodo 2000-2020.

CLASE	PERIODO				CAMBIOS			
	2000		2020		Pérdida		Aumento	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Bosque	5125	38,36	2369	17,73	2756	20,63		
Tierra agropecuaria	678	5,08	4453	33,34			3775	28,26
Área antrópica	583	4,36	1289	9,65			706	5,28
Otras tierras	206	1,54	234	1,75			28	0,21
Paramo	6767	50,66	5014	37,53	1753	13,12		
Total	13359	100	13359	100	4510	33,76	4510	33,76

Elaborado por: Autor

4.4. Velocidad de cambios

Una vez que se ha realizado la evaluación de la velocidad de degradación de los cambios de uso de la tierra (tabla 14), se determina que en el periodo analizado desde 2000 hasta 2020, existe una pérdida severa de bosque, es decir un impacto significativo en la disminución del ecosistema; una pérdida ligera de páramo, lo que significa un pequeño efecto perjudicial en el ecosistema, así como también, existe en aumento moderado de tierra agropecuaria y área antrópica, representando un efecto perjudicial notable por el cambio del uso de suelo; y otras tierras con un aumento ligero, qué indica un pequeño efecto perjudicial por el cambio del uso de suelo.

Tabla 14. Evaluación de la velocidad de degradación de los cambios de uso de la tierra.

CLASE	PERIODO		ID	ID/AÑO	CAMBIOS	EVALUACIÓN
	2000	2020				
	Porcentaje(%)	Porcentaje(%)		Porcentaje(%)		
Bosque	38,36	17,73	116,36	5,82	Pérdida	Severa (S)
Tierra agropecuaria	5,08	33,34	84,77	4,24	Aumento	Moderada (M)

Área antrópica	4,36	9,65	54,77	2,74	Aumento	Moderada (M)
Otras tierras	1,54	1,75	12,04	0,60	Aumento	Ligera (L)
Paramo	50,66	37,53	34,97	1,75	Pérdida	Ligera (L)
Total	100	100				

Elaborado por: Autor

4.5. Capacidad de campo

La capacidad de campo del suelo, que es crucial para la retención de agua, depende significativamente de la cobertura vegetal y el tipo de suelo presente. En la integración de grupos hidrológicos, se considera el uso y la cobertura vegetal de la microcuenca, estableciendo un rango numérico del 1 al 99, tomando en cuenta su procedencia impermeable, se asignan valores en un rango del 92 al 99, a las clases como agua, nieve, áreas urbanas y humedales, y a su vez, relacionando el tipo de vegetación y la condición hidrológica, se establecen valores en un rango del 1 al 81, a las clases como cultivo, paramo, plantaciones forestales y vegetación arbustiva.

En el área de estudio se establece la variación de los parámetros hidráulicos de la microcuenca en los 3 periodos 2000, 2010 y 2020, que corresponde a periodo definido para el estudio multitemporal, se puede observar la variación de los parámetros teniendo los siguientes valores para los años 2000, 2010, 2020; CN de 64,84 con un tiempo de retardo de 22,38 min, CN de 65,32 con un tiempo de retardo de 22,22 min, CN de 62,19 con un tiempo de retardo de 23,29 min, respectivamente; por esta razón, en la tabla 15 se verifica la variación de los parámetros en el periodo analizado.

Tabla 15. Parámetros hidráulicos en la microcuenca del río Sicalpa.

Periodo decenal	Área (km²)	Lc (km)	Cota mayor (msnm)	Cota menor (msnm)	Capacidad de Campo (S)	Tiempo de Retardo (min)	CN	Inicial abstracción
2020					154,41	23,29	62,19	45,73
2010	133.15	14.19	4360	3080	134,83	22,22	65,32	42,18
2000					137,72	22,38	64,84	42,72

