

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería para la Gestión de los
Recursos Hídricos**

**Diagnóstico de la Dinámica Hidrometeorológica por Medio del Balance
Hídrico en la Cuenca del Río Topo de la Provincia de Tungurahua-Ecuador**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Magíster en
Ciencias de la Ingeniería para la
Gestión de los Recursos Hídricos

Autor:

Erick Javier García Andrade

Director:

Diego Esteban Mora Serrano

ORCID:  0000-0002-1139-3204

Cuenca, Ecuador

2024-11-17

Resumen

El presente estudio analiza la dinámica hidrometeorológica de la cuenca del Río Topo, en Tungurahua, mediante el balance hídrico, una herramienta clave para comprender el ciclo hidrológico y el almacenamiento de agua. La cuenca, situada entre páramos y la Amazonía (1291–4809 msnm), presenta un paisaje montañoso con bosques húmedos y páramos de pendientes pronunciadas, caracterizado por un sistema de drenaje eficiente y altos niveles de escorrentía. Se realizó una caracterización hidrometeorológica utilizando datos de una estación en la zona baja, operada por ECUAGESA, entre enero de 2021 y agosto de 2022. Durante este periodo, se registraron precipitaciones anuales de 4658.63 mm, una temperatura media de 17.37 °C y un caudal promedio de 60.88 m³/s. Con la fórmula de Lvovitch (1959), el balance hídrico mostró un almacenamiento de 50.97 mm, un excedente de 288.28 mm y una escorrentía de 6981.93 mm (88.37 % de la precipitación), mientras que la evapotranspiración real fue de 867.95 mm (10.99 %). Además, se evaluaron datos morfométricos e hidrometeorológicos por subcuenca utilizando el modelo SWAT, con resultados de NSE=0.52, PBIAS=-29 y R²=0.68, indicando un desempeño moderado. Se concluye que los principales almacenamientos de agua están en las zonas altas, por lagos y acuíferos, aunque las zonas bajas, con vegetación densa, también contribuyen significativamente.

Palabras clave del autor: balance hídrico, evapotranspiración, FAO Penman Monteith, SWAT, morfometría



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This study analyzes the hydrometeorological dynamics of the Topo River basin in Tungurahua through the water balance, a key tool for understanding the hydrological cycle and water storage. The basin, located between páramo and Amazonian regions (1291–4809 masl), features a mountainous landscape with humid forests and steep páramo slopes, characterized by an efficient drainage system and high runoff levels. A hydrometeorological characterization was conducted using data from a station in the lower part of the basin, operated by ECUAGESA, covering the period from January 2021 to August 2022. During this time, annual precipitation reached 4658.63 mm, the average temperature was 17.37 °C, and the average flow rate was 60.88 m³/s. Using Lvovitch's formula (1959), the water balance revealed a water storage of 50.97 mm, a surplus of 288.28 mm, and a runoff of 6981.93 mm (88.37% of the total precipitation), while actual evapotranspiration accounted for 867.95 mm (10.99%). Additionally, morphometric and hydrometeorological data by sub-basin were evaluated using the SWAT model, yielding results of NSE=0.52, PBIAS=-29, and R²=0.68, indicating moderate performance. It is concluded that the main water storages are located in the upper regions of the basin, due to the presence of lakes and aquifers, although the lower areas, with dense vegetation, also contribute significantly.

Author Keywords: water balance, evapotranspiration, FAO Penman Monteith, SWAT, morphometry



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I	14
GENERALIDADES.....	14
Planteamiento del Problema.....	14
Objetivos.....	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos	14
Justificación	14
Estado del Arte	15
Alcance	18
CAPÍTULO II	19
MARCO TEÓRICO	19
Morfometría de la Cuenca.....	19
Parámetros de Forma.....	19
Perímetro (P).	19
Longitud Axial (L).....	19
Longitud del Río Principal (Cm).	19
Longitud Total de Drenaje (Ct).....	19
Coeficiente de Sinuosidad Total (S).....	19
Área (A).	19
Ancho Promedio (Ap).....	19
Factor de Forma (IF).....	19
Índice de Alargamiento (Ia).....	20
Índice Asimétrico (Ias).	20
Coeficiente de Compacidad de Gravelius (Kc).....	20
Coeficiente de Compactibilidad (C).....	21
Coeficiente de Elongación (E).....	21
Parámetros de Relieve	21
Curva Hipsométrica (CH).....	21
Pendiente Media de la Cuenca (PM).	22
Desnivel de la Cuenca (Hc).	23
Parámetros de Drenaje (Red de Drenaje).....	23
Relación de Bifurcación (Rb).	23
Densidad de Drenaje (Dd).	23

Frecuencia de Cauce de n Orden (Fn).....	24
Número de Curvatura (CN).....	24
Hidrometeorología a de la Cuenca.....	25
Intercepción.....	25
Radiación solar.....	25
Humedad relativa	26
Presión.....	26
Velocidad del Viento.....	26
Escorrentía.....	26
Escorrentía Superficial.....	26
Escorrentía Subsuperficial.....	26
Escorrentía Subterránea.....	26
Infiltración.....	27
Balance Hídrico	27
Modelo SWAT	28
SWAT.....	28
SWAT-CUP	28
SUFI-2.....	28
CAPÍTULO III.....	29
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	29
Reseña Geológica	33
Elaboración de Perfiles.....	34
Perfil Longitudinal.....	34
Perfil Transversal.....	35
Suelos y Usos del Suelo	37
CAPÍTULO IV	42
MATERIALES Y MÉTODOS	42
Caracterización Morfométrica de la Cuenca del Río Topo	42
Fuente de Datos para las Mediciones Morfométricas	42
Métodos para las Mediciones Morfométricas.....	42
Caracterización Hidrometeorológica de la Cuenca del Río Topo	43
Caracterización y Análisis de los Elementos del Ciclo Hidrológico.....	43
Evapotranspiración.....	45
Balance Hídrico	49
Modelo SWAT	50
Datos de Entrada para el Modelo SWAT	50

Calibración del Modelo SWAT	58
Ajuste de Parámetros de Calibración.....	58
CAPÍTULO V	60
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
Caracterización Morfométrica de la Cuenca del Río Topo	60
Caracterización Hidrometeorológica de la Cuenca del Río Topo	66
Precipitación	66
Intensidad.....	70
Temperatura.....	71
Evapotranspiración Real.....	74
Radiación solar	75
Humedad relativa	76
Presión	77
Velocidad del Viento	78
Escorrentía	79
Escorrentía Superficial.....	79
Infiltración	80
Evaluación de las Variables que Conforman la Ecuación del Balance Hídrico	81
Regímenes de Lluvia	81
Análisis del Esguerrimiento.....	82
Caracterización de la Evapotranspiración Real.....	84
Balance Hídrico de la Cuenca.....	85
Modelo SWAT	89
Calibración del Modelo SWAT	89
Resultados del Modelo SWAT	90
Características Generales de la Eficiencia Hídrica en la Cuenca	96
Potenciales Lugares en donde Puede Estar Almacenando el Agua en la Cuenca.....	96
Potencial Relación de la Dinámica Hídrica con la Morfometría, Cobertura Vegetal y Geología de la cuenca del Río Topo	98
Características Generales de la Dinámica Hídrica en la Cuenca del Río Topo en Base a los Resultados del Modelo SWAT	100
Curvas de Duración por Subcuencas	100
Caudales Picos y Caudales Medios por Subcuencas	101
Respuesta Hidrológica en base a la Evapotranspiración Real en Cada Subcuenca	102
Caudales Picos vs Pendientes Medias de Cada Subcuenca	104

Caudales Específico de Cada Subcuenca	105
Almacenamiento de Agua Media Diaria a Través de los Datos Generados por SWAT	107
Descripción General del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Topo en Función de las Características Morfométricas e Hidrometeorológicas	111
Dinámica de las Variables Climáticas del Ciclo Hidrológico en Relación al Almacenamiento de Agua en la Cuenca del Río Topo para un Año Hidrológico	114
CAPÍTULO VI	116
CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	116
Conclusiones.....	116
Limitaciones de Estudio	119
Recomendaciones.....	120
REFERENCIAS	121
ANEXOS.....	136

Índice de figuras

Figura 1. Curva hipsométrica de cuencas	22
Figura 2. Mapa de localización de la cuenca del río topo	30
Figura 3. Ubicación de la cuenca del río topo con el parque nacional Ilanganates	30
Figura 4. Ubicación de la cuenca del río topo en su sistema hidrográfico	31
Figura 5. Delimitación de las microcuencas pertenecientes a la cuenca del río topo	32
Figura 6. Representación del cauce principal y vertientes de la cuenca del río topo	33
Figura 7. Mapa geológico de la cuenca del río topo	34
Figura 8. Perfil longitudinal del río principal.....	35
Figura 9. Vista en planta de los perfiles transversales.....	36
Figura 10. Perfil transversal del río topo (aa').....	36
Figura 11. Perfil transversal del río topo (bb').....	37
Figura 12. Perfil transversal del río topo (cc')	37
Figura 13. Taxonomía de suelo, cuenca del río topo.....	38
Figura 14. Uso del suelo en la cuenca del río topo.....	40
Figura 15. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca ..	45
Figura 16. Modelo digital de elevación (dem) de la cuenca del río topo	51
Figura 17. Clasificación ndvi en la cuenca del río topo.....	52
Figura 18. Mapa del uso del suelo de la cuenca del río topo para el modelo swat	53
Figura 19. Mapa del tipo de suelo de la cuenca del río topo.....	55
Figura 20. Mapa de pendientes de la cuenca del río topo	56
Figura 21. Subcuencas pertenecientes a la cuenca del río topo	56
Figura 22. Coeficiente de cultivo (kc) para cada subcuenca.....	57
Figura 23. Particularidades de la forma en una cuenca.....	60
Figura 24. Red de drenaje de la cuenca del río topo	60
Figura 25. Curva hipsométrica de la cuenca del río topo.....	61
Figura 26. Pendientes de la cuenca del río topo	62
Figura 27. Plano altimétrico de la cuenca del río topo	63
Figura 28. Mapas de isoyetas mensuales en la cuenca del río topo [mm/mes]	68
Figura 29. Mapa isoyetas anuales de la cuenca del río topo [mm/año]	69
Figura 30. Pluviograma mensual de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022).....	70
Figura 31. Hietograma en periodos horarios de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022)	71
Figura 32. Mapas de isotermas mensuales de la cuenca del río topo [°c]	72
Figura 33. Mapa isotermas mínimos anuales de la cuenca del río topo [°c]	73
Figura 34. Mapa isotermas máximos anuales de la cuenca del río topo [°c]	73

Figura 35. Estacionalidad con temperaturas medias mensuales de la estación m01	74
Figura 36. Evapotranspiración real mensual de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022)	75
Figura 37. Radiación solar mensual de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022).....	76
Figura 38. Humedad relativa mensual de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022).....	77
Figura 39. Presión atmosférica mensual de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022) ..	78
Figura 40. Dinámica de la velocidad del viento mensual de la estación m01 (altura 10 m) .	79
Figura 41. Hidrograma de caudales mensuales de la cuenca del río topo cota 1520 msnm	80
Figura 42. Días de no lluvia y lluvia que se genera en la cuenca del río topo.....	81
Figura 43. Precipitación total y por épocas de la de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022)	82
Figura 44. Representación precipitaciones vs caudal mensual	83
Figura 45. Escurrimiento total y por épocas de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022)	84
Figura 46. Evapotranspiración real total y por épocas de la estación m01 (enero 2021 – agosto 2022)	85
Figura 47. Balance hídrico en la cuenca del río topo.....	87
Figura 48. Caudal medido y simulado con swat-cup periodo de un año (año 2021).....	91
Figura 49. Caudal observado vs simulado con swat para el periodo de estudio.....	91
Figura 50. Dispersión de los caudales (simulados vs observados).....	91
Figura 51. Dispersión de la evapotranspiración real (observados vs simulados).....	92
Figura 52. Representación del ciclo hidrológico en la cuenca por medio del swat.....	94
Figura 53. Curva de duración de los caudales observados vs simulados.....	95
Figura 54. Curva másica de los caudales observados vs simulados	95
Figura 55. Potenciales lugares de almacenamiento de agua en la cuenca del río topo.....	97
Figura 56. Caudales de la curva de duración de cada subcuenca	101
Figura 57. Caudales pico y caudales medios para cada subcuenca	102
Figura 58. Caudales pico y caudal medio diario para cada subcuenca	102
Figura 59. Evapotranspiración real máxima, media y mínima en cada subcuenca.....	104
Figura 60. Representación de la pendiente media de cada subcuenca.....	105
Figura 61. Caudales picos vs pendientes medias de cada subcuenca.....	105
Figura 62. Producción de agua media diaria al finalizar el periodo de estudio por subcuenca	108
Figura 63. Evapotranspiración real por tipo de uso de suelo por medio del swat	113
Figura 64. Resumen de la dinámica hidrometeorológica de manera mensual de la cuenca del topo	115

Índice de tablas

Tabla 1. Áreas totales de las microcuencas que conforman la cuenca del río topo.....	32
Tabla 2. Taxonomía del suelo en la cuenca del río topo	38
Tabla 3. Características morfométricas y uso del suelo de las microcuencas definidas	39
Tabla 4. Variables biofísicas en la cuenca del río topo.....	40
Tabla 5. Uso potencial del suelo de la cuenca del río topo.....	41
Tabla 6. Pendientes medias de una cuenca.....	43
Tabla 7. Estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca del río topo	44
Tabla 8. Estaciones con registros de temperatura cercanas a la cuenca del río topo	45
Tabla 9. Clasificación ndvi	51
Tabla 10. Clasificación del uso del suelo para el modelo swat	52
Tabla 11. Clasificación del tipo del suelo para el modelo swat	54
Tabla 12. Coeficiente de cultivo (kc) representativo de la cuenca del río topo	57
Tabla 13. Resumen de la los datos de entrada morfométricos para el modelo swat	58
Tabla 14. Eficacia de un modelo hidrológico para pasos de tiempo diario.....	58
Tabla 15. Hipsometría en la cuenca del río topo	61
Tabla 16. Características morfométricas de la cuenca del río topo	64
Tabla 17. Almacenamiento mensual de agua en la cuenca del río topo.....	89
Tabla 18. Parámetros empleados en la calibración del modelo swat	89
Tabla 19. Resultados de las métricas estadísticas en la calibración del modelo swat.....	90
Tabla 20. Cobertura vegetal vs evapotranspiración	103
Tabla 21. Caudal específico generado en cada subcuenca	106
Tabla 22. Potenciales parámetros morfométricos vs parámetros hidrológicos	109
Tabla 23. Potenciales parámetros morfométricos vs parámetros hidrológicos subdividida por región	110
Tabla 24. Evapotranspiración según el uso del suelo en la cuenca.....	113
Tabla 25. Caudales medios, específicos y escorrentía media anual en diferentes cuencas....	113

Introducción

El agua es un recurso vital para los ecosistemas naturales y desempeña un papel crucial para la sociedad y el medio ambiente en general. El estudio de la dinámica hidrometeorológica en cuencas hidrográficas se convierte en un aspecto de gran relevancia en este contexto. La metodología más rentable y efectiva para evaluar los recursos hídricos de una cuenca es mediante el cálculo del balance hídrico, proporcionando una detallada visión del comportamiento del ciclo hidrológico y del almacenamiento de agua en la zona.

La gestión adecuada de una cuenca hidrográfica implica comprender la compleja interacción entre diversos sistemas, como los políticos, culturales, administrativos, sociales, físicos y biológicos (Reyes et al., 2014). La comprensión de estos sistemas es esencial para tomar decisiones formadas y adecuadas en la gestión de los recursos hídricos, y garantizar la sostenibilidad del ecosistema productivo de la cuenca (Varela & Ron, 2022).

El balance hídrico es una de las leyes fundamentales en la hidrología y una herramienta esencial para evaluar la disponibilidad de agua en cuencas hidrográficas (Cotler, 2004). Sin embargo, cuantificar sus parámetros puede ser un desafío debido a la falta de medidas in situ y a la inestabilidad espacial de la evapotranspiración, entre otros factores (Ordoñez, 2011). Es esencial establecer procesos para recopilar, preprocesar y mantener la tecnología y la información adecuada que respalde investigaciones y permita una gestión eficiente de las áreas hidrográficas (Torres & Proaño, 2018).

Comprender el balance hídrico es crucial para evaluar el estado de humedad de una cuenca y tomar decisiones formadas en la gestión de los recursos hídricos (Silva, 2005). En Ecuador, existen cuencas hidrográficas con balance hídrico positivo y otras con déficit de agua, especialmente en la región de la costa (Chamba et al., 2019). A su vez, el balance hídrico es también conocido como la ecuación de continuidad; ya que la ecuación de continuidad establece la variación de contenido de agua en función del tiempo (Reyes et al., 2014).

Por otra parte, según Del Toro et al. (2014), la precipitación, como principal fuente de agua de ingreso en una cuenca, puede ser desigualmente distribuida según la región, clima y ubicación geográfica, generando diversos escenarios hidrológicos; otro factor relevante es la evapotranspiración, que representa la pérdida de agua en una cuenca y varía significativamente entre diferentes regiones.

La morfometría de la cuenca proporciona información relevante sobre la ecología de los ríos, la forma de la cuenca y su red de drenaje, permitiendo una comprensión integral de sus características limnológicas (Vidal et al., 1987). Los parámetros morfométricos son fundamentales para cualquier estudio hidrológico y facilitan la comparación, interpretación y establecimiento de estrategias para la conservación sostenible de las cuencas hidrográficas (Lux, 2012).

La caracterización hidrometeorológica, basada en los parámetros del ciclo hidrológico, es esencial para la planificación de los recursos hídricos, ya que proporciona información valiosa sobre la distribución del agua en una cuenca hidrográfica y permite identificar áreas propensas a sequías o inundaciones (Vásconez, et al., 2019).

En este contexto, el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) versión 2012, modelo que se emplea en esta investigación, se destaca como una herramienta útil para el análisis de la dinámica hidrometeorológica y la simulación de diferentes escenarios físicos y climáticos en una región (Bautista et al., 2014). Esta herramienta es especialmente adecuada para áreas de clima semi húmedo y semiárido, aunque puede ser empleada en otras regiones con características climáticas similares (Jodar et al., 2018). Los modelos de simulación como SWAT son fundamentales para el estudio y evaluación de los procesos ambientales, permitiendo pronosticar datos climáticos, caudales, sedimentos, entre otros; y así, facilitar la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos según Torres et al. (2004).

Es importante tener en cuenta que la precisión de los resultados de los modelos está influenciada por el tamaño y resolución de las cuencas, destacando que una mejor modelación se obtiene en cuencas más homogéneas y con una cartografía detallada; el modelo SWAT, al ser semidistribuido, divide la cuenca en áreas con características similares, lo que permite una simulación más homogénea y eficiente, reduciendo las pérdidas de información y facilitando la identificación de subcuencas críticas que deben ser protegidas (Gomariz & Alonso, 2018).

Por lo tanto, en este estudio, la empresa ECUAGESA ha proporcionado datos meteorológicos para abordar los objetivos planteados. Los datos in situ recopilados por la estación meteorológica M01 en la zona baja de la cuenca incluyen precipitación, temperatura, velocidad del viento, radiación solar, humedad relativa y presión atmosférica. Gracias a estos datos, se cuenta con una mayor cantidad de variables para obtener resultados más precisos que se asemeje a la realidad.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, este estudio se centra en una cuenca hidrográfica situada al este de la provincia de Tungurahua, Ecuador, donde se encuentra una red hídrica importante para las comunidades locales y para la empresa hidroeléctrica ECUAGESA. En esta red hídrica se encuentra el Río Topo, que forma parte de la cuenca que drena sus aguas hacia la Amazonía ecuatoriana. Dada la importancia de este tipo de estudios y al desconocimiento del almacenamiento de agua que se da en la cuenca por parte de la empresa ECUAGESA, el objetivo de esta investigación se centra en evaluar la dinámica hidrometeorológica mediante el cálculo del balance hídrico en la cuenca del Río Topo. Además, se pretende estudiar la morfometría y las características climáticas de la cuenca,

así como evaluar de manera preliminar la dinámica hídrica y morfométrica por subcuencas mediante los resultados del modelo SWAT.

CAPÍTULO I

Generalidades

Planteamiento del Problema

El agua es un recurso crucial para diversas actividades, pero su disponibilidad se ve afectada por varios factores que alteran su ciclo natural. En este sentido, la empresa ECUAGESA, encargada de la hidroeléctrica del Río Topo en la provincia de Tungurahua, carece de conocimiento sobre las características y dinámica de la cuenca en términos del balance hídrico. Esta falta de conocimiento puede resultar en desventajas tanto para el medio ambiente como para el aprovechamiento sostenible del agua por parte de la empresa ECUAGESA.

La falta de comprensión del balance hídrico en la cuenca puede conducir a una gestión inadecuada de los recursos hídricos, lo que a su vez impacta negativamente en la sostenibilidad del ecosistema y el medio ambiente. Es fundamental para la empresa ECUAGESA adquirir un conocimiento sólido del balance hídrico en la cuenca del Río Topo, a fin de garantizar un manejo adecuado de los recursos hídricos y promover una dirección sostenible en línea con los principios de conservación del ecosistema y protección ambiental.

Objetivos

Objetivo General

Diagnosticar la dinámica hidrometeorológica en función del balance hídrico en la cuenca del Río Topo en la provincia de Tungurahua-Ecuador.