Elaborado por: Autor

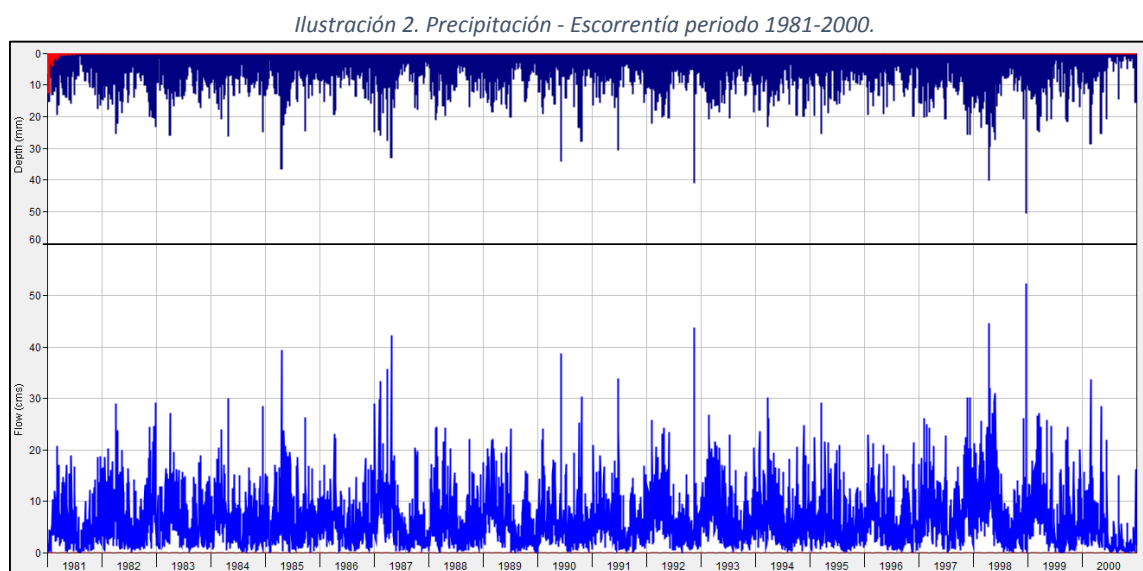
4.6. Modelación para obtener la relación de precipitación – escorrentía

4.6.1. Relación precipitación-escorrentía de la microcuenca del río Sicalpa

La relación entre la precipitación y la escorrentía en la microcuenca del río Sicalpa se analiza utilizando el método del Soil Conservation Service (SCS). Este enfoque considera los datos diarios de precipitación y temperatura desde 1981 hasta 2023, recopilados por satélites de la NASA.

4.6.1.1. Relación precipitación – escorrentía periodo 1981 al 2000

A través de la modelación con el programa HEC-HMS, se ha determinado la dinámica de precipitación-escorrentía en la microcuenca. Los resultados muestran que el caudal máximo simulado en la salida de la microcuenca alcanza los 52,3 m³/s



4.6.1.1.1. Oferta hídrica periodo 1981 al 2000

La microcuenca del río Sicalpa para el periodo 1981 – 2000, cuenta con un caudal ofertado promedio de 2,65 m³/s, este valor corresponde al caudal ofertado de la microcuenca, los valores de caudal modelado, caudal ecológico, demanda actual y oferta hídrica, se calculan mediante la relación precipitación – escorrentía (tabla 16).

Tabla 16. Caudal ofertado periodo 1981-2000.

Años	Caudal Modelado	Caudal Ecológico	Demanda Actual	Oferta Hídrica
1981	3,7012	0,3701	1,3409	1,9902
1982	4,9938	0,4994	1,3409	3,1535

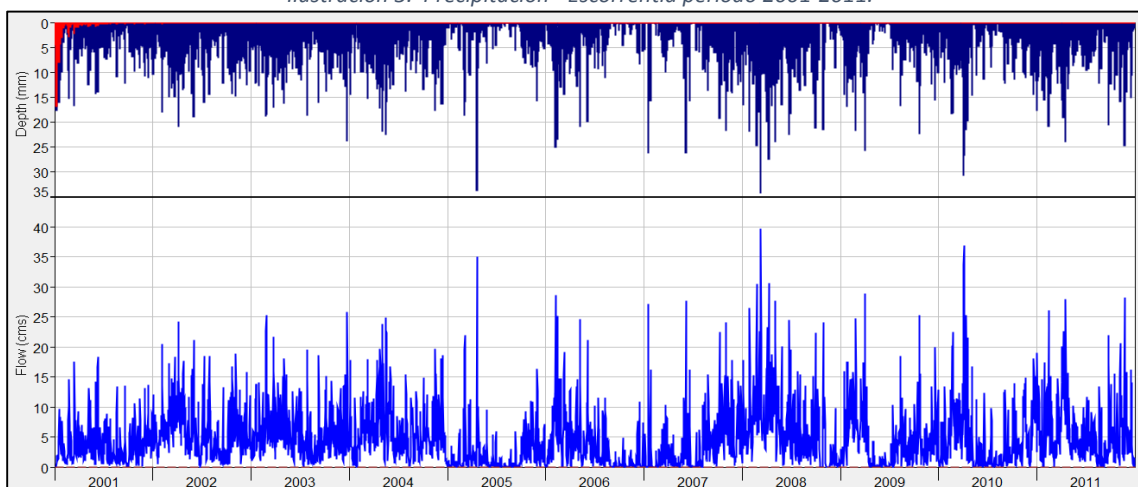
1983	4,7114	0,4711	1,3409	2,8994
1984	4,2687	0,4269	1,3409	2,5010
1985	4,3936	0,4394	1,3409	2,6134
1986	3,9004	0,3900	1,3409	2,1694
1987	4,8432	0,4843	1,3409	3,0180
1988	4,4329	0,4433	1,3409	2,6487
1989	4,4193	0,4419	1,3409	2,6365
1990	4,1443	0,4144	1,3409	2,3890
1991	4,0431	0,4043	1,3409	2,2979
1992	4,5291	0,4529	1,3409	2,7353
1993	5,0580	0,5058	1,3409	3,2113
1994	4,7229	0,4723	1,3409	2,9097
1995	3,7858	0,3786	1,3409	2,0663
1996	4,1009	0,4101	1,3409	2,3499
1997	5,3444	0,5344	1,3409	3,4690
1998	5,8244	0,5824	1,3409	3,9011
1999	4,9500	0,4950	1,3409	3,1141
2000	2,6456	0,2646	1,3409	1,0401
Promedio	4,4407	0,4441	1,3409	2,6557