Objetivos Específicos

- Caracterizar desde el punto de vista hidrometeorológico y morfométrico a la cuenca del Río Topo.
- Evaluar el balance hídrico de la cuenca del Río Topo por medio de la recopilación de registros hidrometeorológicos.
- Analizar de manera preliminar la dinámica del agua por subcuencas en función de los datos morfométricos e hidrometeorológicos de la cuenca del Río Topo por medio del modelo SWAT.

Justificación

La empresa ECUAGESA, encargada de la hidroeléctrica del Río Topo en la provincia de Tungurahua, carece de conocimiento sobre el almacenamiento de agua en la presente cuenca. Por lo tanto, es de vital importancia llevar a cabo esta investigación para optimizar la gestión hidrometeorológica de la cuenca y comprender la disponibilidad de agua.

En la actualidad, la empresa ECUAGESA cuenta con una base de datos hidrometeorológicos que permite alcanzar los objetivos de este proyecto de investigación. Además, se espera

obtener nuevos datos que contribuyan a caracterizar de manera más precisa el comportamiento hidrometeorológico de la cuenca.

El presente proyecto de investigación es viable debido a la disponibilidad de recursos humanos y fuentes de información necesarias para llevarlo a cabo. Mediante el diagnóstico del balance hídrico de la cuenca del Río Topo, se pretende contribuir a la gestión sostenible de los recursos hídricos en la cuenca, mejorando así el ecosistema y el manejo del agua.

Este trabajo de investigación tiene una utilidad metodológica, ya que puede sentar las bases para futuras investigaciones a corto o largo plazo, implementando metodologías relacionadas que abarquen diversos análisis y evaluaciones.

El diagnóstico de la dinámica hidrometeorológica busca contribuir a los estudios a nivel nacional, siendo un elemento esencial para mejorar los procesos, metodologías y modelos relacionados con los recursos hídricos, con el objetivo de mejorar la calidad, eficiencia y eficacia en este campo.

Estado del Arte

La evaluación de los recursos hídricos en una cuenca se puede realizar mediante la cuantificación de los distintos componentes del balance hídrico. En el estudio abarcado por Morejón et al. (2015), utilizan el método propuesto por Lvovitch en 1959 para determinar con precisión la disponibilidad de agua superficial en los ríos de las cuencas forestales de Mantua, Cuyaguateje, San Juan y Martínez. Durante un período de 23 años, se llevaron a cabo mediciones in situ de lluvia y escurrimiento. Los resultados mostraron una tendencia creciente en los procesos de transpiración en comparación con los escurrimientos. El método propuesto por Lvovitch en 1959 se emplea en esta investigación, ya que comprende la dinámica de los flujos de agua en las cuencas forestales, que es característico de la cuenca del Río Topo.

Otro estudio según Torres & Proaño (2018), muestran los componentes del balance hídrico; por ejemplo, en los páramos del Jatun Sacha, Ecuador, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de los principales parámetros que caracterizan el balance hídrico en los páramos de Jatun Sacha. Para lograr este objetivo, se realizó la recolección, análisis y procesamiento de información hidroclimatológica proveniente de estaciones ubicadas en los páramos del Antisana. Estos datos se utilizaron como un mecanismo de apoyo en la toma de decisiones para el manejo y conservación de las zonas de recarga hídrica en la parte norte del Ecuador.

Los resultados obtenidos indican que la dinámica del régimen hidrológico en la zona de estudio está determinada por eventos de lluvia de baja intensidad, pero de alta frecuencia en términos de volumen y duración. Con esta investigación se podrá tener una base para

solventar la dinámica hidrológica de la cuenca del Río Topo en función de sus características morfométricas e hidrometeorológicas.

A su vez, Duque et al. (2019), muestran un estudio del balance hídrico en la Microcuenca Chaquilcay en el área de interceptación con el bosque y vegetación protector Aguarongo, Gualaceo-Ecuador. El balance hídrico se analiza en relación a la variación de precipitación y temperatura en la zona. Se utilizaron datos de cuatro estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), divididas en estaciones climatológicas y pluviométricas, con series temporales de más de 30 años (1982-2015).

Para cuantificar los aportes y pérdidas de agua, se realizaron análisis estadísticos de las series temporales y se llevó a cabo el levantamiento de información in situ. Se utilizaron métodos como la regresión lineal, el test de rachas y la curva de doble masa para completar y validar las series de precipitación y temperatura. En las estaciones pluviométricas, se incluyeron temperaturas referenciales obtenidas a partir del ráster de isotermas de Ecuador. Este estudio proporciona una evaluación detallada del balance hídrico en la microcuenca de Chaquilcay.

Echeverría et al. (2007), en el “Estudio comparativo de los componentes del balance hídrico en un bosque nativo y una pradera en el sur de Chile” para esto se calculó distintos factores de la redistribución de las precipitaciones, percolación, evapotranspiración; además, para determinar la evapotranspiración potencial total se basó en la metodología de continuidad de masas que fue propuesta por Feller en 1981. Como resultados dieron a notar que la variación temporal en los mecanismos del balance hídrico tanto del bosque como de la pradera se fundamentan en la distribución de las precipitaciones, el clima, la vegetación y su morfología. Para el análisis morfométrico; Pacheco (2013), en la investigación “Dinámica hidrológica y sedimentológica en una cuenca representativa mediterránea. Riera de Vernegá (1993 – 2012)”, busca conocer el impacto de la vegetación en la escorrentía de un área de montaña; además, del estudio de la precipitación, carga de acuíferos y escorrentía, a nivel mensual durante el periodo 1993 – 2012. Por medio de esta investigación se dio a conocer un análisis anual, estacional y mensual de la precipitación, su respuesta hidrológica y un análisis del caudal. Los resultados obtenidos muestran la distribución estacional de las precipitaciones, la escorrentía superficial y la calidad del agua.

Galván & Márquez (2006), indica una descripción biofísica del Río Coapa, Chiapas; en donde da a conocer las características en cuanto a los parámetros del suelo, agua y vegetación, con el fin de evaluar la planificación de explotación del recurso hídrico. La metodología empleada proviene de la recopilación de datos climatológicos para evaluar: la vegetación, suelo, agua, calidad del agua y el clima. Muestra una caracterización fisiográfica de la cuenca tomando en

consideración: topografía, clima, principales unidades del suelo, hidrología, tipos de vegetación ubicados en la cuenca.

Guerra & González (2002), en su investigación sobre la “Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela”, este trabajo analiza las características morfométricas de la cuenca, con el fin de establecer y ver el comportamiento de una red de drenaje y su evolución tanto de la topografía como de la hipsometría de la dinámica de la cuenca. Se midieron la superficie, perímetro, longitud de la cuenca, la elevación, sus cauces, el desnivel de la cuenca y finalmente el número de cauces desde un orden menor. Como resultados obtuvieron que la cuenca presentaba un área asimétrica positiva y además que esta cuenca se encontraba en un ciclo de desequilibrio y juventud.

Por otro lado, en dirección de la modelación, el modelo SWAT a sido reconocido como una herramienta eficaz para identificar los procesos dinámicos del agua y predecir escenarios futuros a través de simulaciones, según lo planteado por Bautista et al. (2014). Por ejemplo, en la investigación de Blandón (2019), resalta la “Dinámica hidrológica de las aguas superficiales en la microcuenca Río Pire, usando Soil and Water Assessment Tool (SWAT)”, en esta investigación se indaga en valorar el dominio del uso del suelo en la dinámica hidrológica de las aguas superficiales, utilizando la herramienta (SWAT).

A través de esta investigación se permitió estimar el impacto que tiene el uso del suelo con la generación de escorrentías y caudales, con una base de datos climáticos de 10 años que provenían de tres estaciones meteorológicas. Los resultados obtenidos recalcan la producción hídrica y escorrentía en los suelos Ultisol y en áreas cubiertas por pastizales.

Además, Tamayo (2017) ha destacado el uso del modelo SWAT en los páramos de montaña, específicamente en la estimación de caudales en la cuenca del Río Coca, en Ecuador. Muestra una mayor producción hídrica en zonas con dirección a la Amazonía ecuatoriana a comparación de las zonas altas del Ecuador. Este modelo se caracteriza por ser semidistribuido, utilizando las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) para representar la variabilidad espacial de las características hidrológicas. Asimismo, es un modelo determinístico que permite visualizar gráficamente el balance hídrico y comprender los procesos que ocurren en la cuenca. En consecuencia, el empleo del modelo SWAT en este estudio de la cuenca del Topo brindará una herramienta precisa y confiable para caracterizar la dinámica hidrometeorológica en el área de investigación. Esto permitirá comprender mejor los procesos hídricos, realizar predicciones y evaluar posibles escenarios futuros en relación con el recurso del agua.

Ahora bien, a raíz de este estado del arte; en esta investigación nos permitirá conocer la dinámica hídrica a través del balance hidrológico en función de las características

morfométricas e hidrometeorológicas que se presenten en la cuenca del Río Topo; además, con el empleo del modelo SWAT se podrá visualizar a nivel de subcuencas de la cuenca del Río Topo las características morfométricas y el comportamiento hidrometeorológico.

Alcance

El presente proyecto de investigación es exploratorio y descriptivo y será nuevo para la hidroeléctrica ECUAGESA en la cuenca del Río Topo en la provincia de Tungurahua. La hidroeléctrica ECUAGESA no cuenta con un estudio del balance hídrico en la cuenca del Río Topo, para fines de entendimiento del comportamiento hidrometeorológico en la cuenca y al mismo tiempo para la planificación y gestión en un desarrollo sustentable en la presente cuenca; por tal motivo, este estudio ayudará a conocer la disponibilidad de agua en la cuenca hidrográfica del Río Topo y asegurar una dirección y aprovechamiento sistematizado del agua en la cuenca.

El proyecto contará con un adecuado análisis en la dinámica hidrometeorológica de la cuenca basados en un estudio de monitoreo climático que se pueda identificar; así como también, la caracterización de la cuenca: su geología, la cobertura vegetal, su ciclo hidrológico, entre otros.

El proyecto se basará en procedimientos y especificaciones técnicas en la adquisición de datos hidrometeorológicos; además, de implementar modelos para identificar la dinámica hídrica de la cuenca. Mediante la información extraída, se procederá a realizar un modelo ajustable, la memoria de cálculo y memoria técnica con el fin de disponer de un proyecto viable.

Al final se tendrá el respectivo análisis del comportamiento de la cuenca en función a su balance hídrico y a la información extraída. Sobre los resultados que se generen, se establecerán recomendaciones que ayuden a mejorar el manejo hídrico de la cuenca del Río Topo.

CAPÍTULO II

Marco Teórico

Morfometría de la Cuenca

Parámetros de Forma

Perímetro (P). Línea que encierra la cuenca, circula por la divisoria de aguas de la topografía de la cuenca (Lux, 2012).

Longitud Axial (L). Distancia que existe entre dos puntos; la distancia entre el punto más lejano a la desembocadura del río principal; línea recta que sigue la dirección del río principal (Lux, 2012).

Longitud del Río Principal (Cm). Longitud que tiene el río principal desde un punto más lejano hasta su desembocadura (Lux, 2012).

Longitud Total de Drenaje (Ct). Longitud definida por la unión de todas las longitudes de los ríos que existen en la cuenca (Lux, 2012).

Coeficiente de Sinuosidad Total (S). Según Guerra & González (2002), es la relación entre la longitud del río principal (Cm) y la longitud axial de la cuenca (L); además, establecen que, si hay una sinuosidad baja, el río es rectilíneo sin un proceso de ensanchamiento. En cambio, Esper et al. (2014), recalcan que si la sinuosidad es > 1 , el río no es tan rectilíneo, tiene ciertos entrelazamientos en algunos de sus tramos; además, el coeficiente de sinuosidad puede variar desde 1 (río en línea recta) y 4 (ríos con líneas muy curvas).

$$S = \frac{Cm}{L}$$

Área (A). Para Cardona (2012), es la superficie de la cuenca contenida bajo la divisoria de aguas, recalca que este parámetro es de suma importancia, porque si existe un valor erróneo esto puede incidir negativamente en los resultados.

Ancho Promedio (Ap). Relación que existe entre el área de la cuenca (A) y la longitud axial (La) (Cardona, 2012).

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

Factor de Forma (IF). Horton (1932), la relación que hay entre el área de la cuenca (A) y el cuadrado de la longitud de la cuenca (L); indica la tendencia a las crecidas que puede tener una cuenca; si $IF = 1$, representa una cuenca cuadrada; si $IF < 1$, representa una cuenca alargada, la cuenca tiene crecidas mayores y si $IF > 1$, representa una cuenca achatada, tiende a sufrir crecidas y aluviones menores (Cardona, 2012).

Si la cuenca tiene una geometría triangular, entonces sus afluentes son de igual longitud, con dos vértices en las cabeceras y simultaneidad en su escurrimiento al momento de llegar al punto final de la cuenca, esto provocará crecidas mayores (Cardona, 2012). De hecho,

González de Matauco (2004), indica que las cuencas de forma alargada responden de manera deficiente a los altos caudales, en comparación a las cuencas de forma compacta (redondeada), esto se debe a que la escorrentía que drena en las zonas de la cuenca compacta tiene varios recorridos para llegar a su río principal en una misma duración, mientras que en una cuenca de forma alargada ocurre todo lo contrario; es por esto que la forma que tiene una cuenca hidrográfica y su red de drenaje influyen en el tamaño y en la forma de los picos de caudales en el punto de salida de la cuenca.

Si una cuenca de geometría rectangular con su río principal ubicado en el eje mayor del rectángulo, la distancia que circula el río es mayor al de una cuenca con geometría cuadrada y de la misma área (Cardona, 2012). Toda cuenca tiene su forma que la caracteriza; de la misma manera, la mayoría de las cuencas tienden a tener una forma ovoide y la desembocadura del río principal se produce en el extremo angosto (Guerra & González, 2002).

$$IF = \frac{A}{L^2}$$

Índice de Alargamiento (Ia). Determina cómo se comporta la forma de la cuenca; está en función de la longitud axial (La) y ancho de la cuenca (Ap). Si Ia > 1, el área de la cuenca es más larga que ancha (forma alargada) (Reyes et al., 2014). El índice de alargamiento varía entre <1 (cuencas circulares) y >1 (cuencas alargadas) (Guerra & González, 2002).

$$Ia = \frac{La}{Ap}$$

Índice Asimétrico (Ias). Relación que hay entre el área de las vertientes; calcula la uniformidad de la distribución de la red de drenaje; si Ias > 1, el río principal se localiza muy unido a una de sus vertientes, lo que provoca heterogeneidad en la distribución de la red de drenaje; si Ias = 1 tiene una distribución uniforme (Reyes et al., 2014).

$$Ias = \frac{A_{may}}{A_{men}}$$

Donde:

A_{may}: Vertiente mayor (km²) = 277.98 km².

A_{men}: vertiente menor (km²) = 163.35 km².

Coeficiente de Compacidad de Gravelius (Kc). Relación que existe entre el perímetro de la cuenca (P) y el perímetro de un círculo teórico de área igual al de la cuenca (S), es un dato adimensional, el círculo teórico describe la superficie y forma de la cuenca, influye en los escurrimientos del hidrograma de precipitación (Reyes et al., 2014).

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

El mismo autor señala que se puede encontrar la forma que presenta la cuenca en función de K_c :

- $K_c = 1$ (cuenca redondeada).
- $K_c = 1.25$ (cuenca oval redonda).
- $K_c = 1.50$ (cuenca oblonga).
- $K_c > 1.75$ (cuenca rectangular-oblonga).

Coefficiente de Compactibilidad (C). Se caracteriza a través del índice de circularidad de Miller, oscila entre 0 (cuenca completamente irregular) y 1 (cuenca completamente compacta), es adimensional, indica la irregularidad del perímetro de la cuenca; por consiguiente, la tendencia a crecientes ocurre en mayor probabilidad en cuencas con mayor grado de irregularidad presentando las mismas características morfométricas (Guerra & González, 2002). El coeficiente de compactibilidad es lo inverso al coeficiente de compacidad de Gravelius (K_c); si $C = 1$, la cuenca tiene forma circular (González de Matauco, 2004).

$$C = \frac{4 * \pi * A}{P^2}$$

Donde:

A: Área de la cuenca.

P: Perímetro de la cuenca.

Coefficiente de Elongación (E). La elongación se caracteriza a través del índice propuesto por Schumm (1956), este índice varía desde 0 (cuenca forma circular), hasta 1 (cuenca forma alargada) (Guerra & González, 2002). Para el autor González de Matauco (2004), una cuenca elongada presenta una demora de la concentración de escorrentía a causa de la longitud del río principal; por tal motivo, las crecidas tienden a ser bruscas al momento que se concentran las aguas.

$$E = \frac{\sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}}{L}$$

Parámetros de Relieve

Curva Hipsométrica (CH). Da a conocer la evolución de una cuenca hidrográfica, describe el relieve, se elabora la curva hipsométrica a través de las cotas de altitud por medio de un gráfico bidimensional (Guerra & González, 2002).

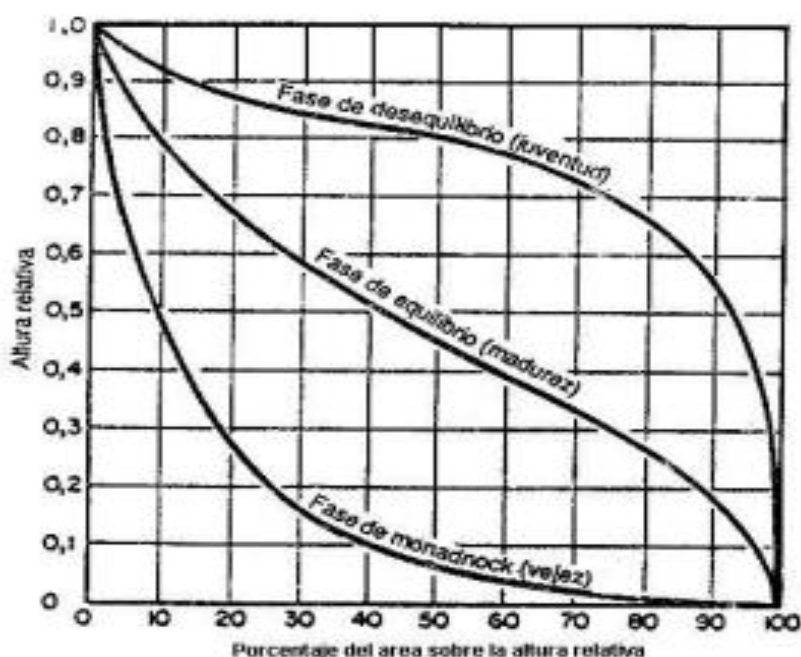
Rojas (2015), indica que la curva hipsométrica permite representar de manera precisa la elevación en una cuenca; además, esta curva muestra el porcentaje de área de la cuenca que se encuentra por encima de una cota; y según Racca (2007), la curva hipsométrica es una representación de la distribución del área de la cuenca en función de la elevación, donde

el eje de las ordenadas representa la elevación y el eje de las abscisas representa el porcentaje del área encima de la curva de nivel.

De hecho, Gaspari et al. (2012), indican que la forma de la curva hipsométrica es sigmoideal, cóncava en la parte superior y convexa en la parte inferior; en suma, establece que los valores menores al 30% corresponden a una cuenca en fase de senectud.

En la (figura 1), se representan tres curvas hipsométricas que hace referencia a cuencas con diferentes evoluciones; la curva superior manifiesta una cuenca con potencial erosivo, la curva de la mitad refleja una cuenca en equilibrio y la curva inferior representa una cuenca sedimentaria (Gaspari et al., 2012).

Figura 1. Curva hipsométrica de Cuencas



Fuente: (Guerra & González, 2002).

Pendiente Media de la Cuenca (PM). Guerra & González (2002), indican que la pendiente media de una cuenca hidrográfica es un principal parámetro que permite describir el relieve, guarda una cierta relación con la infiltración, contribuyentes de agua subterránea, escurrimiento superficial y la humedad del suelo.

A la vez Reyes et al. (2014), indican que la pendiente media de la cuenca es una variación de la inclinación; la pendiente media se la obtiene gracias a la topografía con sus respectivas curvas de nivel, la pendiente influye en el proceso de escurrimiento de las aguas lluvia en relación al uso del suelo y la red de drenaje, una cuenca que presenta altas pendientes es proclive a sufrir crecientes en sus ríos en tiempos cortos.

Por otra parte, González de Matauco (2004), recalca que las áreas fluviales de mayores pendientes tienen una mayor velocidad de escorrentía, incrementando los caudales.

Desnivel de la Cuenca (Hc). Diferencia entre la cota mayor y la cota menor, esta variable está relacionada con la variabilidad climática y ecológica, ya que en una cuenca con una cantidad considerable de pisos altitudinales llega a tener más ecosistemas, porque tiende a presentar variaciones en su precipitación y temperatura (Autoridad Nacional del Agua (ANA), s.f.). (Hadley y Schumm, 1961), establecen la siguiente ecuación:

$$Hc = H - h$$

Donde:

H: altura máxima.

h: altura mínima.

Parámetros de Drenaje (Red de Drenaje)

González de Matauco (2004), indaga que la red de drenaje es un conjunto ponderado de los cauces de una cuenca, que concurren en un solo colector principal, tiene como finalidad el envío de materia y energía hacia la cuenca hidrográfica; tanto la morfología de la red de drenaje como la densidad de drenaje y los órdenes de las corrientes son parámetros primordiales de estudio que están relacionados a las características geomorfológicas y bióticas de la cuenca.