Elaborado por: Autor

4.6.1.2. Relación precipitación – escorrentía periodo 2001 al 2011

La relación precipitación - escorrentía determinada mediante la modelación de HEC-HMS indica que la microcuenca del río Sicalpa, presenta los siguientes valores: el valor máximo de caudal simulado en el punto de salida de la microcuenca es igual a 39,7 m³/s, la cantidad de agua que ha caído en forma de lluvia es igual a 13 779,42 mm, la precipitación que se mitiga antes de generarse el escurrimiento fue de 163,91 mm, la precipitación que aporta específicamente al escurrimiento fue de 13 615,51 mm, estos valores fueron determinados desde el año 2001 al 2011, un periodo de 10 años.

Ilustración 3. Precipitación - Escorrentía periodo 2001-2011.



Elaborado por: Autor

4.6.1.2.1. Oferta hídrica periodo 2001 al 2011

La microcuenca del río Sicalpa para el periodo 1981 – 2000, cuenta con un caudal ofertado promedio de 1,75 m³/s, este valor corresponde a la oferta hídrica de la microcuenca, los valores de caudal modelado, caudal ecológico, demanda actual y oferta hídrica, se calculan la relación precipitación – escorrentía (tabla 17).

Tabla 17. Caudal ofertado periodo 2001-2011.

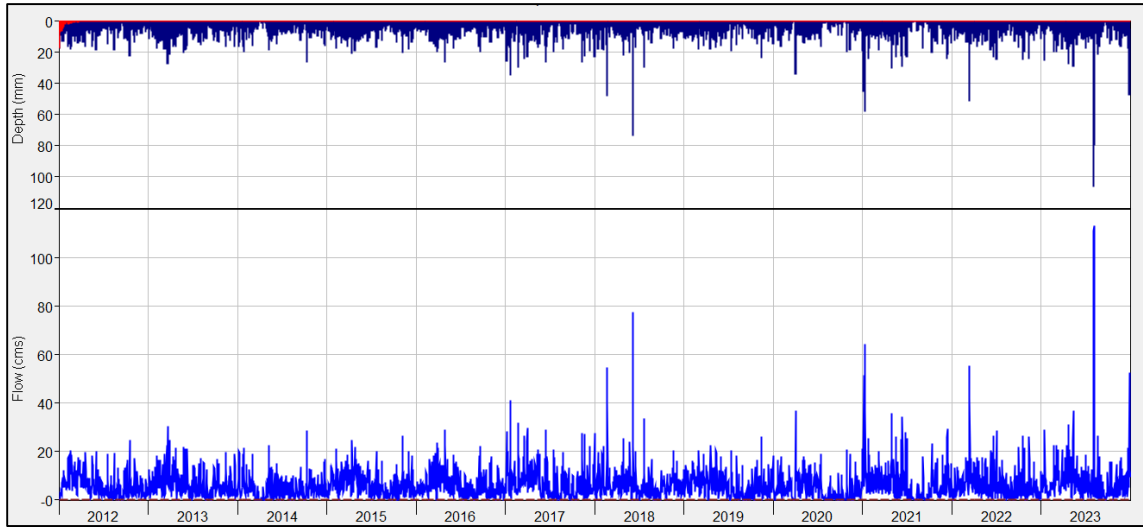
Años	Caudal Modelado	Caudal Ecológico	Demanda Actual	Oferta Hídrica
2001	3,0766	0,3077	1,3409	1,4280
2002	4,3699	0,4370	1,3409	2,5920
2003	4,2575	0,4258	1,3409	2,4909
2004	4,3558	0,4356	1,3409	2,5793
2005	1,4956	0,1496	1,3409	0,0051
2006	2,4828	0,2483	1,3409	0,8936
2007	2,5509	0,2551	1,3409	0,9549
2008	4,6743	0,4674	1,3409	2,8660
2009	3,1517	0,3152	1,3409	1,4956
2010	3,2601	0,3260	1,3409	1,5932
2011	4,1505	0,4151	1,3409	2,3946
Promedio	3,4387	0,3439	1,3409	1,7539