Entre tanto Gaspari et al. (2012), clasifican la red de drenaje en función de las variables de Horton-Strahler, quien formula que la red de drenaje se suele representar por una conexión de nodos con segmentos, de esta manera cada uno de estos nodos presenta una sola dirección hacia la salida de la cuenca; un río puede tener uno o más segmentos y la unión de estos segmentos representan a un canal.

Relación de Bifurcación (Rb). (Schumm, 1956), establece que este parámetro define el grado de peligrosidad de una cuenca y estima la rapidez de crecidas, los valores de bifurcación oscilan entre 3 y 5 según Guerra & González (2002) y Lux (2012).

Para González de Matauco (2004), el índice de bifurcación mayor a 4 tiende a tener una torrencialidad alta; cuando una cuenca es redondeada, menor es su relación de bifurcación; por lo tanto, existe un menor riesgo a las crecidas fuertes en la desembocadura del río principal por la concentración no tan brusca de esorrentía; una cuenca con una forma alargada y con un Rb bajo, tiene pendientes bajas.

$$Rb = \frac{N_{n-1}}{N_n}$$

Densidad de Drenaje (Dd). (Horton, 1932) indica que es una relación entre el total de la longitud de los ríos de la cuenca con respecto al área de la cuenca hidrográfica, con la densidad de drenaje se puede determinar el régimen y la morfología de la cuenca; por tal motivo, valores altos de densidad de drenaje simbolizan un escurrimiento fuerte; es un dato

importante, pues da a conocer la eficacia del drenaje, no tiene relación alguna con el caudal (González de Matauco, 2004). Los suelos permeables se logran identificar por la densidad de drenaje baja, una escasa cobertura vegetal minimiza la infiltración de agua en el suelo de la cuenca hidrográfica según Vidal et al. (1987).

Por otra parte, Guerra & González (2002), indican que mientras mayor es la densidad de drenaje hay una respuesta rápida de la cuenca hacia las precipitaciones fuertes, evacuando así el líquido agua en poco tiempo; por tal motivo, con una densidad de drenaje alta, una gota de agua se movilizará en menor tiempo en un tramo de la cuenca con una velocidad de escurrimiento mayor. Además, González de Matauco (2004), indaga que, en zonas de mayor densidad de drenaje, la esorrentía se traslada velozmente, disminuyendo así el tiempo de concentración, lo cual conlleva al aumento de crecidas, ya que existe menos infiltración.

Si $Dd < 1$, cuenca con sistema de drenaje poco desarrollada, presenta pocos ríos, de topografía suave, tasa de erosión mínima; si $1 < Dd < 2$, cuenca con un sistema de drenaje prudentemente desarrollado, con una cantidad prudente de ríos, presenta una topografía fuerte y si $Dd > 2$, presenta un sistema de drenaje desarrollado, tiene muchos ríos, con topografía fuerte y una tasa de erosión alta.

$$Dd = \frac{Ct}{A}$$

Donde:

Ct: Longitud total de los cauces.

A: Área de la cuenca.

Frecuencia de Cauce de n Orden (Fn). (Horton, 1932), indica la cantidad de ríos por área de una cuenca, considera a un río como segmento; es decir, cuando comienza un tipo de orden hasta cuando este llega a cambiar, es una medida adimensional (Esper & Perucca, 2014).

$$Fn = \frac{\sum Nn}{A}$$

Donde:

Nn: Números de Río de un orden determinado.

A: Área de la cuenca.

Número de Curvatura (CN). Simboliza la composición hidrológica del suelo, el uso y tipo de tratamiento del suelo, es una variable estandarizada por el SCS (Soil Conservation Service, 1986). Oscila entre 0 (infiltración alta) y 100 (no presenta infiltración), este parámetro permite verificar la capacidad de retención del agua (Esper & Perucca, 2014).

Hidrometeorología a de la Cuenca

Intercepción

Es el volumen de agua que al momento de precipitar es interceptada por el manto vegetal; una parte del agua que es interceptada nunca llega al suelo sino más bien se evapora (López et al., 2017). El proceso de la intercepción depende del tipo de la vegetación de una zona, de la intensidad-duración-frecuencia de la precipitación y demás condiciones climáticas, las condiciones de intercepción aumentan cuando hay una dinámica favorable en el proceso de evaporación (Huber & Oyarzún, 1983).

El fenómeno de la intercepción cobra importancia en el estudio del balance hídrico, cuando la precipitación es mínima y de baja intensidad, y cuando la cantidad de agua interceptada y evaporada a la vez es mayor al 30% de agua precipitada; en adición, este proceso está en relación con el tipo, edad, especie de la vegetación; la intercepción la consideran como una pérdida de agua, sobre todo en los periodos vegetativos o en la presencia de hojas; en precipitaciones pequeñas la cantidad de agua que es interceptada llega a alcanzar el total de agua precipitada, ya que el agua se retiene en las hojas y troncos donde se evapora y nunca llega el agua al suelo; mientras aumenta la cantidad de agua precipitada, la cantidad de agua interceptada va siendo mayor hasta llegar a un límite, donde esta se vuelve constante; por ende, la dinámica de intercepción no aumenta conforme se produce la precipitación, pero disminuye constantemente el porcentaje interceptado con respecto a la precipitación total (González de Tango et al., 1988). Cuando existe una elevada intensidad; por ejemplo, 60mm/h, el agua que es interceptada es menor (Belmonte, 2001). En adición, la intercepción va a depender de cuánta agua saturada se encuentre en el follaje de la cuenca.

Radiación solar

Las nubes reducen la cantidad de radiación solar que puede arribar a la superficie; por tal motivo, la cantidad de radiación solar que llega a un área no es constante en un año (Cotler, 2004). La cobertura vegetal boscosa consume la radiación solar impidiendo que la temperatura en la superficie aumente (Moreno et al., 2021).

Si se elimina la cobertura vegetal se genera impactos negativos en la superficie terrestre, el suelo expuesto tiene una mayor capacidad de absorber la radiación solar, aumentando consigo la temperatura y por ende aumenta la evapotranspiración; a su vez, la precipitación en áreas expuestas reduce la capacidad de almacenamiento de agua (Alencar da Silva et al., 2019). El ciclo del agua también está influenciado por la radiación solar; del mismo modo, un bosque absorbe un 60 a 90% de radiación solar (Londoño, 2001).

Humedad relativa

La humedad relativa es la cantidad de humedad que tiene el aire; un aumento en la evapotranspiración va ligado a una disminución de la humedad relativa (Martínez, 2014). Para cuantificar la humedad relativa no solo va a depender de la humedad, sino también de la temperatura del aire y la presión; en un día completamente soleado la humedad relativa puede llegar a disminuir un 50% a causa del aumento de temperatura del aire; al momento de descender la temperatura, merma la cantidad de vapor en el aire; el psicrómetro es un instrumento que detecta la humedad relativa en los centros meteorológicos (Torres & Aragón, 2018).

Presión

Según la FAO, la presión atmosférica es la presión que se ejecuta a causa del peso atmosférico. Por otra parte, Quiroz & Mostacero (2020), resaltan que la presión atmosférica y la temperatura inciden en el ascenso y disminución del agua en una cuenca.

Velocidad del Viento

La FAO indica que la medida de velocidad del viento normalmente se ubica a 10 m de una estación meteorológica; se define como el aire en movimiento horizontal, resulta de las diferencias de presión.

Escorrentía

Escorrentía Superficial. La escorrentía superficial es la información básica a emplear en cualquier ejecución técnica; además, sirve como parte para la administración de los recursos hídricos; la escorrentía se relaciona con las variables de la cobertura vegetal, tipo de suelo y uso de suelo; esta es la cantidad de agua de una precipitación que comienza a drenar sobre la capa superficial del suelo, genera y aumenta el volumen de los ríos; uno de los métodos para estimar la escorrentía superficial es por medio del número de curva (NC) empleado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos (1972) (Gaspari et al., 2007).

Escorrentía Subsuperficial. Flujo de agua que se infiltra y es regresada de nuevo al suelo o llega al sistema subterráneo, esta dinámica es a causa del sistema radicular de la vegetación (Álvarez & Devia, 2013). En los materiales cohesivos, el índice de infiltración tiene que ser alto para producir un flujo subsuperficial y así incitar a un cauce; a su vez, la superficie poco permeable favorece también a una dinámica subsuperficial del agua (González et al., 2003).

Escorrentía Subterránea. Parte del agua precipitada que llega a infiltrarse y es conducida a las áreas saturadas del suelo y así se incorpora a las aguas subterráneas (acuíferos); las áreas impermeables limitan que exista escorrentía subterránea; la infiltración contribuye a la dinámica de la escorrentía subterránea (Alcántara, 2015).

Infiltración

De la precipitación que logra alcanzar el suelo, una pequeña parte se infiltra, esta fracción de agua infiltrada es la que logra llegar al sistema de agua subterránea y acuíferos (Schosinsky & Losilla, 2000). La infiltración forma parte de la dinámica del ciclo hidrológico y se conjuga con el escurrimiento superficial (Landini et al., 2007). Los componentes que perturben el tamaño o la distribución de los poros en el suelo establecen la tasa de movimiento de agua subterránea; y frente a cualquier alteración que cause un decremento en la textura y tamaño de los poros, provocará una disminución en la tasa de infiltración (Aoki & Sereno, 2006).

La compactación tiende a disminuir los poros del suelo provocando una baja infiltración; el uso y cambio del suelo altera las características del suelo y a la vez varía su estructura y obstruye o incrementa los poros; la infiltración se vuelve rápida en los poros de grandes tamaños y se retarda en los poros pequeños; el cambio de la cobertura vegetal altera la permeabilidad del suelo y el almacenamiento de agua; a la vez, cuando se tiene un mayor contenido de humedad del suelo existe un mayor tiempo para alcanzar la infiltración básica; del mismo modo, cuando la humedad del suelo es menor la tasa de infiltración crece; áreas con presencia de rocas, suelos desnudos con pendientes mayores a un 30% imposibilitan la presencia de infiltración y promueven el fenómeno de escorrentía superficial (Gómez et al., 2014).

La capacidad de infiltración se altera a causa de las alteraciones en el suelo por motivos de los disturbios físico-químicos; al mismo tiempo, los incendios reducen esta capacidad de infiltración del suelo, la fauna edáfica promueve a la vez la infiltración ya que favorecen la microporosidad; por tal motivo, las actividades agropecuarias, incendios forestales, la ganadería, especies leñosas merman la infiltración en una zona (Karlin et al., 2019).

Los suelos compactados o con presencia de costras también limitan la infiltración en el suelo, favoreciendo así a la escorrentía superficial; el proceso de infiltración se lleva a cabo cuando el agua se desplaza por los poros del suelo, produce un llenado en su porosidad y pasa de un estado no saturado a uno saturado, donde los poros del suelo están completamente llenos de agua, así la velocidad de infiltración llega a disminuir hasta un determinado tiempo donde se estabiliza y promueve la velocidad de infiltración básica; la dinámica de infiltración está relacionada con la intensidad de precipitación (Kunst et al., 2003).

Balance Hídrico

El balance hídrico es un enfoque práctico que se utiliza para calcular la cantidad de agua disponible en un sistema en un determinado período de tiempo, el objetivo principal del balance hídrico es entender cómo el agua se mueve y se distribuye dentro del sistema, considerando los aportes de precipitación y las pérdidas por evapotranspiración y escorrentía (Guerrero et al., 2014).

Modelo SWAT

SWAT

Según Gomariz & Alonso (2018), el modelo SWAT simula una gran cantidad de variables y reproduce eficazmente la dinámica hidrológica; el modelo se basa en la ecuación del balance hídrico y simula parámetros como la precipitación, infiltración, escorrentía superficial y subterránea, evapotranspiración, percolaciones, calidad del agua y suelo y el desarrollo de vegetación.

SWAT-CUP

Calibration Uncertainty Procedures (SWAT-CUP); permite calibrar, validar y analizar los escenarios hidrológicos de los resultados preliminares del modelo SWAT y a la vez comprarlos con los datos observados en campo como indica Jodar et al. (2018). A causa de una gran cantidad de variables y pocos trabajos desarrollados en zonas con los mismos contrastes, SWAT debe calibrarse con el fin de tener resultados apropiados al comportamiento hidrológico de una cuenca y así los datos obtenidos se ajusten a los datos observados (Gomariz & Alonso, 2018).

SUFI-2

El modelo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting version-2*) se incluye en el *software* SWAT-CUP, el algoritmo se basa en una serie de interacciones, cada interacción es puesta en marcha con los resultados de una anterior simulación, esto continúa hasta llegar a optimizar el parámetro simulado con el observado; al mismo tiempo, el modelo SUFI-2 trae consigo parámetros estadísticos que permiten evaluar el rendimiento del modelo en SWAT; por lo que, al final de las iteraciones se llega a escoger el caudal más parecido al caudal medido in situ, ya que es el que presenta los mejores resultados (Jodar et al., 2018).

CAPÍTULO III

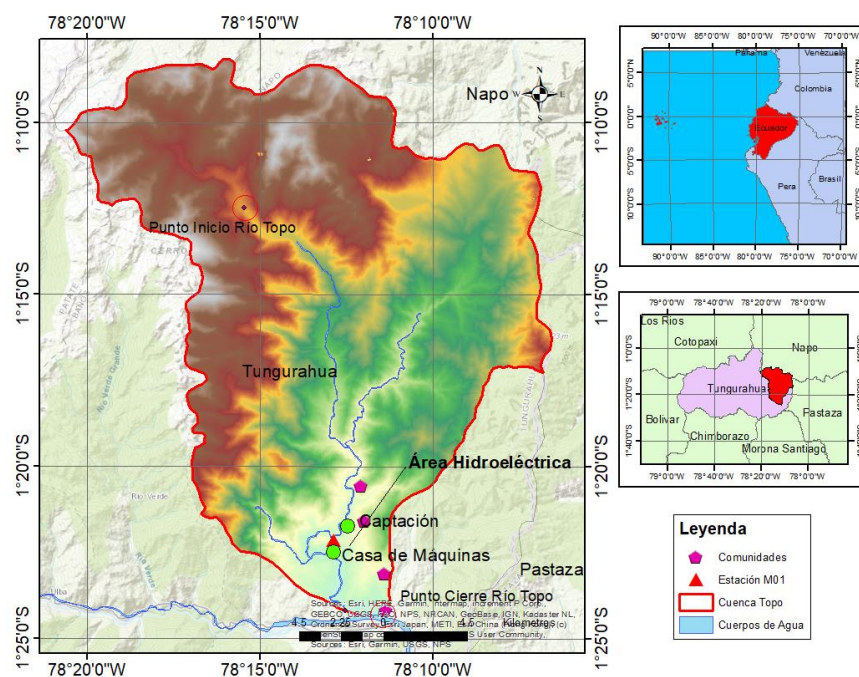
Descripción del Área de Estudio

Para este capítulo, la fuente de información cartográfica se la obtuvo del portal (Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), 2022), denominado “Sistema de información geográfica para aplicaciones agropecuarias en el ordenamiento de territorio y manejo integral de cuencas”, esta plataforma tiene información espacial del Ecuador en formato Shapefile (ESRI).

La cuenca del Río Topo se localiza en la provincia del Tungurahua, cantón Baños, al norte del Río Pastaza. El Río Topo nace al noroccidente del Cerro Hermoso o Tupu que se encuentra en la cordillera de los Llanganates, rodeada de una línea montañosa (Rivadeneira & Anderson, 2010). El Río Topo se origina a 3700 msnm, a diferencia de lo que señala el autor Rivadeneira & Anderson (2010), que indica que nace a los 3000 msnm. La intersección entre los Ríos Pastaza y El Topo se origina a 1291 msnm (desembocadura del Río Topo), lo que ocurre sobre materiales de esquistos, metalavas y metagrauvacas. La cuenca abarca un área total de 441.33 km².

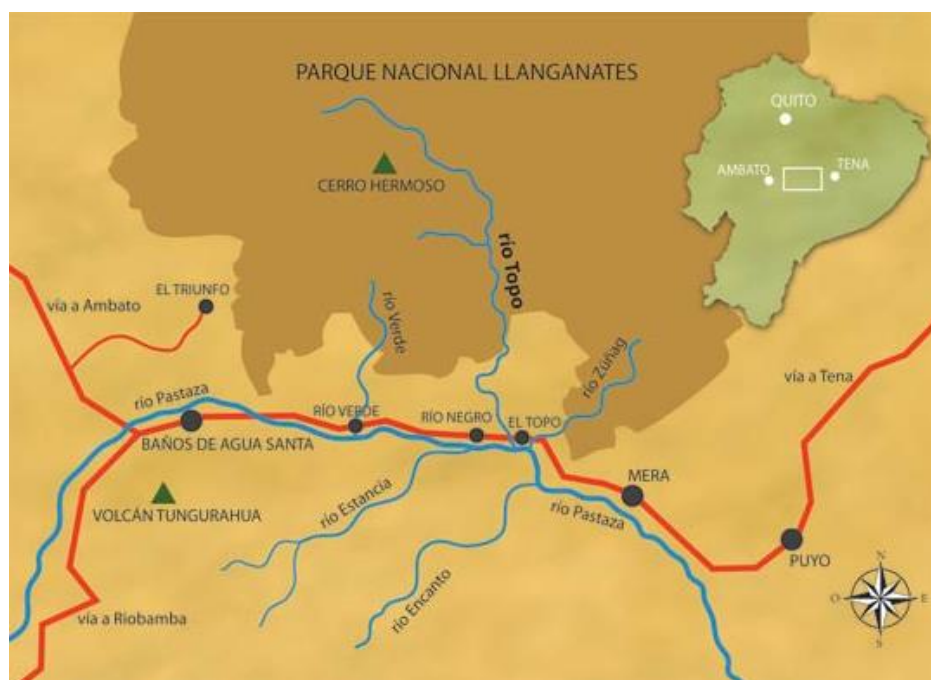
Las cabeceras de la cuenca del Río Topo están protegidas por el Parque Nacional Llanganates; es por esto, que la mayor parte de la cuenca del Río Topo se encuentra en un margen natural, los materiales con el cual nace la cuenca han evolucionado de las formaciones Tena, Napo y Hollín (Rivadeneira & Anderson, 2010). La cuenca del Río Topo pertenece al sistema hídrico amazónico con una longitud aproximada de 45 km (figura 2 y 3).

Figura 2. Mapa de localización de la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

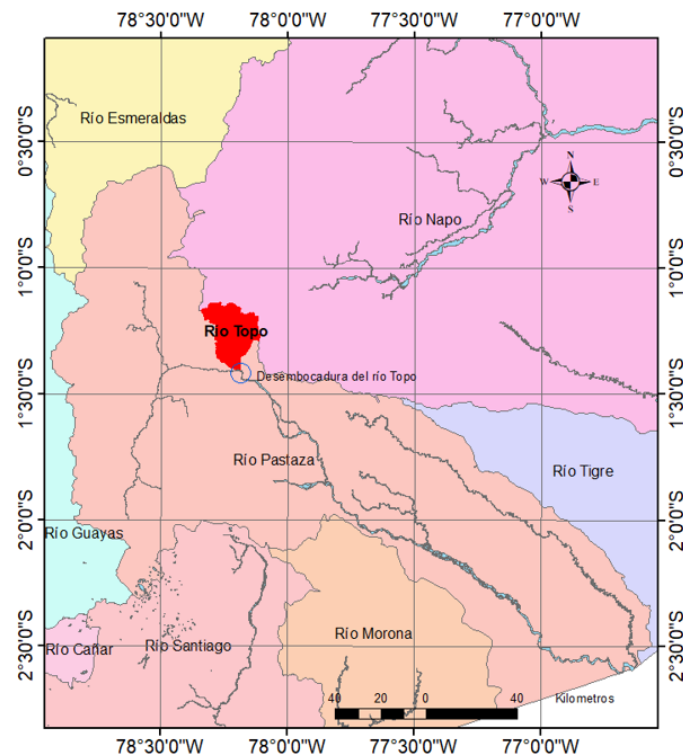
Figura 3. Ubicación de la cuenca del Río Topo con el parque nacional Llanganates



Fuente: (Ayala & León, 2009)

En la (figura 4), se observa que la cuenca del Río Topo es una subcuenca de la cuenca del Río Pastaza, la cual constituye un 2% de superficie que aporta a la cuenca del Río Pastaza; se encuentra limitando al norte con la cuenca del Río Napo.

Figura 4. Ubicación de la cuenca del Río Topo en su sistema hidrográfico

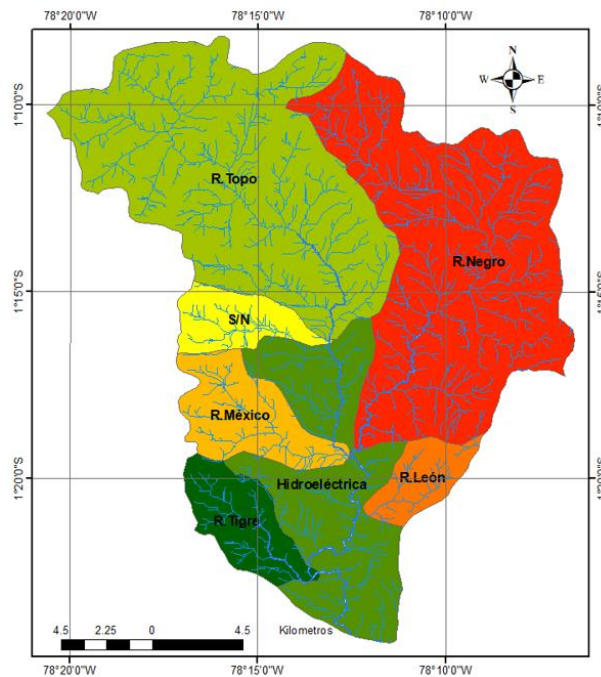


Fuente: Del autor.