Elaborado por: Autor

4.6.1.3. Relación precipitación – escorrentía periodo 2012 al 2023

La relación precipitación - escorrentía determinada mediante la modelación de HEC-HMS indica que la microcuenca del río Sicalpa, presenta los siguientes valores: el valor máximo de caudal simulado en el punto de salida de la microcuenca fue de 113 m³/s, el volumen de agua que cayó como lluvia fue de 19 602,78 mm, la precipitación perdida antes del escurrimiento fue de 164,32 mm, la precipitación aporta directamente al escurrimiento fue de 19 438,46 mm, estos valores fueron determinados desde el año 2012 al 2023, un periodo de 11 años.

Ilustración 4. Precipitación - Escorrentía periodo 2012-2023.



Elaborado por: Autor

4.6.1.3.1. Oferta hídrica periodo 2012 al 2023

La microcuenca del río Sicalpa para el periodo 1981 – 2000, cuenta con un caudal ofertado promedio de 2,68 m³/s, este valor corresponde a la oferta hídrica de la microcuenca, los valores de caudal modelado, caudal ecológico, demanda actual y oferta hídrica, se calculan mediante la relación precipitación – escorrentía (tabla 18).

Tabla 18. Caudal ofertado periodo 2012-2023.

Años	Caudal Modelado	Caudal Ecológico	Demanda Actual	Oferta Hídrica
2012	4,7426	0,4743	1,3409	2,9274
2013	4,5978	0,4598	1,3409	2,7971
2014	3,3064	0,3306	1,3409	1,6349
2015	4,4889	0,4489	1,3409	2,6992
2016	4,2766	0,4277	1,3409	2,5080
2017	5,1309	0,5131	1,3409	3,2769
2018	4,7494	0,4749	1,3409	2,9336
2019	4,3030	0,4303	1,3409	2,5318
2020	3,3155	0,3316	1,3409	1,6431
2021	4,8875	0,4887	1,3409	3,0578
2022	4,4187	0,4419	1,3409	2,6359
2023	5,5096	0,5510	1,3409	3,6177
Promedio	4,4772	0,4477	1,3409	2,6886

Elaborado por: Autor

4.6.1.4. Variación de la oferta hídrica en la microcuenca del río Sicalpa

La microcuenca del río Sicalpa presenta caudales ofertados promedio para los años 2000, 2010, 2020 de 2,65 m³/s, 1,75 m³/s y 2,68 m³/s, respectivamente; para el análisis de la

variación de la oferta hídrica se han establecido dos periodos, el primero considerado de 2000 al 2010 y el segundo de 2010 al 2020, teniendo los siguientes resultados, en el primero y segundo se observa una variabilidad moderada entre las ofertas hídricas (tabla 19).

Tabla 19. Variación de la oferta hídrica.

Años	Oferta Hídrica	Periodo	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Variabilidad
2000	2,6557	2000 - 2010	0,4066	0,6377	0,2892	Moderada
2010	1,7539	2010 - 2020	0,4368	0,6609	0,2975	Moderada
2020	2,6886					

Elaborado por: Autor

Conclusiones

La geomorfología de la microcuenca del río Sicalpa ofrece un entendimiento crucial sobre cómo su forma, topografía y red de drenaje interactúan con los cambios climáticos, así como con la flora y fauna locales.

Las transformaciones y análisis multitemporales muestran cambios importantes en la subcuenca del río Sicalpa. Estas implican disminución de zonas forestales y montañosas, mientras aumentan labores agrícolas, humanas y otras actividades imprecisas. Estos hallazgos, junto a otros, indican que los cambios en la cobertura vegetal y el uso del suelo son muy evidentes en la mayoría de los componentes de los ecosistemas, el ciclo del agua y el suelo.

La modelación de la relación precipitación – escorrentía, permite el cálculo de los valores de caudal modelado, caudal ecológico, demanda actual y oferta hídrica, teniendo un caudal ofertado promedio de $2,42 \text{ m}^3/\text{s}$, como resultado del periodo evaluado desde 1981 hasta 2023, en la microcuenca del río Sicalpa. Luego del análisis de caudales ofertados promedio, se obtiene un valor de coeficiente de relación de 0,33, es decir existe una variabilidad moderada entre las ofertas hídricas de la microcuenca en el periodo estudiado.

La oferta hídrica en la microcuenca se utiliza para satisfacer la demanda de agua para actividades sociales y económicas, y como tal, es un punto de partida para tomar decisiones respecto al uso del agua, la planificación del riego y la mitigación de la sequía.

El análisis de los resultados sugiere la adopción de estrategias protectoras, de conservación y/o compensatorias destinadas a fomentar una conciencia ambiental dentro del área de impacto directo e indirecto de la cuenca del río Sicalpa. Estas medidas son necesarias para asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos y la conservación de la biodiversidad dentro de la microcuenca.

Recomendaciones

Es vital revisar periódicamente la información relacionada con la calidad y cantidad del agua utilizando redes de monitoreo en los lugares predefinidos del estudio.

Además, se recomienda crear zonas de amortiguamiento dentro de las áreas altamente cultivadas junto a cuerpos de agua superficial para reducir los impactos negativos en la calidad del agua.

Además, también se recomienda el establecimiento de una estación de monitoreo hidrológico permanente en la microcuenca del río Sicalpa.

Referencias Bibliográficas

- Abdelkebir, B., Mokhtari, E., & Engel, B. (2024). Assessment of land use and land cover changes on hydrological responses in the Wadi Soummam watershed, Algeria using the HEC–HMS model. *Water Practice & Technology*, 19(9), 3555–3577. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.224>
- Arias, H., & Pérez, M. (2018). *Estudio hidráulico del río Chambo para la determinación de la conductancia entre río - acuífero y zonas de inundación*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Asprilla, G. (2019). *Análisis multitemporal de las características geomorfológicas de la cuenca Río Quito, presionada por actividad minera*.
- Avilés, A. (2020). *Evaluación de la vulnerabilidad y riesgo climático de la generación de hidroenergía por los efectos de la variabilidad y cambio climático, así como la identificación de medidas de adaptación y generación de un mecanismo de seguimiento y monitoreo de la capacidad adaptativa. Caso de estudio en la subcuenca del río Machángara*. https://adaptacioncc.com/sites/default/files/2021-03/03%20INFORME_%20OBJETIVO%201.pdf
- Bastidas, E., & Naranjo, L. (2021). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su efecto en los caudales máximos para la cuenca del río Guaguí en el municipio de Barbacoas, Nariño* [Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/ec6d00db-b40a-436a-9658-e03fa0aa298c/content>

- Bustamante, D. P. (2017). Escenario de cambio climático a nivel de subcuencas hidrográficas para el año 2050 de la provincia de Chimborazo - Ecuador. *La Granja*, 26(2), 15.
<https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.02>
- Cabrera, J., Timbe, L., & Crespo, P. (2019). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo*.
<https://www.redalyc.org/journal/496/49662789043/html/>
- Campo Zambrano, F., Andrades Paixão, M., Gonzáles Ávila, I., & Kobiyama, M. (2020). *Modelación hidrológica lluvia–escorrentía usando el modelo HEC-HMS*.
<https://www.ufrgs.br/gpden>
- Chancusig, J. (2024). ABIOTIC FACTORS MULTI-TEMPORAL STUDY (SOIL AND WATER) IN THE CUTURIVI MOORLANDS AT THE 3400 AND 3800 MASL; 2017-2022. In *COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY*.
- Cruz, J., & Lancheros, C. (2024). Estudio hidrológico, para la evaluación cuantitativa del recurso hídrico del municipio de Chaparral Tolima, mediante herramientas informáticas HEC-HMS. In *Proyecto De Grado*.
- Dávila, F. (2024). *Modelo Hidrológico HEC-HMS para determinar el caudal máximo de la microcuenca del río Canibamba. Charat. Otuzco. La Libertad. 2022*. Biblioteca Digital – Dirección de Sistemas y Comunicaciones.
- Gómez, A. (2021). Propuesta metodológica para la estimación y análisis del impacto de escenarios de cambio climático en la calidad del agua de ríos tropicales de montaña. Caso de estudio: Río Bogotá – Colombia. In *FACULTAD DE INGENIERÍA*.
- Jaramillo, M. (2021). *MODELACIÓN DEL IMPACTO POR CAMBIO DE USO DEL SUELO SOBRE EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO QUINDÍO BAJO LOS ESCENARIOS 2000, 2020 y 2040*. Universidad Santo Tomás.