Los componentes morfométricos presentes en la cuenca del Río Topo según Veintimilla (2015), son:

- Relieves colinados; localizados a orillas del Río Topo, presentan una geometría redondeada, altura de 200 m y pendientes entre 25% a 50%, son colinas altas.
- Paisaje de terrazas; ubicado en el cauce del Río Topo, geometría plana y ondulada, tiende a presentar pendientes < 5%.
- Zonas de escarpes y quebradas; ubicados en los declives en dirección al Río Topo, pendientes no mayores al 70%.

A continuación, (figura 5) y (tabla 1), se visualiza que la cuenca de estudio está influenciada por seis microcuencas; de las cuales, la microcuenca del Río Topo y Río Negro representan el 66% de la cuenca del Río Topo; conjuntamente las microcuencas: Río México, Río León y Río Tigre, cada una representa una superficie menor al 10% de la cuenca. El mayor aporte hídrico superficial está dominado por los aportes de las subcuencas (Río Negro y Río Topo); a su vez, estas dos subcuencas son las que mayor importancia de alimentación a los acuíferos que se podría presentar.

Figura 5. Delimitación de las microcuencas pertenecientes a la cuenca del Río Topo

Fuente: Del autor.

Tabla 1. Áreas totales de las microcuencas que conforman la cuenca del Río Topo

Microcuencas	Área (km ²)
R. Topo	147
S/N	16.2
R. México	28
R. Negro	144.8
R. León	13.6
R. Tigre	22.0
Hidroeléctrica	69.7

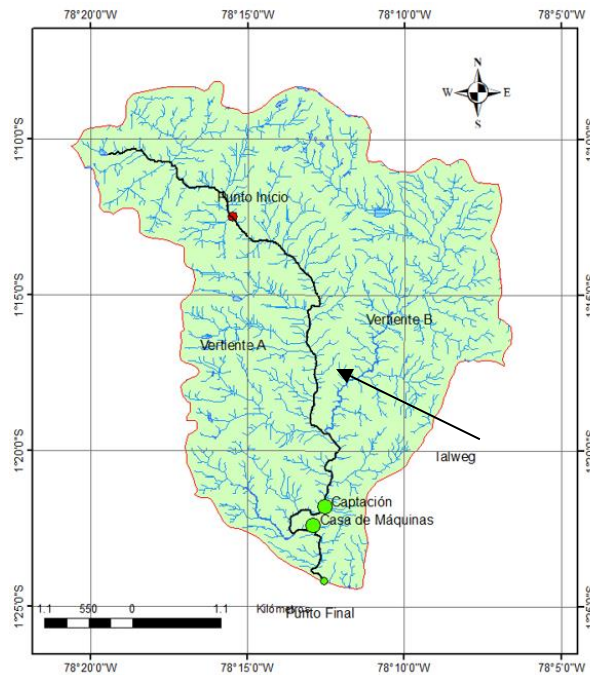
Fuente: Del autor.

Los elementos de una cuenca están en función al río principal y se puede establecer relaciones geomorfológicas; estos elementos según Reyes et al., (2014) son:

- Talweg: línea que contrasta la zona más profunda de un río y es la región por donde transita el río; se relaciona con el perfil transversal del río.
- Vertientes: son áreas que recolectan el agua a los lados del talweg.

Se localizan dos vertientes en la cuenca de estudio, una en la parte oeste y la segunda en la parte este, la vertiente B (este) influye más en el drenaje de la cuenca de estudio (figura 6).

Figura 6. Representación del cauce principal y vertientes de la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

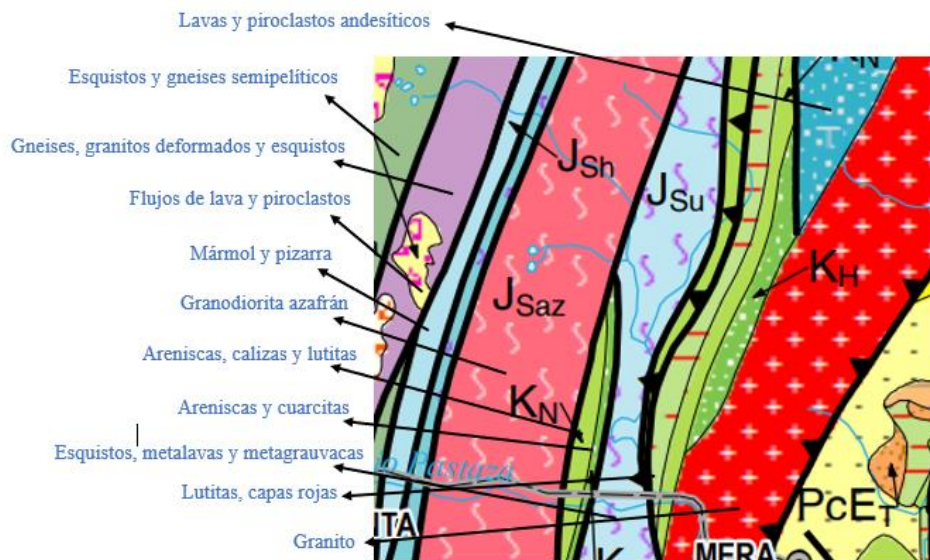
Reseña Geológica

Como la cuenca del Río Topo se encuentra protegida por el Parque Nacional de los Llanganates en dirección noreste; Veintimilla (2015), recalca que la cuenca está conformada por materiales metamórficos y por tres unidades litológicas: Alao, Loja y Salado, donde sosiegan sedimentos Mio-Plicocénicos y el tipo de rocas que representa a la cuenca son: meta-volcánica, meta-sedimentos e intrusivos metamorizados.

En cuanto a la geología, el mismo autor señala que el área de la cuenca, engloba depósitos aluviales que forman terrazas altas, conformados por rocas graníticas y metamórficas, grava y arena limosa, se encuentran también depósitos laharíticos, formados por cantos y gravas, de permeabilidad media a baja, cubiertos por un suelo limo arcilloso plástico. Se da la presencia de cierta actividad volcánica en la región, especialmente debido al volcán Cotopaxi y Tungurahua situado al este de la cuenca y según Arumí et al. (2012), la actividad volcánica provoca la deposición de materiales como lahares, piroclastos y cenizas; estos materiales contribuyen a la formación de un suelo con una capa impermeable y también dan lugar a la existencia de acuíferos con niveles de agua freática relativamente cercanos a la superficie; es decir, a poca profundidad. Hace unos 30 millones de años, la actividad volcánica en la región de los Llanganates finalizó, pero sigue presente hasta hoy en volcanes cercanos como Cotopaxi y Tungurahua; durante las erupciones, se depositaron gruesas capas de cenizas en la zona de los Llanganates (Vargas et al., 2000).

En la (figura 7), se muestra el sistema geológico que constituye la cuenca del Río Topo, cabe mencionar que las calizas y lutitas indican una permeabilidad reducida, lo que disminuye la transferencia vertical de agua favoreciendo el caudal superficial (Veintimilla, 2015). En adición, un suelo granítico provoca que el agua fluya de mejor manera, esto tiende al aumento rápido del caudal cuando hay época de lluvias (Maila et al., 2017).

Figura 7. Mapa geológico de la cuenca del Río Topo



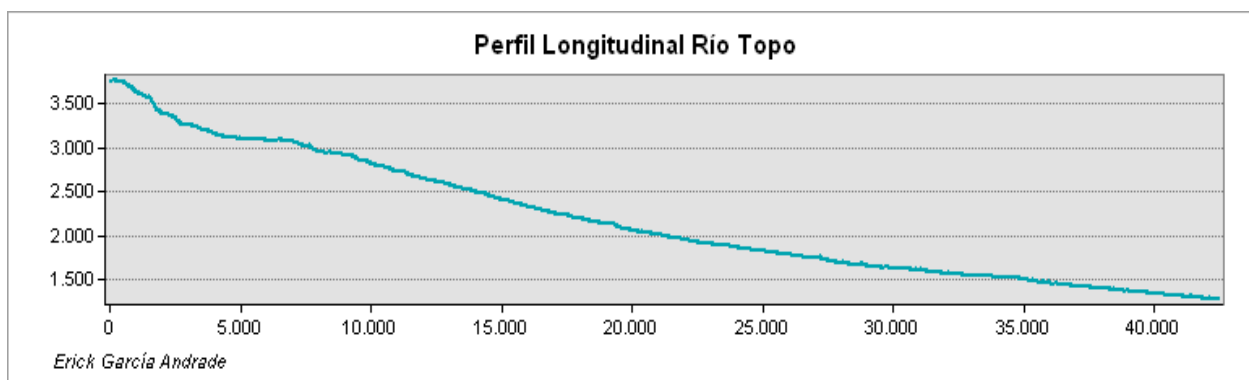
Fuente: Mapa geológico de la República del Ecuador (2017)

Elaboración de Perfiles

Perfil Longitudinal

Representa el flujo del Río Topo desde su nacimiento hasta su desembocadura; a lo largo del perfil longitudinal se pueden conocer los cursos superior, medio e inferior (Universidad Católica de Chile, s.f.).

En la (figura 8), se puede ver el perfil longitudinal del Río Topo, que nace en la cota más alta aproximado a los 3700 msnm, se extiende a una longitud aproximada a los 45 km hasta su desembocadura, donde se une con el Río Pastaza a los 1291 msnm.

Figura 8. Perfil longitudinal del Río principal

Fuente: Del autor.

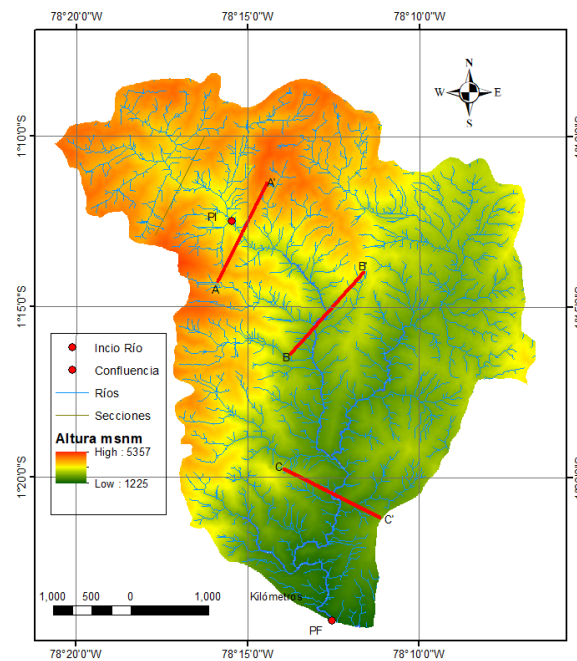
Cabe mencionar, que las características de la cuenca dados en las curvas hipsométricas y en el perfil longitudinal del río principal, son de suma importancia para poder zonificar la cuenca (zona alta, media y baja).

Perfil Transversal

En las siguientes (figuras 9, 10, 11 y 12) se puede observar los perfiles transversales de la cuenca del Río Topo donde se destaca un relieve de altas pendientes generado por sus dos vertientes (A y B). Los tres perfiles transversales desarrollados se distribuyeron de la siguiente manera: el perfil AA' ubicado en las cabeceras, el perfil BB' ubicado en la parte media y el perfil CC' en la parte baja de la cuenca. A partir del análisis de la (figura 9) se logra desarrollar los perfiles transversales (figuras 10, 11 y 12).

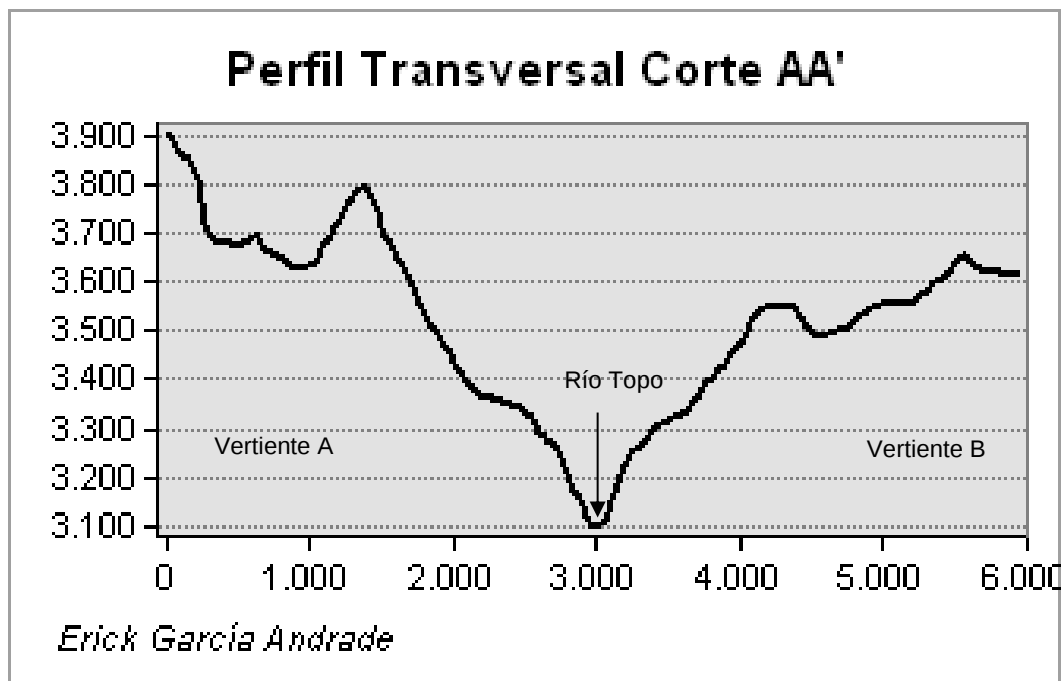
En los perfiles transversales donde se ubican los puntos azules, indican los lugares donde circulan los ríos que comprende la red de drenaje de la cuenca.

Figura 9. Vista en planta de los perfiles transversales



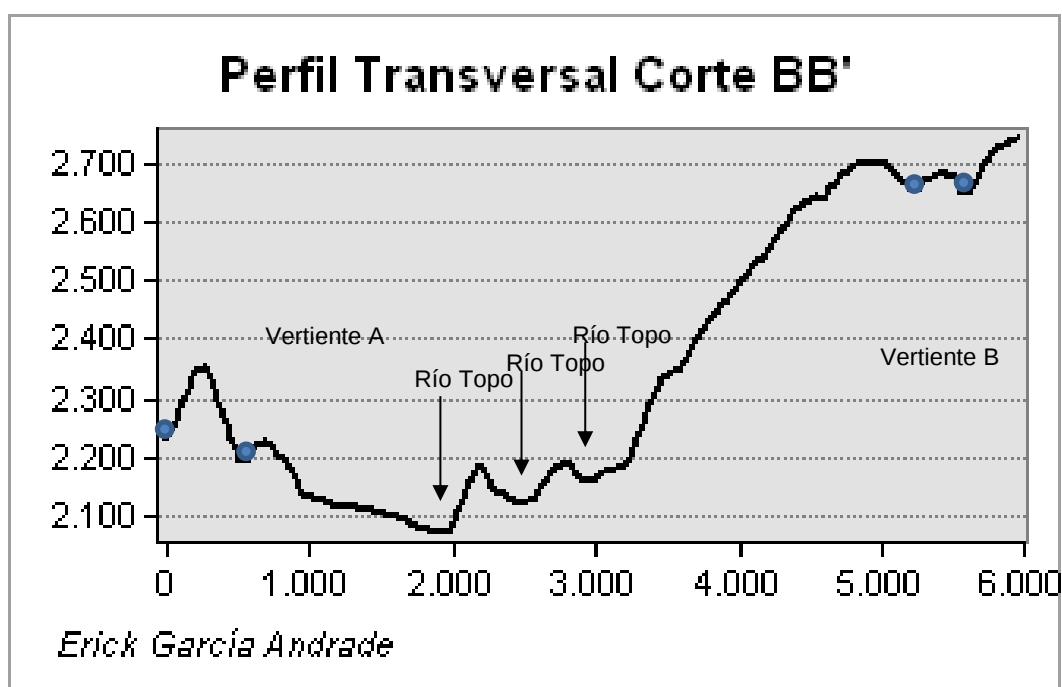
Fuente: Del autor.

Figura 10. Perfil transversal del Río Topo (AA')



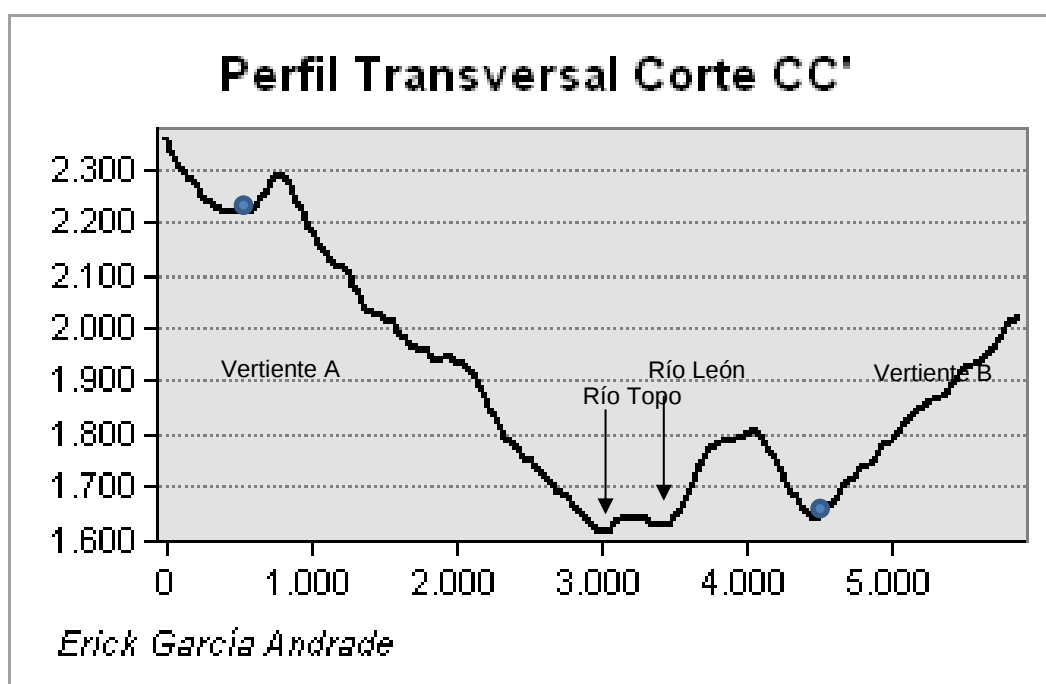
Fuente: Del autor.

Figura 11. Perfil transversal del Río Topo (BB')



Fuente: Del autor.

Figura 12. Perfil transversal del Río Topo (CC')



Fuente: Del autor.

Suelos y Usos del Suelo

La taxonomía de los suelos que predominan en la cuenca son Inceptisoles (tabla 2 y figura 13). Se considera que la humedad del suelo en esta parte del Ecuador es sin déficit según el INAMHI. (La humedad del suelo a nivel nacional se refleja en el Anexo A).

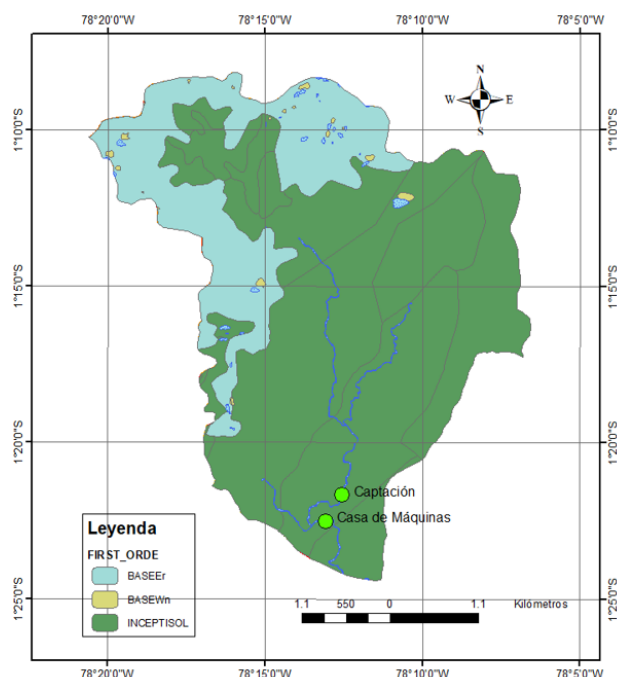
Según Ayala & León (2009), los suelos de la parte de la cordillera (cordillera de los Llanganates) donde nace el Río Topo son graníticos (discrepancia de los del resto de los Andes, que son volcánicos), por lo que no retienen agua y permiten que, en un área lluviosa, el agua rápidamente escurre hacia el río, el cual tiende a crecer y con igual rapidez el río llega a su dinámica original. Los suelos graníticos son rocas plutónicas de textura gruesa, abarcan una porosidad y permeabilidad baja, pero si se encuentra fisurado logra la infiltración del agua (Vidal, 1998). Sin embargo, las rocas graníticas retienen un 16% de agua en base a la investigación de Novák & Surda (2010).

Tabla 2. Taxonomía del suelo en la cuenca del Río Topo

Unidad	Superficie (%)
Inceptisol	74.35
Sin Clasificar	25.65
Total	100

Fuente: Del autor.