- Jiménez, S. (2021). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Santa Barbara considerando herramientas de Geo información*. Universidad Católica de Cuenca.
- Larrea, A., & Maldonado, C. (2022). Determinación de la oferta hídrica de la microcuenca Guamote y quebrada Compuene Gorge, en la provincia de Chimborazo. In *Trabajo De Titulación Para Optar Al Título De Ingeniero Ambiental*.
- León Olmedo, V. (2020). Modelo de gestión del recurso hídrico en la cuenca del Río Tarqui, analizando escenarios de cambio climático mediante la herramienta de simulación HYDRO-BID. In P. J. Duque Sarango (Ed.), *Trabajo De Titulación*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19553/1/UPS-CT008895.pdf>
- López, X., & Patiño, D. (2017). Aplicación de modelos hidrológicos de las microcuencas del área de bosque y vegetación protector Aguarongo con enfoque al cambio climático. In *UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA*.
- Maldonado, C. (2024). *Estudio hidrológico de cuencas pareadas mediante métodos de teledetección y modelación matemática*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Mendoza, B., Fiallos, M., Iturralde, S., Santillán, P., Guananga, N., Bejar, J., Lowy, D. A., Vágó, I., & Sándor, Z. (2021). Determination of field capacity in the Chibunga and Guano rivers micro-basins. *F1000Research*, 10, 172. <https://doi.org/10.12688/f1000research.28143.1>
- Orozco, I., Ramírez, A. I., & Francés, F. (2018a). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería Del Agua*, 22(3), 125. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8931>
- Orozco, I., Ramírez, A. I., & Francés, F. (2018b). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería Del Agua*, 22(3), 125. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8931>

- Palacios, T., Valdés, J., Jódar, A., & Alulema, R. (2020). Use of the HEC-HMS model for the evaluation of land use change and surface runoff. In *VII INTERNATIONAL CONGRESS*. <https://easychair.org/conferences/?conf=icats2020>
- Patiño, N. (2021). Caracterización hidrológica y análisis de escenarios de cambio climático de la unidad Cebadas ubicada en la cuenca del río Chambo, (Ecuador) con el programa HYDROBID. In *MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS*.
- Pérez-Campomanes, G., & Iannacone, J. (2020). Impacto del cambio climático en la disponibilidad de las aguas superficiales en Sudamérica. *Paideia*, *10*(1), 173–202. <https://doi.org/10.31381/paideia.v10i1.2981>
- Rentería, D. M., Ramos, M. a. C., & Rodríguez, A. M. S. (2020). *Modelación de los impactos de los escenarios de cambio climático en la cuenca del río Pamplonita en norte de Santander*. <https://www.redalyc.org/journal/1492/149263063015/html/>
- Reyes, R. (2024). Modelación mediante HEC-HMS del balance hídrico de la cuenca parte baja del río Jipijapa, de la provincia de Manabí. In *Facultad De Ciencias Técnicas, Carrera De Ingeniería Civil*.
- Romero-Cuéllar, J., Buitrago-Vargas, A., Quintero-Ruiz, 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>
- Salau, M., & Soliz, B. (2023). *Evaluación de la calidad de agua en la microcuenca del río Sicalpa Cantón Colta, mediante macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores*. Universidad Nacional de Chimborazo.

- Salazar, J. (2015). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la microcuenca del río Pisque y su incidencia en la producción de agua, en la provincia de Imbabura*. Universidad Técnica del Norte.
- Segarra, V. (2022). *Evaluación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático en la microcuenca del Río Colonso, Ecuador*.
- Tierra, E. (2013). *Determinación de la oferta hídrica del río Sicalpa, para la definición de políticas del uso óptimo del agua en el cantón Colta provincia de Chimborazo*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Torres Elizalde, J. C. (2019). Evaluación del ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen del cantón Loja. In DR. CHRISTIAN FERNANDO LEÓN CELI, M.Sc., Aurita Giovanna Gonzaga Figueroa, M.Sc., Oscar Lenin Juela Sivisaca, & M.Sc., Natalia Soledad Samaniego Rojas, *Tesis De Grado Previo a Obtener El Título De Ingeniería En Manejo Y Conservación Del Medio Ambiente*.
- Vaca, N. E. P., & Noboa, J. P. B. (2024). Modelación Hidrológica de la Microcuenca del Río Cebadas, Aplicando el Modelo Témez. *Reincisol*, 3(6), 610–633. [https://doi.org/10.59282/reincisol.v3\(6\)610-633](https://doi.org/10.59282/reincisol.v3(6)610-633)
- Volonté, A., Gil, V., & Campo, A. M. (2018). Estudio de la vegetación y sus efectos en la dinámica fluvial en Cuencas Serranas, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 59–59(2), 366–380. <https://www.redalyc.org/journal/3477/347760473009/html/>
- Yungan, J. (2024). *Estudio de los páramos de Ecuador: aplicación a una cuenca hidrográfica*.