Figura 13. Taxonomía de suelo, cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

Por otra parte, según Aguirre et al. (2020), los bosques premontanos húmedos se desarrollan entre (700 – 1400) msnm (18 – 24) °C y los bosques montanos húmedos se desarrollan entre (2400 – 3700) msnm (6 – 12) °C. La cuenca del Río Topo se extiende desde los 1291 a 4809 msnm; por ende, la vegetación abundante en la cuenca del Río Topo es de bosque húmedo premontano y montano. Desde los 3000 msnm hasta los 4809 msnm se desarrolla la vegetación característica de los páramos; ya que, según Chuncho (2019), los páramos se

desarrollan entre los 3000 a 3500 msnm (subpáramo) y entre 4500 a 5000 msnm (superpáramo).

En la siguiente (tabla 3), se da a conocer el uso de suelo de cada una de las microcuencas que conforman la cuenca del Río Topo, a su vez el porcentaje de suelo protegido que tiene cada una de estas. Las microcuencas que se localizan al norte de la cuenca son las que tienen una mayor área de suelo protegido a comparación de las microcuencas ubicadas en la parte sur.

Tabla 3. Características morfométricas y uso del suelo de las microcuencas definidas

Microcuenca	Tamaño	Forma	Uso del suelo	% Suelo protegido
Río Topo	Pequeño	Ovalada	Bosques, vegetación arbustiva,	100
Río Negro	Pequeño	Oblonga	Bosques	74.34
S/N	Muy pequeño	Ovalada	Bosques, vegetación	100
Río México	Pequeño	Ovalada	Bosques	91.96
Río Tigre	Muy pequeño	Oval redonda	Área de bosques, vegetación herbácea y arbustiva, pastizales	88.3
Río León	Muy pequeño	Oval redonda	Bosque, vegetación arbustiva, pastizales	31.06
Hidroeléctrica	Pequeño	Rectangular oblonga	Bosques, cultivos, vegetación herbácea y arbustiva, pastizales	37.76

Fuente: Del autor.

Los cultivos y pastizales cubren un área muy pequeña (1.45%) y se distribuyen en la parte sur de la cuenca. De hecho, Benavides & Legarda (2001), recalcan que si hay presencia de zonas agrícolas es a causa de presentar un suelo que se ha desarrollado a causa de las cenizas volcánicas, con una buena fertilidad y logra tener un óptimo drenaje. El área no intervenida se encuentra en el parque nacional Llanganates; cabe mencionar que la vegetación secundaria (vegetación arbustiva y herbácea) se produce a causa de la agricultura desarrollada por el hombre; por ende, está asociado a las áreas agrícolas y pastizales de acuerdo a Galván & Márquez (2006), estas integran 0.11% de la cuenca. En adición la cuenca comprende cuatro localidades de los cuales integran un 0.004 % del total de la superficie de la cuenca. La cuenca es totalmente virgen, ya que presenta muy pocos asentamientos

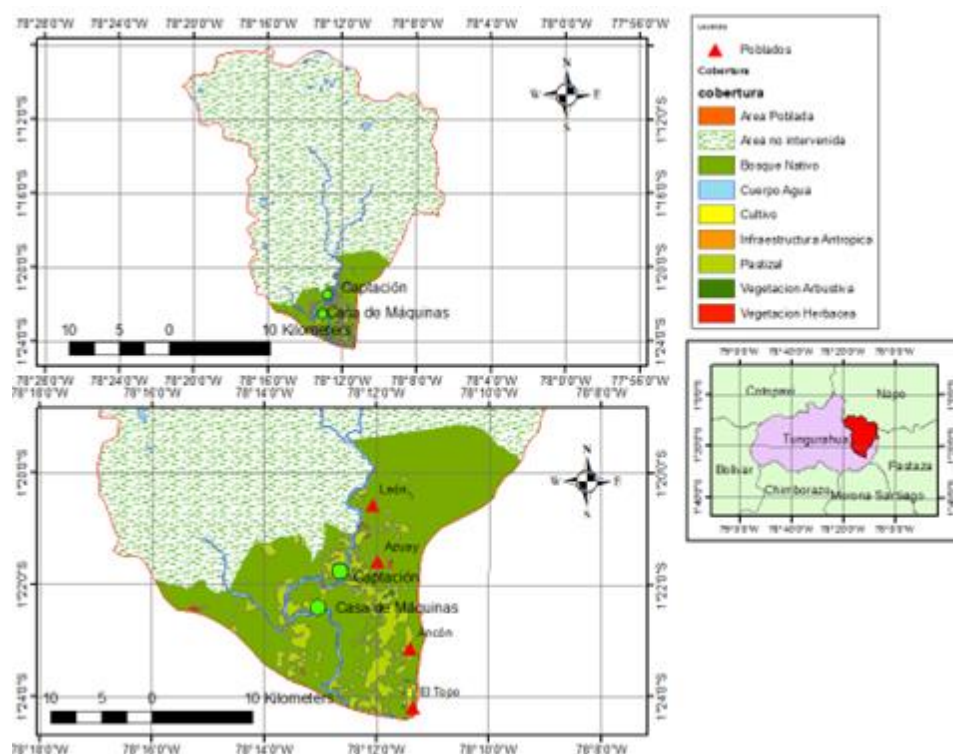
humanos (tabla 4 y figura 14). En la investigación de Blandón (2019) usando Soil and Water Assessment Tool (SWAT) resalta la producción hídrica en áreas cubiertas por pastizales.

Tabla 4. Variables biofísicas en la cuenca del Río Topo

Variable	Valor %
Área protegida	97.55
Proporción de Espejos de Agua en la Cuenca	0.88
Proporción de Centros Poblados en la Cuenca	0.004
Proporción de cultivos en la Cuenca	0.03
Proporción de vegetación herbácea y arbustiva en la Cuenca	0.11
Proporción de pastizales en la Cuenca	1.42
Proporción de infraestructura antrópica en la Cuenca	0.01

Fuente: Del autor.

Figura 14. Uso del suelo en la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

La vegetación que predominaría en las áreas altas son coberturas corresponde a los páramos ubicados al noreste de la cuenca (113.20 km²), mientras en las partes bajas de la cuenca (dirección sureste) como es un área templada hay cobertura de bosques, pastos y cultivos (328.12 km²), esta vegetación se desarrollaría sobre suelos volcánicos, de cenizas; este tipo de suelos son blandos limosos y arcillosos, también se observa afloramientos rocosos por la

erosión, como la cuenca en mayor parte consta de vegetación, estos suelos son bien estables según Burbano et al. (2016).

En la cuenca del Río Topo no existe degradación de la vegetación; por ende, no provoca el peligro de inundaciones. Burbano et al. (2016), indica que en cuencas donde existe mayor proporción de bosques hay una mejor oferta hídrica. En la siguiente (tabla 5), se muestra el porcentaje de uso potencial que se da al suelo en la cuenca; en donde se demuestra que la cuenca tiene su cobertura vegetal y suelos protegidos en un 78.3%.

Tabla 5. Uso potencial del suelo de la cuenca del Río Topo

Uso potencial	Área	
	km ²	%
Protección de cobertura vegetal existente	162.7	36.9
Ganadería extensiva; extensiva-semi-intensiva	96.1	21.7
Protección de cobertura vegetal/bosques de protección hacia la reforestación	182.5	41.4

Fuente: Del autor.

Según Hofstede et al. (2002), en la cordillera de los Llanganates hay la presencia de los páramos de pajonal con poca cantidad de materia orgánica, son páramos húmedos con presencia de pantanos, existe una gran variedad de lagunas y bofedales. Los páramos de pajonal se encuentran desde los 3000 msnm y los 4500 msnm (Izco et al., 2007), tiene arbustales y herbazales, presencia de bosques altoandinos (Romo & Calero, 2022). Los Llanganates al pertenecer a ecosistemas de páramos pueden tener la presencia de suelos andisoles (entre los 3000 a 4809) msnm, ricos en materia orgánica; estos suelos presentan escenarios climáticos de alta humedad, tienden a retener entre el 80 al 90% por cm³ de agua; el suelo orgánico ayuda a la filtración, captación y regulación del agua (Paredes & Sánchez, 2020); sin embargo, existe discrepancia con los planteado por Ayala & León (2009), donde recalca que los suelos de la parte de los Llanganates donde nace el Río Topo son graníticos. A su vez Vargas et al. (2000), indica que los Llanganates no tienen estación seca, su precipitación anual es la más alta en su zona oriental y se reducen hacia el occidente; indica también que sus suelos son volcánicos (porosos) y lacustres, presencia de bosques montano alto y bajo. Por otra parte, en las lagunas de anteojos en los Llanganates se da la presencia de suelos inceptisoles según Jácome & Reinoso (2023); por lo que se puede asumir que las lagunas que se localizan en la cuenca del Río Topo en los Llanganates tienen este tipo de taxonomía del suelo.

En este estudio, se recalca que en los páramos de los Llanganates donde forma parte la cuenca del Río Topo no se ha comprobado la existencia de suelos andisoles por medio de

bibliografía y cartografía consultada. Por otro lado, según Arumí et al. (2012) y por medio de consultas al personal técnico de ECUAGESA la cuenca del Río Topo en la zona baja presenta una textura de suelo limo arcilloso.

CAPÍTULO IV

Materiales y Métodos

Caracterización Morfométrica de la Cuenca del Río Topo

Fuente de Datos para las Mediciones Morfométricas

Guerra & González (2002), indican que la fuente de datos proviene de mapas con buenas resoluciones, escalas y actualizadas, hojas cartográficas y fotografías aéreas con una amplia información hidrográfica y topográfica; en función de las fotografías aéreas se puede visualizar las redes de drenaje, dependiendo de la cobertura vegetal y porcentaje de nubosidad.

En esta investigación, las características morfométricas se analizaron gracias a imágenes satelitales, georeferenciadas en coordenadas (WGS84 - UTM 17S). Para el estudio morfométrico se inició con la obtención de un Modelo Digital de Elevación (DEM) otorgado por la empresa hidroeléctrica ECUAGESA. Los resultados de las características morfométricas con el análisis en SIG ayudaron a procesar la cartografía temática que describe la morfometría de la cuenca hidrográfica del Río Topo.

Métodos para las Mediciones Morfométricas

Por medio del programa ArcGIS, se identificaron las medidas básicas para luego determinar los demás parámetros morfométricos de la cuenca y generar una mejor caracterización. La generación de las medidas básicas está en función de: área, longitud y latitud. Para determinar la pendiente media se generó un mapa topográfico por medio del SIG. A través del Modelo Digital de Elevación (DEM) se construyó un mapa de pendientes en función de la información de la (tabla 6), donde se representan los distintos tipos de pendientes en una cuenca.

Tabla 6. Pendientes medias de una cuenca

Pendiente media de la cuenca						
CLASE	PENDIENTE (%)	PENDIENTE (grados de inclinación)	RELIEVE	GRAFICO	COLOR	RIESGO
1	0 - 5 %	0° - 2.9°	Plano		Amarillo	Muy bajo
2	5 - 12 %	2.9° - 6.84°	Ligeramente ondulado		Naranja	Bajo
3	12 - 25 %	6.84° - 14.04°	Ondulado		Verde	Medio
4	25 - 50 %	14.04° - 26.57°	Montañoso		Azul	Medio
5	50 - 70 %	26.57° - 34.99°	Muy montañoso		Lila	Alto
6	> 70 %	> 34.99°	Escarpado		Rojo	Muy alto

Luego, para la determinación de la red de drenaje, se fijaron valores numéricos a los ríos que contribuyen a la red de drenaje; entonces, 1 (ríos nacientes), 2 (unión de ríos de orden 1), 3 (unión de dos ríos de orden 2) y así sucesivamente hasta llegar al punto final de la cuenca. En el río principal es donde se obtiene la máxima ponderación de orden de los ríos. Por otra parte, para ponderar el área de aporte en los ríos nacientes de orden 1 se determinó a partir de una muestra de 100 ríos nacientes pertenecientes a la cuenca, en donde se tiene como resultado un área de aporte aproximado de 0.63 km².

Los demás parámetros morfométricos se determinaron por medio de fórmulas matemáticas indicadas en el capítulo 2, a través del programa de Excel.

Caracterización Hidrometeorológica de la Cuenca del Río Topo

Caracterización y Análisis de los Elementos del Ciclo Hidrológico

Para el procesamiento de información, se usaron softwares como: Matlab, Excel, Colab y ArcGIS. Es de suma importancia generar un control de calidad de la información hidrometeorológica, se debe inspeccionar visualmente e identificar datos atípicos o vacíos, como un paso previo al análisis y caracterización hidrometeorológica, también se debe generar una prueba de homogeneidad con el fin de visualizar ciertos cambios de información debido a los sensores u otras amenazas que repercute la calidad de los datos (Cardona et al., 2014).

Para esta investigación, la información recopilada y analizada se encuentra en periodos de cinco minutos para las variables (precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, presión atmosférica), tomados de una sola estación M01, ubicada en la zona baja de la cuenca, la estación se localiza en las coordenadas: (latitud: -1.36907715 - longitud: -78.21445697 – altura: 1576 msnm). Las series temporales de caudales están registradas cada quince minutos (tomados en la cota 1520 msnm – área de captación); por

tal motivo, el análisis de los datos climáticos para el cálculo del balance hídrico se dio en la serie temporal (1-enero-2021 al 31-agosto-2022) cada quince minutos. En el área de la cuenca del Río Topo, no se encuentran estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca que cumplan con la serie temporal cada quince minutos; por lo que, ante esta situación, se ha intentado dar una mejor interpretación en cuanto a la información disponible.

Los registros de la estación M01 no presentaron datos atípicos o vacíos, pero con el fin de validar esos registros se realizaron pruebas de regresiones lineales y curvas de doble masa para datos como precipitación, temperatura, humedad relativa de manera mensual, comparando con registros mensuales de estaciones vecinas (información otorgada por la hidroeléctrica ECUAGESA). Por otro lado, se observó datos faltantes y atípicos en las mediciones de caudal para los años de estudio (2021 – 2022); por lo que a través de una macro y con datos históricos de caudales cada quince minutos en la cota (1520 – área de captación) de tres años atrás (2016, 2017 y 2018) se rellenó y validó esta información. Se recalca que la empresa ECUAGESA no cuenta con estaciones que registren los caudales. *(La información climática de las estaciones vecinas a la cuenca del Topo se encuentra en los anexos B1 al B5).*

Para las cartografías de isoyetas e isotermas, se usaron estaciones que se encuentran en las cercanías de la cuenca a fin de conocer las características climáticas a lo largo y ancho de toda la cuenca, estas estaciones disponen de información climática de precipitación y temperatura a escala mensual (tabla 7, tabla 8 y figura 15).

Tabla 7. Estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca del Río Topo

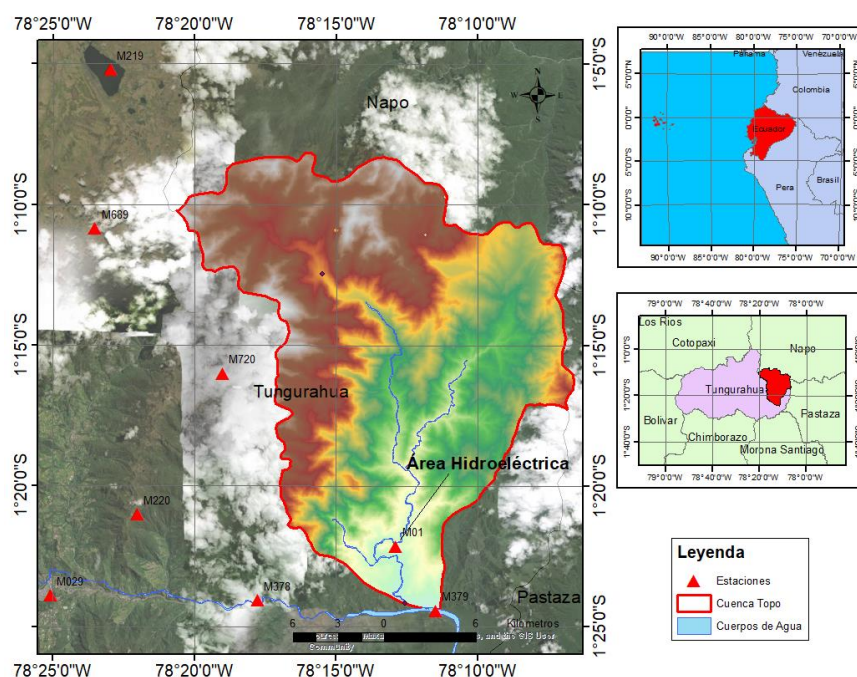
Código	Nombre	Tipo	Longitud W	Latitud S	Elevacion msnm	Fecha Instalacion	Información hasta
689	Páramos de Jaramillo (Muyo)	PM	78 23 30	01 10 51	3880	1979	1986
029	Baños (Pastaza)	MET	78 25 04	01 23 54	1843	1917	
220	Presa Agoyán	MET	78 22 00	01 21 00	1648	1982	
378	Rio Verde	PM	78 17 44	01 24 04	1485	1964	
720	Rio Verde Medio	PG	78 19 00	01 16 00	2220	1982	1987
	Rio Verde Superior	PG			2620	1988	1990
219	Pisayambo Presa	MET	78 22 58	01 05 12	3560	1974	
379	Topo	PG	78 11 27	01 24 26	1284	1964	

Fuente: Hidroeléctrica ECUAGESA.

Tabla 8. Estaciones con registros de temperatura cercanas a la cuenca del Río Topo

Estación	Código	Tipo	Altitud (msnm)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Máxima Abs. (°C)	Temperatura Mínima Abs. (°C)
BAÑOS	M029	CP	1846	18	30.5	5
TENA	M070	CO	665	23.7	34.6	13.7
AGOYAN EN LA PRESA	M220	CP	1648	17.9	29.8	8
PUYO	M008	AP	960	21.1	32.6	8.6

Fuente: Hidroeléctrica ECUAGESA.

Figura 15. Mapa de localización de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca

Fuente: Del autor.

Evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración se usó la ecuación de la FAO Penman-Monteith, porque emplea varios parámetros de análisis y es más precisa. Cabe recalcar, que el valor de la velocidad del viento, en la estación M01, el sensor se localiza a 10 m de altura; por tal motivo, la FAO recomienda llevar esta información a una velocidad de 2 m de altura; además, la ecuación empleada está en función horaria, ya que la FAO recomienda esta ecuación en periodos de tiempo sub-diarios (escala de quince minutos en esta investigación).

La evapotranspiración determinada por la ecuación de la FAO es la evapotranspiración de referencia; por lo tanto, se determinó el coeficiente de cultivo (K_c) con el fin de relacionar esta evapotranspiración de referencia con los diferentes tipos de cultivos en la cuenca del Río Topo. Como en esta investigación se dispone de información climática solo de la estación

M01, se da la limitación espacial de la evapotranspiración real en la cuenca, así como los demás parámetros hidrometeorológicos. Para determinar la evapotranspiración real se calculó un coeficiente de cultivo (Kc), que según la FAO el Kc representa las diferentes características físicas y fisiológicas de cada cultivo.

Evapotranspiración de referencia (Eto)

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^\circ(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)}$$

Donde:

- ETo: evapotranspiración de referencia (mm hora⁻¹).
- Rn: radiación neta en la superficie (MJ m⁻² hora⁻¹).

Radiación neta en la superficie (Rn)

$$Rn = Rns - Rnl$$

Radiación neta solar o de onda corta (Rns)

$$Rns = (1 - \alpha)Rs$$

- Rns: radiación neta solar o de onda corta [MJ m⁻² día⁻¹].
- α : albedo o coeficiente de reflexión del cultivo: 0,23 para el cultivo hipotético de referencia.
- Rs: radiación solar entrante [MJ m⁻² día⁻¹].

Radiación neta de onda larga (Rnl)

$$Rnl = \sigma T_{hr}^4 K^4 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{Rs}{Rso} 0.35 \right)$$

- $\sigma = 2.043 \cdot 10^{-10}$ MJ m⁻² hora⁻¹. Constante de Stefan-Boltzmann.
- Rnl: Radiación neta de onda larga [MJ m⁻² hora⁻¹]

Radiación en un día despejado (Rso)

$$Rso = \left[0.75 + \frac{2 \cdot 10^{-5}(z)}{100\,000} \right] Ra$$

- z: elevación de la estación sobre el nivel del mar [m].
- Rso: radiación en un día despejado [MJ m⁻² hora⁻¹]
- G: flujo del calor del suelo (MJ m⁻² hora⁻¹).
 - Para periodos diurnos

Flujo del calor del suelo para períodos diurnos horarios o más cortos (Ghr)

$$Ghr = 0.1Rn$$

- Para periodos nocturnos

Flujo del calor del suelo para períodos nocturnos horarios o más cortos (Ghr)

$$Ghr = 0.5Rn$$

- Thr: temperatura media del aire (°C).
- u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}).

Velocidad del viento a 2 m de altura (u_2)

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)}$$

- e_a : presión real de vapor (kPa).

Presión real de vapor (e_a)

$$e_a = e^\circ(T_{hr}) \frac{HR_{hr}}{100}$$

- HRhr: promedio horario de la humedad relativa [%].
- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor en Thr ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Pendiente de la curva de presión de vapor (Δ)

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

- T: temperatura del aire [°C].
- γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Constante psicrométrica (γ)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda}$$

- P: presión atmosférica [kPa].
- λ : calor latente de vaporización, $2.45 \text{ [MJ kg}^{-1}\text{]}$.
- C_p : calor específico a presión constante, $1.013 \times 10^{-3} \text{ [MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$.
- ε : cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0.622.
- $e^\circ(Thr)$: presión de saturación de vapor a temperatura del aire Thr (kPa).

Presión de saturación de vapor a temperatura del aire (e°)

$$e^\circ(T) = 0.6108 * \exp\left[\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right]$$

- T: temperatura del aire [°C].
- Radiación extraterrestre

Radiación extraterrestre (R_a)

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} \cdot d_r \cdot [(\omega_2 - \omega_1) \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)]$$

- R_a : radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ hora}^{-1}$].
- G_{sc} : constante solar = $0.082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$.
- d_r : distancia relativa inversa Tierra-Sol.
- φ : latitud [rad].

- δ : declinación solar [rad].
- ω_1 : ángulo de radiación al inicio del periodo [rad].
- ω_2 : ángulo de radiación al final del periodo [rad].

Distancia relativa inversa Tierra-Sol (d_r)

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J\right)$$

- J: número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

Declinación solar (δ)

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} \cdot J - 1.39\right)$$

Ángulo de radiación al inicio del periodo (ω_1)

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi \cdot t_1}{24}$$

Ángulo de radiación al final del periodo (ω_2)

$$\omega_2 = \omega - \frac{\pi \cdot t_1}{24}$$

- ω : ángulo solar en el momento en que ocurre el punto medio del periodo considerado [rad].
- t_1 : duración del periodo considerado [horas]: 1 para periodos horarios y 0,5 para períodos de 30 minutos.

Ángulo solar en el momento en que ocurre el punto medio del periodo considerado (ω)

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(Lz - Lm) + Sc) - 12]$$

- t: hora estándar en el punto medio del periodo considerado [hora].
- Lz: longitud del centro de la zona de tiempo local [grados oeste de Greenwich]: Lz = 75, 90, 105 y 120° para las zonas horarias Este, Central, Rocky Mountain y Pacífico en los Estados Unidos.
- Lm: longitud de la zona de medición [grados oeste de Greenwich].
- Sc: corrección estacional para el tiempo solar [horas].

Corrección estacional para el tiempo solar (Sc)

$$Sc = 0.1645 \cdot \sin(2 \cdot b) - 0.1255 \cdot \cos b - 0.025 \cdot \sin b$$

$$b = \frac{2 \cdot \pi(J - 81)}{364}$$

Evapotranspiración real (ET)

$$ET = ETo * Kc$$

Donde:

- ETo: Evapotranspiración de referencia [mm].
- Kc: Coeficiente de cultivo [adimensional].

El cálculo del Kc se realizó por medio de imágenes satelitales a través del NDVI propuesto por Cuesta et al. (2005); en donde, se empleó las ecuaciones para la fase inicial, desarrollo, media y final de la vegetación; por medio de este método se obtuvo un Kc promedio que representa a toda el área de la cuenca del Río Topo.

El NDVI es un indicador utilizado para evaluar la cantidad, calidad y crecimiento de la vegetación, se obtiene mediante la medición o a través de sensores remotos generalmente instalados en una plataforma espacial, a causa de la intensidad de la radiación en ciertas bandas del espectro electromagnético emitidas o reflejadas por la vegetación; en términos más simples, el NDVI nos muestra el nivel de verdor y la densidad de la vegetación que se puede captar en una imagen satelital (Piscoya, 2019).

Coeficiente de cultivo para la fase inicial, desarrollo y media (Kc)

$$Kc = 1.25 * NDVI + 0.2$$

Coeficiente de cultivo para la fase final (Kc)

$$Kc = 1.5625 * NDVI - 0.05$$

Balance Hídrico

Para generar la base de datos que permitirá el cálculo del balance hídrico es importante contar, procesar y georeferenciar la información disponible en la cuenca de interés. La fórmula general que utiliza es la siguiente:

$$Captación - Evapotranspiración = Escorrentía superficial + Infiltración$$

Para el balance hídrico en la cuenca del Río Topo, se calculó por medio de la siguiente fórmula según Velásquez & Poveda (2019), que cumple con la fórmula de Lvovitch (1959).

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - AET(t) - R(t)$$

Donde:

- S(t): Almacenamiento de agua en la cuenca en función del tiempo (suelo, cobertura vegetal, acuíferos, lagos naturales o artificiales, entre otros) [mm].
- P(t): Precipitación en función del tiempo [mm].
- AET(t): Evapotranspiración real de la cuenca en función del tiempo [mm].
- R(t): Escorrentía superficial a la salida de la cuenca en función del tiempo [mm].

Se estimó el balance hídrico con datos de una sola estación meteorológica (M01) que presenta los datos climáticos; por otra parte, los datos de caudales fueron tomados en la cota

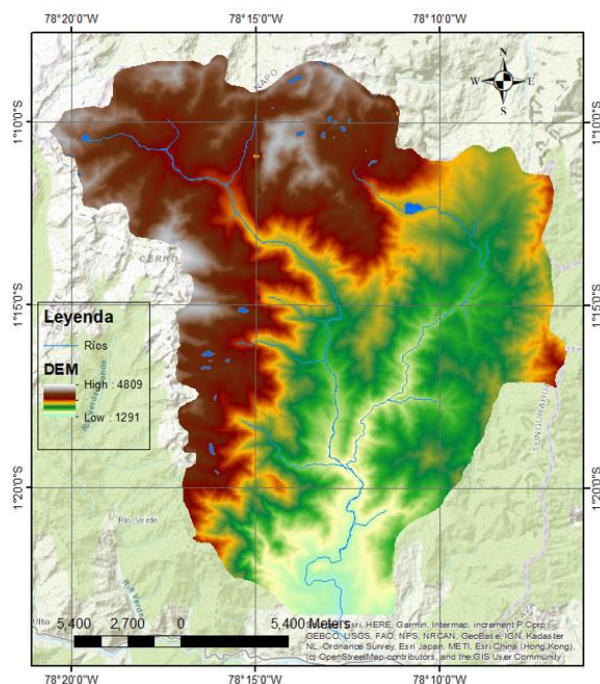
1520 msnm de la cuenca. Los datos (precipitación, temperatura, humedad relativa y caudal) previamente fueron analizados y validados por los métodos de regresión lineal y curvas de doble masa de manera mensual. Se empleó la evapotranspiración real calculada por el método de la FAO (Penman Monteith) y mediciones in situ de precipitación y escurrimiento durante el periodo de análisis (01/enero/2021 al 31/agosto/2022) en un lapso de tiempo de quince minutos. El área de estudio para el balance hídrico se realizó hasta el punto donde se han determinado los caudales de la cuenca (captación, cota 1520 msnm), la cual registra un área igual a 370.24 km².

Modelo SWAT

Datos de Entrada para el Modelo SWAT

El modelo se implantó en el software ArcGIS con una extensión denominada ArcSWAT. Se ingresaron datos al modelo como la pendiente, uso del suelo y tipo de suelo; así como también, los parámetros climáticos de la estación M01 de la empresa hidroeléctrica ECUAGESA (enero 2021- agosto 2022). Los datos climáticos ingresados en el modelo SWAT fueron a escala diaria y debidamente validados. El DEM (figura 16) para el modelo se extrajo de la página web EARTH DATA del satélite Alos Palsar. *(En el anexo C se muestra el formato ráster para la descarga del DEM)*. SWAT recomienda, por lo menos, tener un periodo de calentamiento de dos años en la simulación; en esta investigación no se dispuso del periodo de calentamiento, ya que se solo se disponía de datos de la estación M01 y no se lograba contar con datos hidrometeorológicos históricos a escala diaria de otras estaciones.

El modelo emplea el Número de Curva (NC) del Soil Conservation Service (SCS); en función de los parámetros como la precipitación y los datos de NC que se obtiene a partir del uso y tipo de suelo, se modela la escorrentía de una cuenca; para la evapotranspiración emplea la fórmula de Penman Monteith (Gomariz & Alonso, 2018).

Figura 16. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la cuenca del Río Topo

Fuente: Del autor.

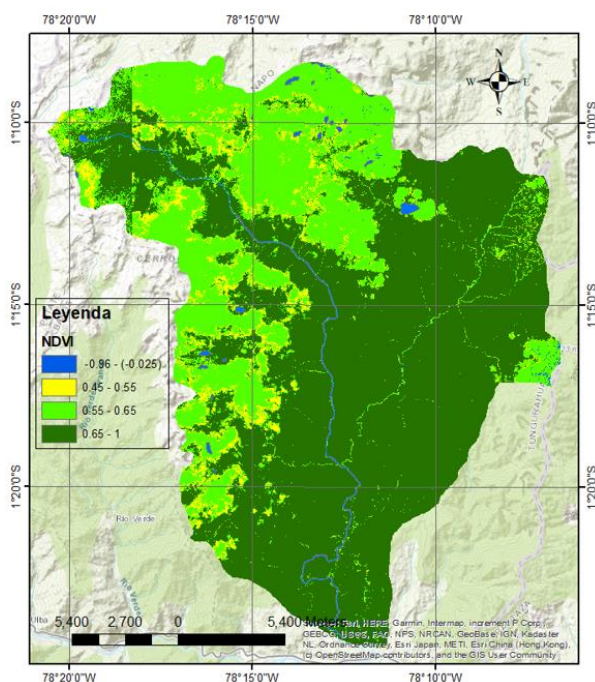
El uso del suelo se evaluó a partir del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) de la cuenca. El ráster para el NDVI se obtuvo de la página web Land Viewer, esta información fue obtenida del satélite Sentinel 2 del 8 de septiembre del 2022 con un porcentaje de nubosidad del 20 %. En base a Mejía et al. (2021), se clasificó el uso del suelo en función del NDVI del área de la cuenca a través de las siguientes categorías (tabla 9) (*En el anexo D se muestran Descarga del formato ráster para la determinación de los NDVI*).

Tabla 9. Clasificación NDVI

CATEGORÍA	RANGO	TIPO	DESCRIPCIÓN
1	-n - 0,2	Sin vegetación, agua, sombras	Gran parte de estos suelos corresponden principalmente a zonas oscuras y vinculadas a ríos
2	0,2 - 0,45	Suelo sin cobertura o escasa vegetación	Se ha visto que esto suelo coincide con las áreas urbanas
3	0,45 - 0,55	Vegetación escasa	Gran parte de estos suelos corresponden a suelos en procesos de transformación, pastizales
4	0,55 - 0,65	Vegetación dispersa	Suelos vinculados con actividades agrícolas y vegetación arbustiva y herbácea
5	0,65 - 1	Bosque	Suelo con abundante vegetación arbustiva

Fuente: (Mejía et al., 2021)

Luego, se obtuvo el aspecto físico de la cobertura vegetal de la cuenca en función de los NDVI que presenta la cuenca del Río Topo como se muestra en la siguiente (figura 17), donde el coeficiente de 0.65 – 1 (bosque) es el más representativo de la cuenca.

Figura 17. Clasificación NDVI en la cuenca del Río Topo

Fuente: Del autor.

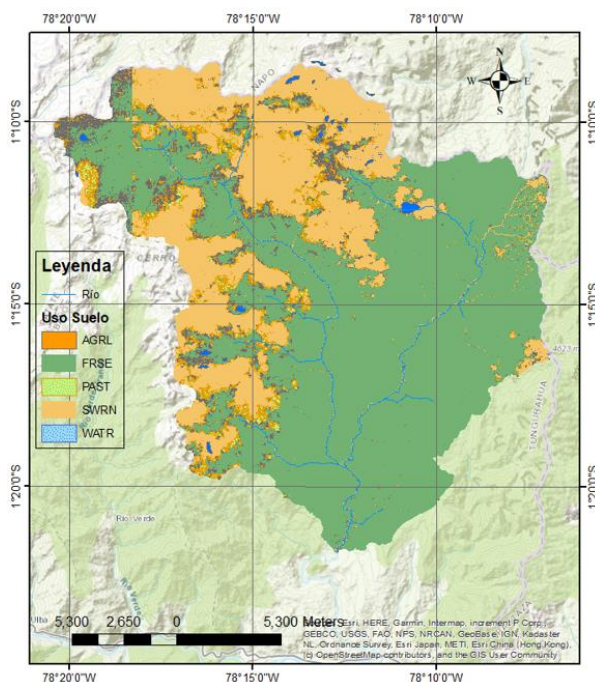
A raíz del procesamiento de información por medio de los NDVI; la información del uso del suelo para el modelo SWAT fue clasificada tomando en consideración la tabla A-2 del Apéndice A del SWAT (2012); las categorías de uso del suelo para el modelo fueron las siguientes (tabla 10 y figura 18). El bosque siempre verde domina la mayor cantidad de área en la cuenca, seguido por la cadena montañosa de los Andes (*En el anexo E, se muestra el apéndice A, tabla A-2 de la FAO para los usos del suelo*).

Tabla 10. Clasificación del uso del suelo para el modelo SWAT

Código	NDVI	Descripción	Uso Suelo (SWAT)	%
1	-0.96 – (-0.025)	Cuerpos de agua	WATR	0.20
2	0.45 – 0.55	Pastizales	PAST	6.20
3	0.55 – 0.65	Suelo Cordillera Llanganates	RNGE	32.1
4	0.65 - 1	Bosque siempre verde	FRSE	61.50

Fuente: Del autor.

Figura 18. Mapa del uso del suelo de la cuenca del Río Topo para el modelo SWAT



Fuente: Del autor.

Por otro lado, se tiene datos del tipo de suelo muy poco detallado, ya que se empleó cartografía a una escala global de la FAO; sin embargo, resulta aceptable el uso de esta información para este estudio. Por ejemplo, un estudio en el Ecuador ha implantado este tipo información cartográfica como la presentada en esta investigación (pendiente, uso y tipo de suelo) para la generación de los HRU en el modelo SWAT, desarrollado para la microcuenca del Río Chalpi Grande al suroeste de Quito (Falcones et al., 2021). En adición, Gomariz & Alonso (2018), indican que los datos del suelo con menos detalle espacial se puede obtener resultados similares a comparación de modelos que brindan un mejor detalle espacial.

Los HRU presentan parámetros físicos y climáticos similares, subdividiendo a la cuenca en áreas más pequeñas con características similares, lo que ayuda tomar decisiones locales (Grajales, 2017); en otras palabras, cada área pequeña denominada subcuenca, presentan un mismo suelo, uso del suelo y pendiente; además, el SWAT modela un caudal para cada HRU en función del CN (Hurtado & Yáñez, 2015).

En esta investigación, para el tipo de suelo en el modelo SWAT, se utilizó un ráster global del suelo que se obtuvo del portal de suelos de la FAO/UNESCO. El SWAT tiene incluido una lista de tipos de suelos, pero para poder identificar la descripción del tipo de suelo en SWAT se empleó un “mapa mundial del suelo” de la FAO/UNESCO (*En los anexos F1, F2 y F3, se muestra la interfaz del modelo SWAT para el tipo del suelo y los mapas mundiales del suelo de la FAO*).

A partir de esta clasificación de los suelos en la cuenca, se tiene que los suelos (litosoles, andisoles ócricos - fuertemente socavado a montañosos) abarca la mayor extensión en área de la cuenca del Río Topo (tabla 11 y figura 19). Según Musálem (2005), un terreno que presenta pendientes mayores al 30% son áreas fuertemente socavadas. Los litosoles son suelos muy finos que contienen roca, grava y arcilla, se localizan habitualmente en regiones con fuertes pendientes y de ecosistemas montañosos (Bonilla & Toapanta, 2022); si los litosoles se desarrollan sobre calizas presentan una textura limo arcillosa (Puig, 1991), lo cual podría ser característico de la cuenca del Río Topo, se encuentran entre 1200 y 3300 msnm (González & Hernández, 2016). Los litosoles presentan características de suelos impermeables y al igual que los inceptisoles son suelos de escaso desarrollo (Ortega et al., 2020).

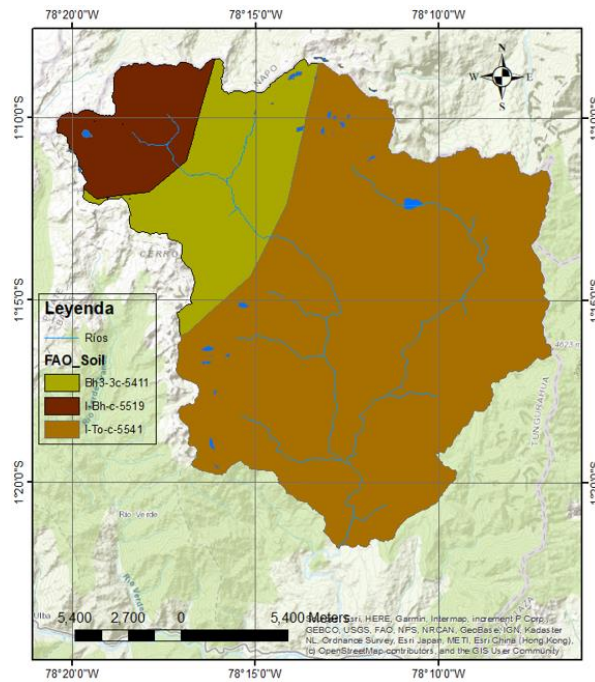
Los andisoles ócricos se caracterizan por ser pobres en materia orgánica a comparación de los suelos andisoles (Méndez et al., 2008). Por otra parte, los suelos cambisoles húmicos se desarrollan entre 1985 a 2227 msnm, tienen una textura fina, son medianamente permeables, se presentan a temperaturas de 18 °C (Ávila et al., 2014); sin embargo, en esta investigación, según el mapa suelo de la FAO, este tipo de suelo se localizó a alturas que llegan hasta los 4809 msnm de la cuenca del Topo; además, estos suelos son suelos jóvenes, oscuros, con contenido de material orgánico (Castillo et al., 2016).

Tabla 11. Clasificación del tipo del suelo para el modelo SWAT

Tipo de suelo (SWAT)	Descripción	%
Bh3-3c	Cambisoles húmicos finos, fuertemente socavado a montañosos	15.51
I-Bh-c	Litosoles, Cambisoles húmicos, fuertemente socavado a montañosos	8.39
I-To-c	Litosoles, Andisoles ócricos, fuertemente socavado a montañosos	76.10

Fuente: Del autor.

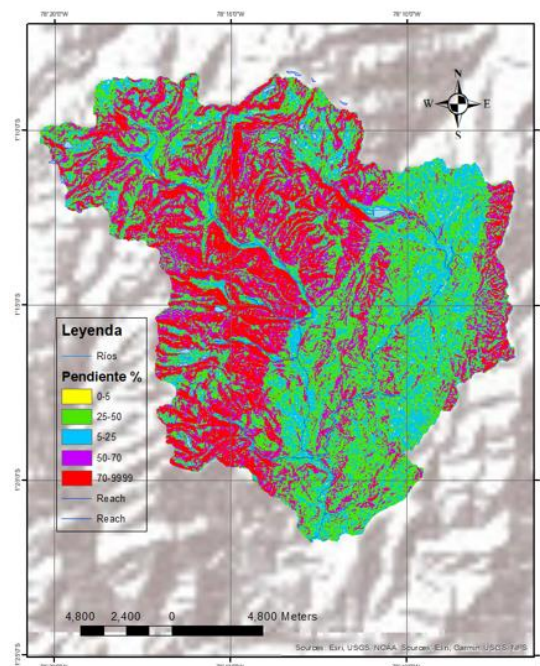
Figura 19. Mapa del tipo de suelo de la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

Las pendientes de la cuenca en el modelo SWAT (figura 20); se la obtuvo a partir de la clasificación mostrada en la (tabla 6). Según la topografía de la zona, las áreas planas son escasas (4.29%), lo que promovería un menor almacenaje subterráneo; además, no presentarían un gran rol en los procesos de infiltración, transmisión vertical de agua y recarga subterránea en la cuenca. Estas áreas planas constituyen según Mejía et al. (2021) la principal fuente para los caudales base de los ríos en la cuenca. El modelo solo permite clasificar en cinco tipos de pendientes los cuales fueron generados de la siguiente manera (0 – 12%, 12 – 25%, 25 – 50%, 50 – 70%, 70 – ∞%).

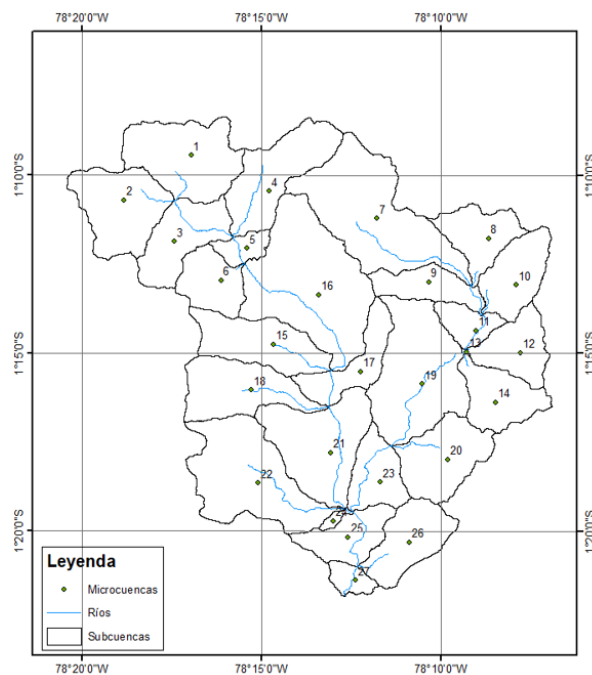
Figura 20. Mapa de pendientes de la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

A partir de los datos de entrada (pendiente, suelo y uso del suelo) en el modelo SWAT se generaron 765 HRU, visualizando 27 subcuencas. En la (figura 21), se da a conocer un gráfico de las subcuencas en la cuenca del Río Topo generadas por el modelo SWAT, este gráfico nos servirá para visualizar la dinámica morfométrica y hidrometeorológica de cada subcuenca perteneciente a la cuenca del Río Topo.