Zhicay, J. (2020). Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, cantón Gualaceo. In *Trabajo De Titulación Previo a La Obtención Del Título De Ingeniero Ambiental*.

Anexos

Anexo 1. Inventario y concesiones de uso de agua del cantón Colta

Tabla 20. Concesiones de agua del cantón Colta según el tipo de uso y caudal utilizado.

Tipo de Uso/Concesión, porcentaje, caudal y porcentaje	Número de concesiones	Porcentaje de concesiones a nivel cantonal (%)	Caudal (l/s)	Porcentaje de caudal concesionado (%)
Abrevadero soberanía alimentaria	92	11,78	7,08	0,24
Consumo humano	319	40,85	287	9,80
Generación de Hidroelectricidad y Energía Hidrotérmica	1	0,13	100	3,41
Industrial	1	0,13	12	0,41
Otras actividades productivas	1	0,13	3,38	0,12
Riego	353	45,20	2 121,15	72,47
Riego soberanía alimentaria	13	1,67	393,99	13,46
Turístico	1	0,13	2,5	0,09
Total, general	781	100	2 927,091	100

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador, 2023).

Elaborado por: Equipo técnico PDOT, 2024.

Anexo 2. Tipo de concesiones en el cantón Colta

Tabla 21. Tipo de concesiones en el cantón Colta.

Uso/Fuente	Acequia	Otros	Pozo	Quebrada	Remanente	Río	Vertientes, manantial, acuífero	Total, General
Abrevadero soberanía alimentaria			7	6		12	67	92
Consumo humano			20	7		4	288	319
Generación de Hidroelectricidad y Energía Hidrotérmica						1		1
Industrial				1				1
Otras actividades productivas	1							1
Riego	4	1	27	113	4	48	156	353
Riego soberanía alimentaria				2		9	2	13

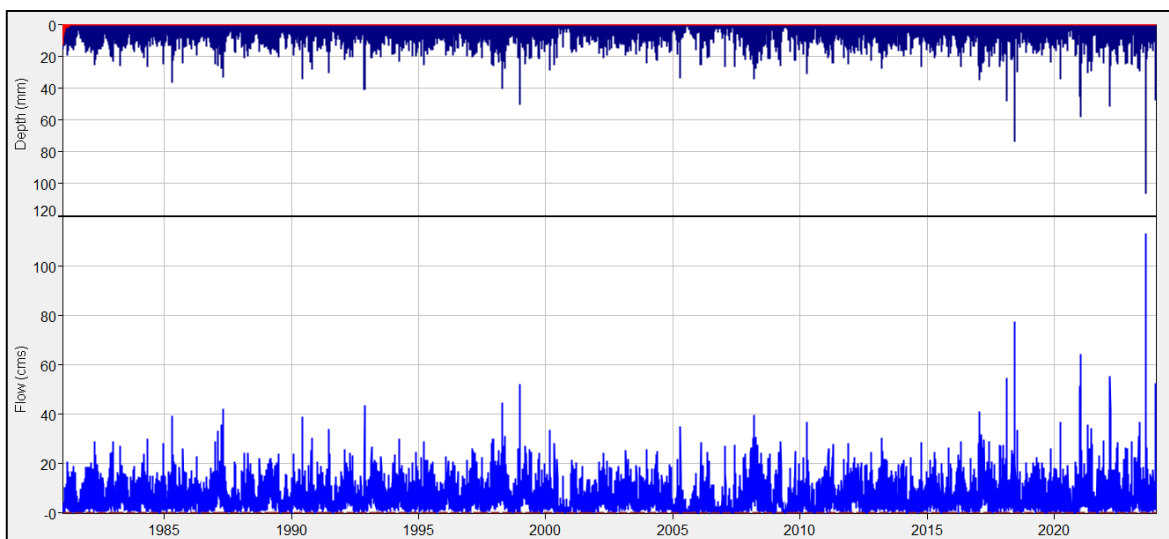
Turístico							1	1
Total, general	5	1	54	129	4	74	514	781

Fuente: (Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador, 2023).