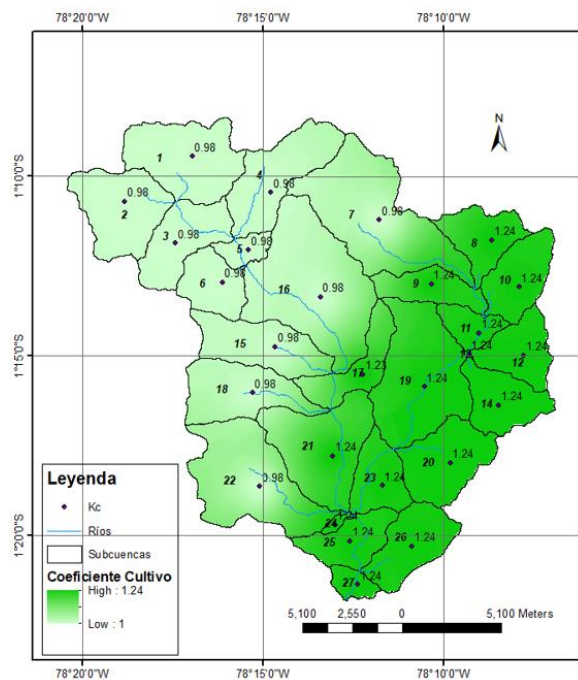
Figura 21. Subcuencas pertenecientes a la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

Ahora bien, en la siguiente (figura 22), se da a conocer la distribución espacial de los coeficientes de cultivo (K_c) para cada subcuenca por medio de la metodología propuesta por Cuesta et al. (2005), en donde se obtuvo un K_c promedio de 1.13 que representa a toda el área de la cuenca del Río Topo (tabla 12).

Figura 22. Coeficiente de cultivo (K_c) para cada subcuenca



Fuente: Del autor.

Tabla 12. Coeficiente de cultivo (K_c) representativo de la cuenca del Río Topo

Código	NDVI		Descripción	$(K_c=1.25 \cdot NDVI+0.2)$		$(K_c=1.5625 \cdot NDVI-0.05)$		Kc medio	%	Kc Cuenca Topo
1	-0.96	-0.0225	Cuerpos de agua	-1	0.17	-1.55	-0.08	-0.62	0.20	
2	0.45	0.55	Pastizales	0.7625	0.89	0.653125	0.81	0.78	6.20	
3	0.55	0.65	Suelo Cordillera Llanganates	0.8875	1.01	0.809375	0.97	0.92	6.10	
4	0.65	1	Bosque siempre verde	1.0125	1.45	0.965625	1.51	1.23	61.50	

Fuente: Del autor.

Finalmente, se digitalizaron en el modelo los datos climáticos a escala diaria durante el periodo de estudio (01/01/2021 – 31/08/2022). El modelo tiene una base de datos de la cobertura de suelo y tipologías del suelo clasificadas por el US Geological Survey (USGS) para generar los HRU y además dispone de un motor climático que genera valores climáticos en función de la latitud y longitud de la cuenca (Gomariz & Alonso, 2018). A continuación, se refleja una tabla resumen de los datos de entrada morfométricos para el modelo SWAT (tabla 13).

Tabla 13. Resumen de la los datos de entrada morfométricos para el modelo SWAT

Datos de entrada	Tamaño de celda	Resolución	Fuente
DEM	12.5 x 12.5	Buena	EARTH DATA del satélite Alos Palsar
NDVI	20 x 20	Baja	Land Viewer Satélite Sentinel 2
Pendiente	12.5 x 12.5	Buena	DEM
Uso del suelo	12.5 x 12.5	Buena	NDVI
Tipo de suelo	12.5 x 12.5	Buena	FAO/UNESCO

Fuente: Del autor.

Calibración del Modelo SWAT

Los datos utilizados para calibrar el modelo se obtuvieron gracias al programa Calibration Uncertainty Procedures (SWAT-CUP) con el algoritmo SUFI-2. Las métricas estadísticas que se emplearon para observar la eficacia del modelo SWAT son: PBIAS, Nash (NSE) y R^2 , estas métricas estadísticas se muestran en la siguiente (tabla 14).

Tabla 14. Eficacia de un modelo hidrológico para pasos de tiempo diario

Eficiencia	NSE (–)	PBIAS (%)	r^2 (–)
Muy bueno	$NSE > 0.80$	$PBIAS < \pm 5$	$r^2 > 0.85$
Bueno	$0.70 < NSE \leq 0.80$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$	$0.75 < r^2 \leq 0.85$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.70$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.60 < r^2 \leq 0.75$
No satisfactorio	$NSE < 0.50$	$PBIAS > \pm 15$	$r^2 < 0.60$

Fuente: (Balcázar et al., 2019)

Ajuste de Parámetros de Calibración

El ajuste de los parámetros se basó en el manual del SWAT y en base al trabajo de Mejía et al. (2021), donde indican los parámetros de calibración que más afectan al modelo. Los modelos suelen tener errores aleatorios, esto es producto de imperfecciones en la simulación del modelo o también a causa de la mala toma de datos; una forma para ver si el modelo presenta errores es por medio de las métricas estadísticas presentados en la (tabla 14).

En este modelo se optó por generar los parámetros de calibración a escala diaria de un año (2021) en el programa SWAT-CUP, ya que se tuvo ausencia de datos climáticos históricos a escala diaria y solo se contó con información de la estación M01 para el periodo (enero 2021 – agosto 2022); por lo tanto, el periodo de validación en SWAT fue omitida. Para la calibración, el modelo SWAT-CUP solo permite simulaciones de años hidrológicos completos; por ende, se utilizó la información en el año hidrológico completo de la serie de caudales del año 2021 a escala diaria. En este estudio se realizaron 600 simulaciones por medio del SWAT-CUP para lograr tener los mejores resultados del modelo. Con los parámetros de calibración del

año 2021, resultado del modelo SWAT-CUP, se calibró la información del periodo completo de estudio en el modelo SWAT a escala diaria (enero 2021 – agosto 2022).

CAPÍTULO V

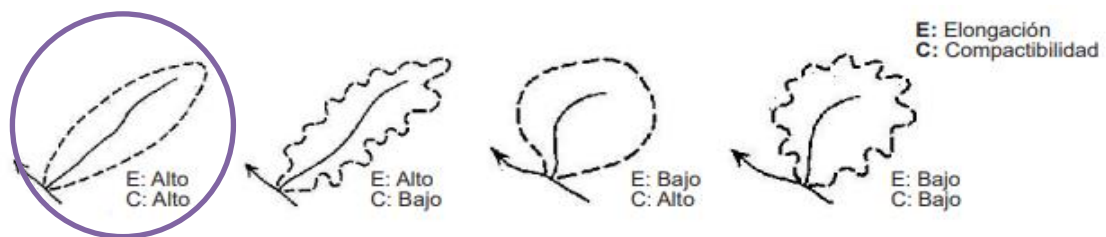
Resultados y Discusión

Caracterización Morfométrica de la Cuenca del Río Topo

La cuenca del Río Topo presenta un factor de forma = $0.43 < 1$ (forma alargada) y según sus índices de elongación y compactibilidad, la cuenca también presenta una forma alargada lo que permite la tendencia a sufrir de crecidas (figura 23).

$$E = 0.74 \text{ y } C = 0.50$$

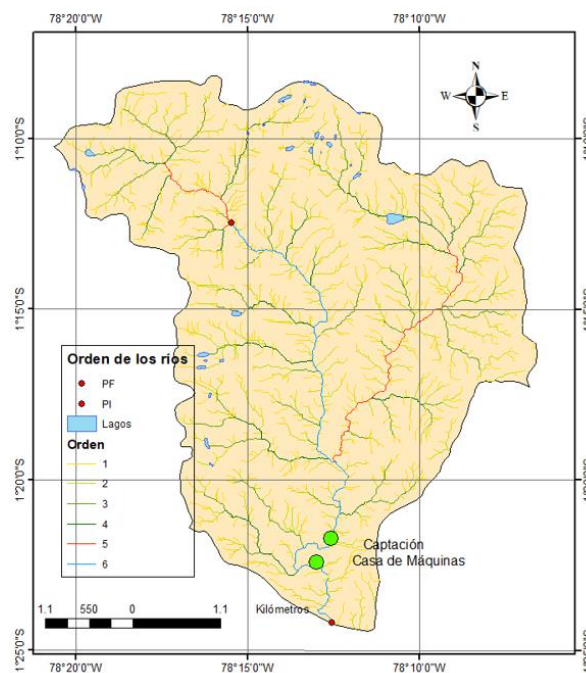
Figura 23. Particularidades de la forma en una cuenca



Fuente: (Guerra & González, 2002)

En la (figura 24), se refleja la disposición del drenaje de la cuenca del Río Topo, en el cual se caracteriza a la cuenca de un orden de drenaje 6.

Figura 24. Red de drenaje de la cuenca del Río Topo

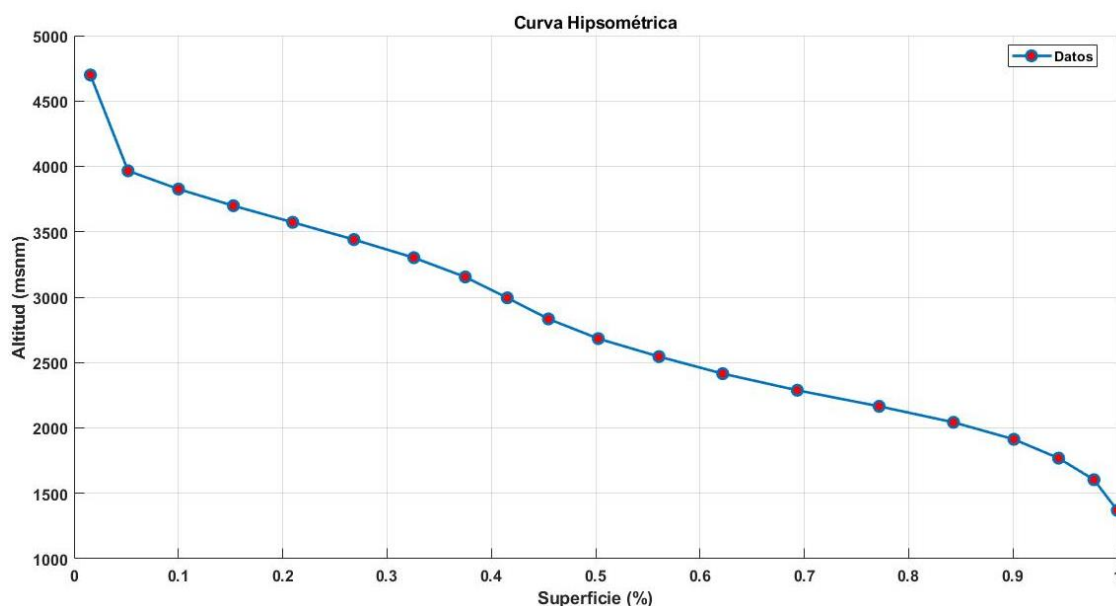


Fuente: Del autor.

En la (figura 25), se representa la curva hipsométrica característica de la cuenca del Río Topo. Como se puede apreciar, la cuenca se encuentra en equilibrio o madurez entre las fases de erosión y sedimentación, también se puede apreciar que un 40% de la superficie de la cuenca

estaría representada por los páramos en función del análisis de alturas en cuencas según Chuncho (2019).

Figura 25. Curva hipsométrica de la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

La hipsometría de la cuenca (tabla 15), se obtuvo a partir de la curva hipsométrica (figura 24). De la variabilidad de altitudinal de la cuenca se puede estudiar sus diferentes variables climáticas.

Tabla 15. Hipsometría en la cuenca del Río Topo

No	Cotas			Área km ²		
	Min	Max	Promedio	Área entre curvas	Acumulado	% Acumulado
1	1291	1515	1403	9.885	441.338	100%
2	1516	1692	1604	14.947	431.452	98%
3	1693	1845	1769	18.908	416.505	94%
4	1846	1980	1913	25.554	397.596	90%
5	1981	2105	2043	31.456	372.042	84%
6	2106	2225	2165.5	34.634	340.585	77%
7	2226	2350	2288	31.538	305.952	69%
8	2351	2479	2415	26.971	274.414	62%
9	2480	2611	2545.5	25.669	247.443	56%
10	2612	2754	2683	21.073	221.773	50%
11	2755	2912	2833.5	17.433	200.700	45%
12	2913	3077	2995	17.780	183.266	42%
13	3078	3231	3154.5	21.758	165.487	37%

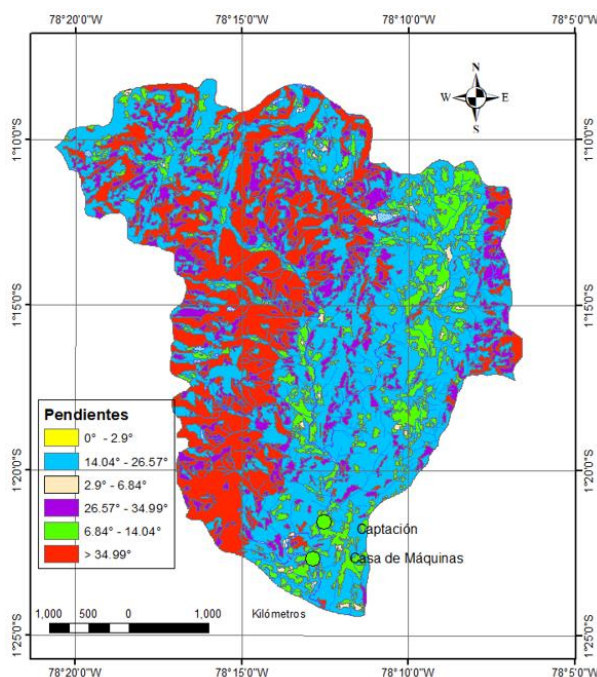
14	3232	3372	3302	25.339	143.729	33%
15	3373	3508	3440.5	25.901	118.390	27%
16	3509	3636	3572.5	25.081	92.488	21%
17	3637	3761	3699	23.225	67.407	15%
18	3762	3891	3826.5	21.346	44.182	10%
19	3892	4040	3966	15.925	22.836	5%
20	4041	4809	4425	6.911	6.911	2%

Fuente: Del autor.

En función de su topografía (figura 26), fisiográficamente se representa a la cuenca con un paisaje montañoso; por lo tanto, este presenta fuertes pendientes. La cuenca del Río Topo presenta un 46% de relieve montañoso, esta zona se localiza en la parte suroeste a los márgenes de la Amazonía ecuatoriana; y un 40% de un relieve escarpado, esta área se localiza al noreste de la cuenca, es de este tipo de relieve, porque se encuentra rodeada por la cordillera de los Llanganates, el restante 14% presenta relieves planos y ondulados.

Reyes et al. (2014), indagan que la topografía en una cuenca hidrográfica relaciona el relieve con la forma de la cuenca, donde las áreas mayormente accidentadas están conformadas por sistemas montañosos y laderas; las áreas onduladas y planas están formadas por valles. Por tal motivo, la cuenca del Río Topo se presenta mayormente como un área accidentada conformada por sistemas montañosos y laderas.

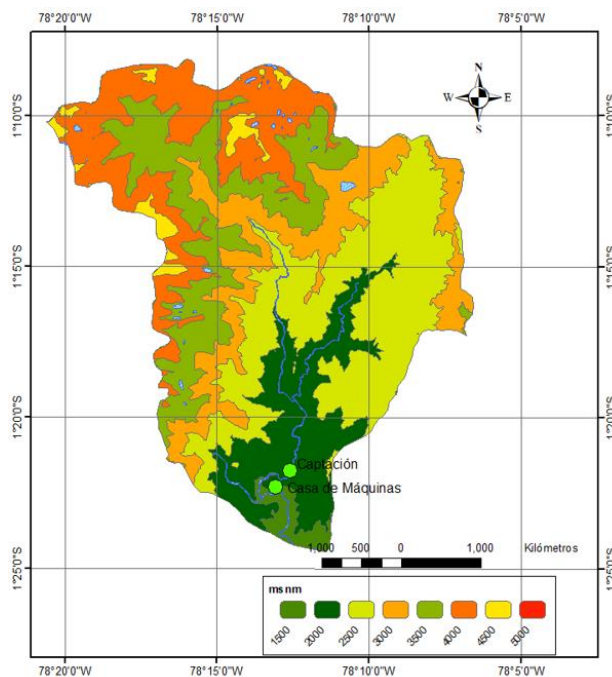
Figura 26. Pendientes de la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

En función de las características fisiográficas, la cuenca posee un rango altitudinal que oscila entre 1291 a 4809 msnm; la parte alta al noroeste de la cuenca presenta un relieve escarpado formado por la cordillera de los Llanganates (3000 – 4809) msnm, el relieve de la parte media y baja al sureste presenta un relieve montañoso (1291 – 3000) msnm, los relieves planos se denota muy poco en la cuenca (figura 27).

Figura 27. Plano altimétrico de la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

A continuación, se presenta un resumen de las variables morfométricas determinadas para la cuenca del Río Topo (tabla 16); en donde, la cuenca presenta un paisaje montañoso de relieve accidentado con un área total de 441.33 km² y un perímetro de aproximadamente 104.81 km, presenta una altitud que va desde los 1291 msnm (punto de descarga del Río Topo hasta el Río Pastaza) a 4809 msnm (páramos – cordillera de los Llanganates), el mayor uso del suelo que se da en la cuenca es de bosque húmedo premontano y montano nativo. Presenta una pendiente media del 45% lo que confiere a una cuenca con topografía muy accidentada. Solo presenta un área de lagunas de 1.52 km² localizados en los páramos. La longitud axial de la cuenca desde dos puntos opuestos entre sí es de 32.05 km y un ancho aproximado de 20 km. El río principal (Topo) tiene una longitud de 45 km con una pendiente aproximada del 5%.

En la cuenca del Río Topo presenta un sistema de drenaje de sexto orden, muestra una densa cobertura vegetal, con un patrón de drenaje de los tributarios de tipo dendrítico, ostenta una longitud total de los ríos de aproximadamente 943.11 km; por otra parte, la extensión de

los ríos tributarios de primero, segundo, tercero, cuarto y quinto orden se calculó en 474.48 km, 230.99 km, 119.73 km, 58.97 km y 25 km respectivamente.

El coeficiente de elongación de la cuenca es de 0.74 lo que le caracteriza al ser una cuenca alargada; al mismo tiempo, el coeficiente de compactibilidad es de 0.5 lo que le permite ser una cuenca moderadamente compacta. El coeficiente de sinuosidad es de $1.40 > 1$ lo que le confiere ser un río con pocas curvas. La cuenca presenta un total de 2540 ríos aproximadamente.

El índice de alargamiento es de $1.6 > 1$; por ende, es una cuenca alargada, el número de curvatura es de 72.43 lo que confiere a ser una cuenca con una baja pero moderada infiltración. El factor de forma es de $0.43 < 1$; por lo tanto, es una cuenca medianamente alargada; el índice de circularidad es de 0.5, por lo cual la cuenca es moderadamente compacta, el índice asimétrico es igual a $1.7 > 1$ lo que resulta que el río está recargado a una de sus vertientes. El coeficiente de compacidad presente es de 1.4; por ende, se considera una cuenca un tanto ovalada medianamente compacta.

Para la cuenca del Río Topo presenta una relación de bifurcación de $4.5 > 4$; por ende, puede presentar altas torrencialidades, este valor alto se demuestra también porque la cuenca presenta altas pendientes y por su forma alargada. La densidad de drenaje es de $2.14 \text{ km/km}^2 > 2$ por lo cual presenta un sistema de drenaje desarrollado, con muchos ríos y topografía fuerte. La frecuencia de ríos se estimó en 3.12 ríos por km^2 . La cuenca presenta un valor de la densidad de drenaje que, como la relación de bifurcación, se considera alto; por lo tanto, se considera una cuenca bien drenada. Este valor de la densidad de drenaje se puede explicar por un suelo impermeable (limo arcilloso) y además por ser un sistema montañoso con altas pendientes. Según Strahler (1964), al existir una densidad de drenaje alta, la escorrentía fluye rápidamente; a su vez, el tiempo de concentración disminuye y aumentan las crecidas por la existencia de infiltraciones bajas.

Tabla 16. Características morfométricas de la cuenca del Río Topo

Datos	Simbología	Unidad	Valor
Tipo de paisaje	-	-	Montaña
Relieve	-	-	Accidentado
Textura del suelo	-	-	Limo-arcilloso plástico
Formación geológica	-	-	Tena, Napo, Hollín
Taxonomía del suelo	-	-	Inceptisoles, andisoles
Altitud	-	msnm	1291 - 4809
Uso de la tierra	-	-	Cultivos, bosque nativo, vegetación herbácea y arbustiva, pastizales

Pendiente media de la cuenca	PM	%	45
Área Lagunar	Al	km ²	1.52
Área cuenca	A	km ²	441.33
Perímetro cuenca	P	km	104.81
Longitud Axial	L	km	32.05
Desnivel de la cuenca	Hc	m	3518
Longitud total de drenaje	Ct	km	943.11
Longitud del río principal	Cm	km	45
Número de ríos de primer orden	N1	-	1062
Número de ríos de segundo orden	N2	-	236
Número de ríos de tercer orden	N3	-	57
Número de ríos de cuarto orden	N4	-	18
Número de ríos de quinto orden	N5	-	3
Número de ríos de sexto orden	N6	-	1
Densidad de drenaje	Dd	km/km ²	2.14
Pendiente del cauce principal	SI	%	5
Elongación	E	-	0.74
Compactibilidad	C	-	0.5
Frecuencia de cauces	Fn	-	3.12
Coeficiente de sinuosidad total	SI	-	1.40
Número de ríos	Nr	-	2540
Índice de alargamiento	las	-	1.60
Número de Curvatura	CN	-	72.43
Factor de forma	IF	-	0.43
Circularidad de la cuenca	C	-	0.5
Ancho promedio	Ap	km	20
Índice Asimétrico	las	-	1.7

Coeficiente de Compacidad de Gravelius	Kc	-	1.4
Relación de bifurcación	Rb	-	4.5

Fuente: Del autor.