Elaborado por: Equipo técnico PDOT, 2024.

Anexo 3. Relación precipitación – escorrentía periodo 1981-2023

Ilustración 5. Precipitación - Escorrentía periodo 1981-2023.



Elaborado por: Autor

Anexo 4. Oferta hídrica periodo 1981-2023.

Tabla 22. Oferta hídrica periodo 1981-2023.

Años	Caudal Modelado	Caudal Ecológico	Demanda Actual	Oferta Hídrica
1981	3,6879	0,3688	1,3409	1,9783
1982	4,9892	0,4989	1,3409	3,1495
1983	4,7134	0,4713	1,3409	2,9012
1984	4,2545	0,4255	1,3409	2,4882
1985	4,4030	0,4403	1,3409	2,6219
1986	3,8915	0,3892	1,3409	2,1615
1987	4,8015	0,4802	1,3409	2,9805
1988	4,4135	0,4413	1,3409	2,6313
1989	4,3981	0,4398	1,3409	2,6175
1990	4,1191	0,4119	1,3409	2,3664
1991	4,0142	0,4014	1,3409	2,2719
1992	4,5163	0,4516	1,3409	2,7238
1993	5,0412	0,5041	1,3409	3,1962
1994	4,7171	0,4717	1,3409	2,9046
1995	3,7849	0,3785	1,3409	2,0655
1996	4,0892	0,4089	1,3409	2,3394
1997	5,4986	0,5499	1,3409	3,6079
1998	5,8130	0,5813	1,3409	3,8908
1999	4,9371	0,4937	1,3409	3,1025
2000	2,6398	0,2640	1,3409	1,0349

2001	3,0830	0,3083	1,3409	1,4339
2002	4,3665	0,4367	1,3409	2,5890
2003	4,2494	0,4249	1,3409	2,4836
2004	4,3527	0,4353	1,3409	2,5766
2005	1,4978	0,1498	1,3409	0,0072
2006	2,4571	0,2457	1,3409	0,8705
2007	2,5641	0,2564	1,3409	0,9669
2008	4,6638	0,4664	1,3409	2,8566
2009	3,1327	0,3133	1,3409	1,4786
2010	3,2364	0,3236	1,3409	1,5719
2011	4,1230	0,4123	1,3409	2,3698
2012	4,7323	0,4732	1,3409	2,9182
2013	4,5893	0,4589	1,3409	2,7895
2014	3,3068	0,3307	1,3409	1,6353
2015	4,4836	0,4484	1,3409	2,6944
2016	4,2661	0,4266	1,3409	2,4987
2017	5,1262	0,5126	1,3409	3,2728
2018	4,7187	0,4719	1,3409	2,9060
2019	4,2884	0,4288	1,3409	2,5187
2020	3,3104	0,3310	1,3409	1,6385
2021	4,8823	0,4882	1,3409	3,0532
2022	4,4398	0,4440	1,3409	2,6549
2023	5,5281	0,5528	1,3409	3,6344
Promedio	4,1889	0,4188	1,3408	2,4291

Elaborado por: Autor

Anexo 5. Variación de la oferta hídrica periodo 1981-2023.

Tabla 23. Variación de la oferta hídrica en la microcuenca del río Sicalpa.

Años	Oferta Hídrica
1981	1,9783
1982	3,1495
1983	2,9012
1984	2,4882
1985	2,6219
1986	2,1615
1987	2,9805
1988	2,6313
1989	2,6175
1990	2,3664
1991	2,2719
1992	2,7238
1993	3,1962
1994	2,9046
1995	2,0655
1996	2,3394
1997	3,6079

1998	3,8908
1999	3,1025
2000	1,0349
2001	1,4339
2002	2,5890
2003	2,4836
2004	2,5766
2005	0,0072
2006	0,8705
2007	0,9669
2008	2,8566
2009	1,4786
2010	1,5719
2011	2,3698
2012	2,9182
2013	2,7895
2014	1,6353
2015	2,6944
2016	2,4987
2017	3,2728
2018	2,9060
2019	2,5187
2020	1,6385
2021	3,0532
2022	2,6549
2023	3,6344
Promedio	2,4291
Varianza	0,6255
Desviación estándar	0,7909
Coefficiente de variación	0,3256
Variabilidad	Moderada

Elaborado por: Autor