Caracterización Hidrometeorológica de la Cuenca del Río Topo

Precipitación

El clima en la zona baja de cuenca es lluvioso, ya que presenta precipitaciones anuales de 4658.63 mm; según (Astromía, s.f.), sugiere que las precipitaciones superiores a 750 mm, se considera una cuenca lluviosa. La cuenca se localiza en los márgenes de la cordillera oriental y la presencia de la cordillera de los Andes genera una variabilidad especial en su precipitación, temperatura y humedad. Por tal motivo, las áreas altas de las cordilleras son zonas frías muy poco húmedas donde presenta páramos de precipitaciones de baja intensidad con clima de montaña, estas precipitaciones anuales en los páramos oscilan entre (500 y 2000) mm presentando un patrón bimodal según Chunchu (2019). Por otra parte, en la costa ecuatoriana también presenta precipitaciones entre (500 – 2000) mm anuales y en la sierra varían entre (700 – 1200) mm anuales según Armijos et al. (2018). En el área de la cuenca del Río Topo sus páramos presentan precipitaciones que llegan a los 2000 mm anuales.

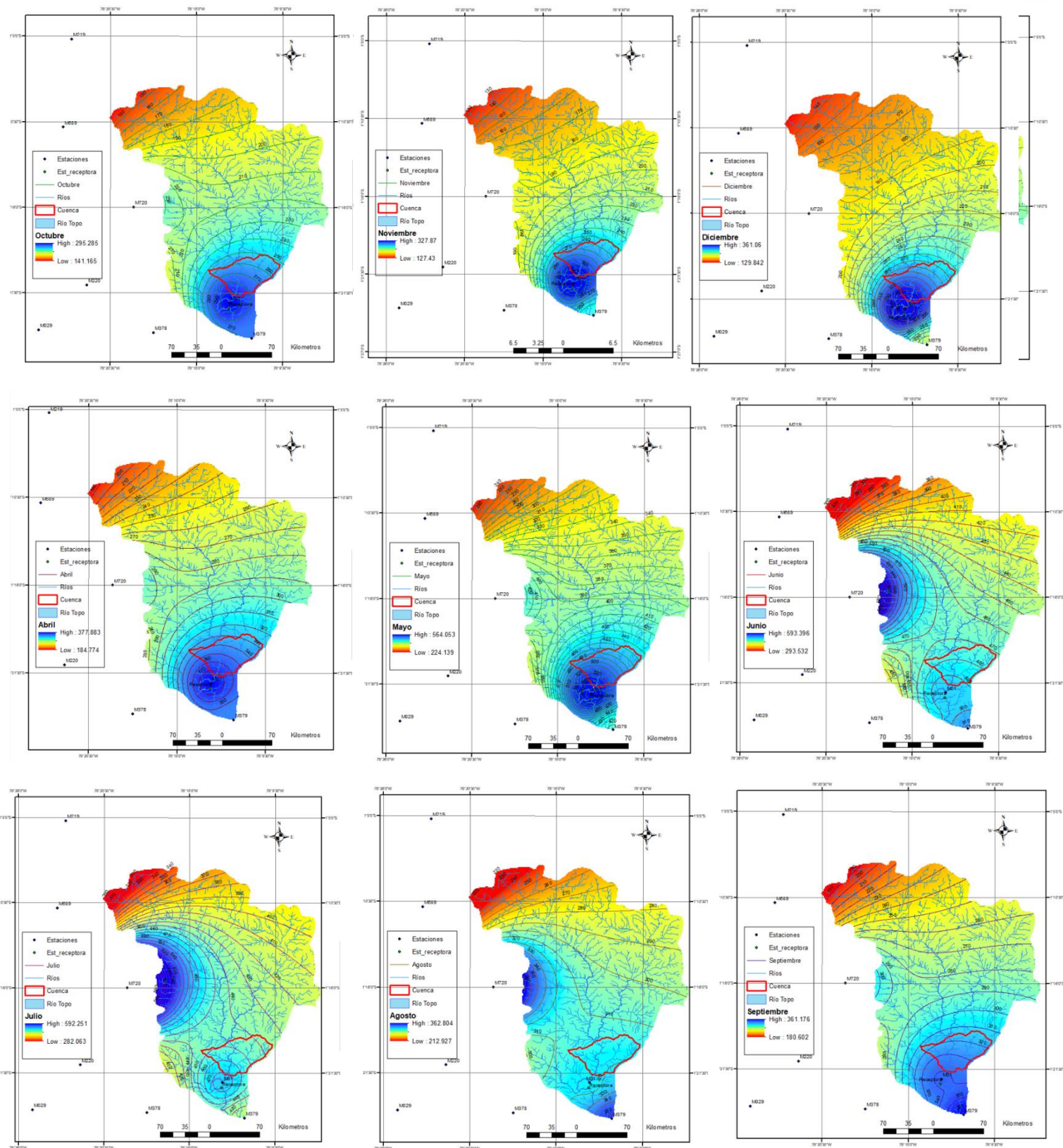
Mientras que, en las zonas medias y bajas de la cuenca del Río Topo, las precipitaciones aumentan paulatinamente, por lo que en la Amazonía ecuatoriana se logra tener precipitaciones que rodean los 4700 mm según las estaciones meteorológicas del Puyo y del Río Verde (Ramírez & Rosero, 2013). Por otra parte, Ramírez et al. (2016), indican que en la Amazonía del Ecuador presenta precipitaciones anuales entre 3654.5 y 5516 mm en las provincias de Pastaza y Napo y según Armijos et al. (2018), las precipitaciones en la Amazonía del Ecuador varían entre 2000 – 4000 mm anuales.

A continuación, se muestra un mapa de isoyetas mensuales y anuales que representa la precipitación en la cuenca del Río Topo, (figura 28 y 29), respectivamente. Como se observa en la cuenca del Río Topo, la precipitación tiene un valor mínimo de 2200 mm de precipitación anual en la parte noroeste localizada en las zonas altas de los Andes. Conforme la cuenca desciende hacia el sureste las precipitaciones comienzan a aumentar paulatinamente, hasta que alcanza un valor máximo de 4334 mm anuales en el extremo sur de la cuenca. Como la cuenca en sus páramos presenta precipitaciones mayores a 2000 mm anuales esta se considera un subpáramo lluvioso según Camacho (2014).

Según el (Instituto Geofísico del Perú, s.f.), la precipitación anual se clasifica como: desértico < 250 mm, árido entre 250 - 500 mm, moderadamente lluvioso entre 500 - 2000 mm y

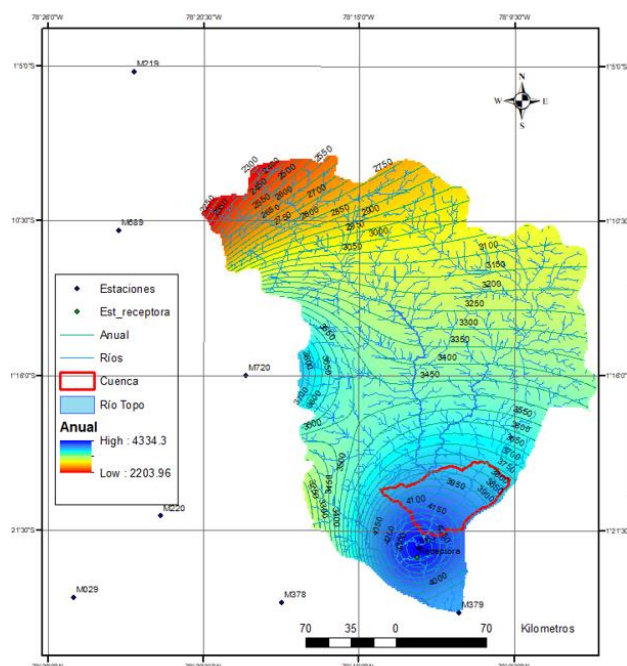
excesivamente lluvioso > 2000 mm; por lo que la cuenca del Río Topo en su parte baja se encuentra en un ambiente excesivamente lluvioso. *(Las estaciones meteorológicas más representativas de la Amazonía ecuatoriana están en el anexo G).*

Figura 28. Mapas de isoyetas mensuales en la cuenca del Río Topo [mm/mes]



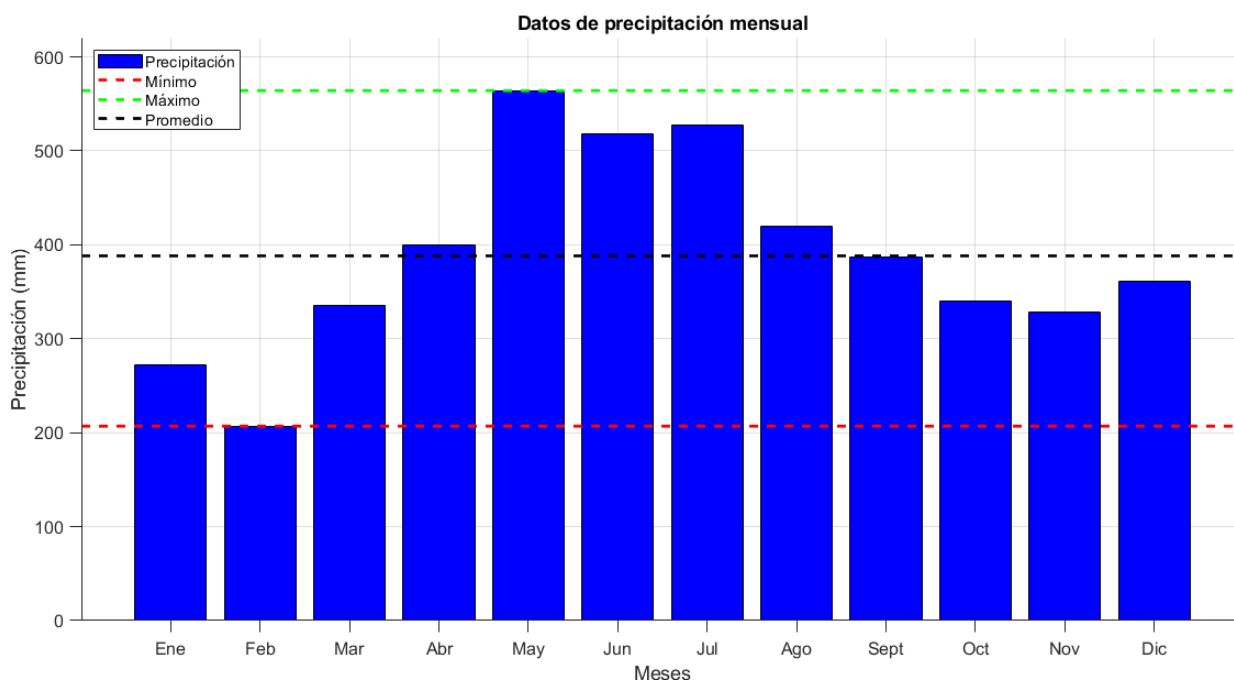
Fuente: Del autor.

Figura 29. Mapa isoyetas anuales de la cuenca del Río Topo [mm/año]



Fuente: Del autor.

En el área baja de la cuenca del Río Topo, en función de los datos de precipitación de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022), se observa un régimen unimodal. Las épocas de alta pluviosidad se dan en los meses de abril a agosto, con un pico de 564.1 mm en el mes de mayo. En los siguientes meses la precipitación se vuelve paulatinamente constante de septiembre a enero con una media de 388.22 mm, el mes que presenta una baja precipitación es en febrero (206.95 mm) (figura 30). Las lluvias suelen aumentar mientras se reduce la altura (dirección a la Amazonía) por lo que la precipitación en las zonas altas de la cuenca es menor a comparación de sus áreas bajas.

Figura 30. Pluviograma mensual de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)

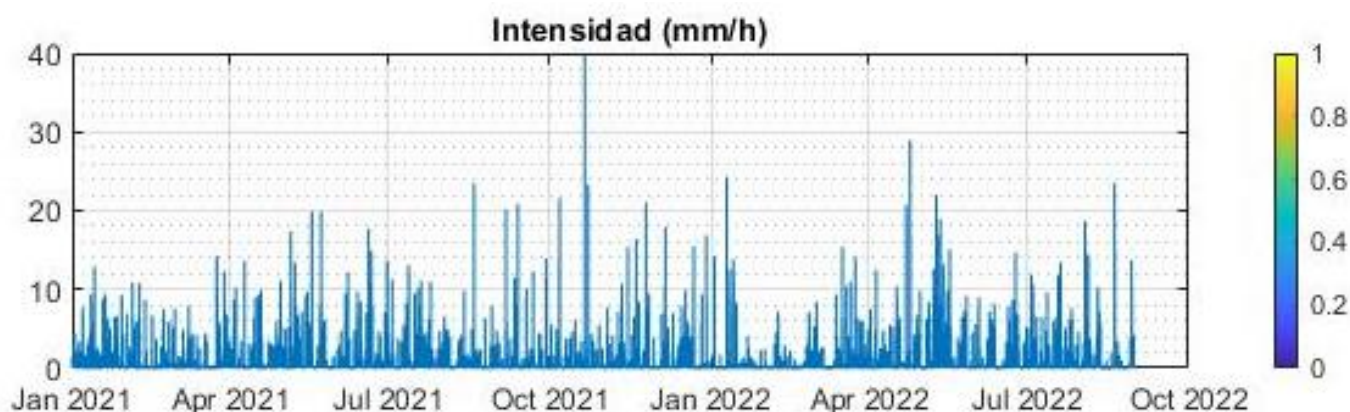
Fuente: Del autor.

Intensidad

A continuación (figura 31), se da a conocer la intensidad máxima horaria de la cuenca en función de los datos de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022). En el páramo ecuatoriano, usualmente la intensidad de precipitación es baja (lloviznas), la dinámica de la lluvia en los páramos es de mayor frecuencia, pero de baja intensidad (Buytaert et al., 2006). Por ejemplo, los páramos del Jatun Sacha al norte del Ecuador, presentan intensidades que oscilan 0.21 – 3.6 mm/h, en base a Torres & Aragón (2018) y según Crespo et al. (2014), la lluvia en los páramos es frecuente, pero con intensidades menores a 10 mm/h en un 90 %. En el caso de la Amazonía; por ejemplo, en la estación del Puyo, suele presentar intensidades que pueden alcanzar los 50 mm/h (Maldonado et al., 2020).

Según la página web (Ecología Verde, s.f.), indica que una precipitación es débil si se presenta una intensidad menor a 2 mm/h, moderada de (2 a 15) mm/h, fuerte de (15 a 30) mm/h, muy fuerte de (30 a 60) mm/h y torrenciales con intensidades mayores a 60 mm/h. Según esta clasificación en la zona baja de la cuenca del Río Topo presenta intensidades muy fuertes que rodean los 39.8 mm/h.

Figura 31. Hietograma en periodos horarios de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)



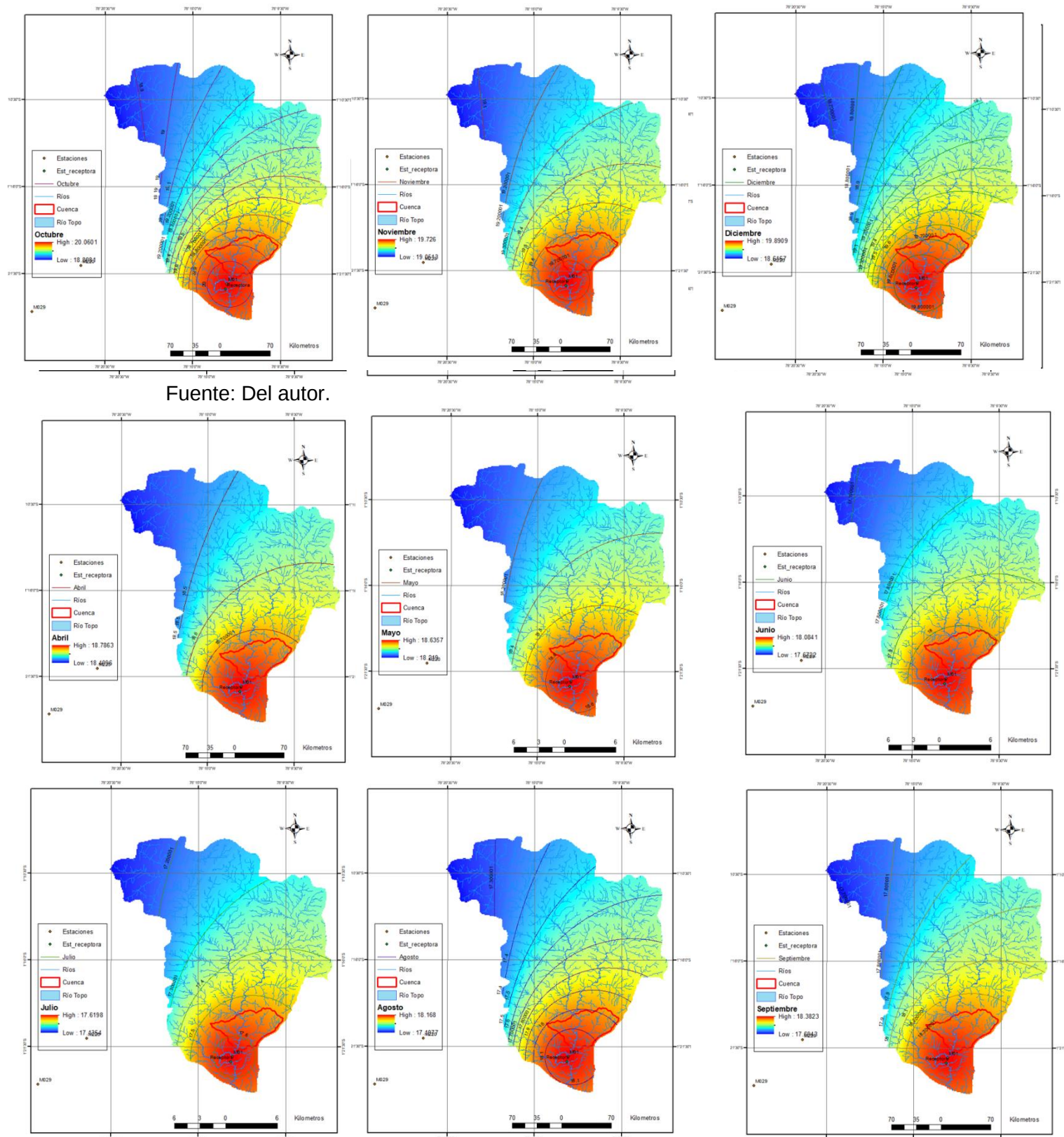
Fuente: Del autor.

Temperatura

Para el análisis de la temperatura en el espacio de la cuenca, se trabajó con las estaciones que se registraron en la (tabla 8). La topografía de la cuenca por estar comprendido entre ecosistemas de páramos y amazónico, juega un rol en la variación de su temperatura, la temperatura mínima anual que se registra es de 8 °C, así como también la temperatura del aire se registra en un máximo anual de 19.9 °C en la parte alta de la cuenca (páramos). Por otra parte, en la zona baja de cuenca las temperaturas anuales mínimas y máximas son de 14 y 23 °C respectivamente (figuras 32, 33 y 34).

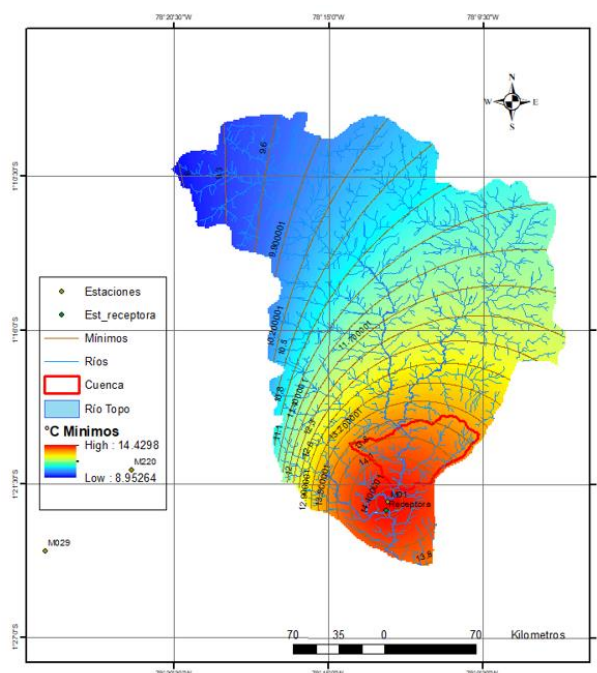
Según el (Instituto Geofísico del Perú, s.f.), el criterio de clasificación en función de la temperatura se representa: muy frío < 0 °C, frío entre (0 – 10) °C, templado entre (10 – 20) °C, cálido entre (20 – 25 °C) y muy cálido > 25 °C.

Figura 32. Mapas de isotermas mensuales de la cuenca del Río Topo [°C]



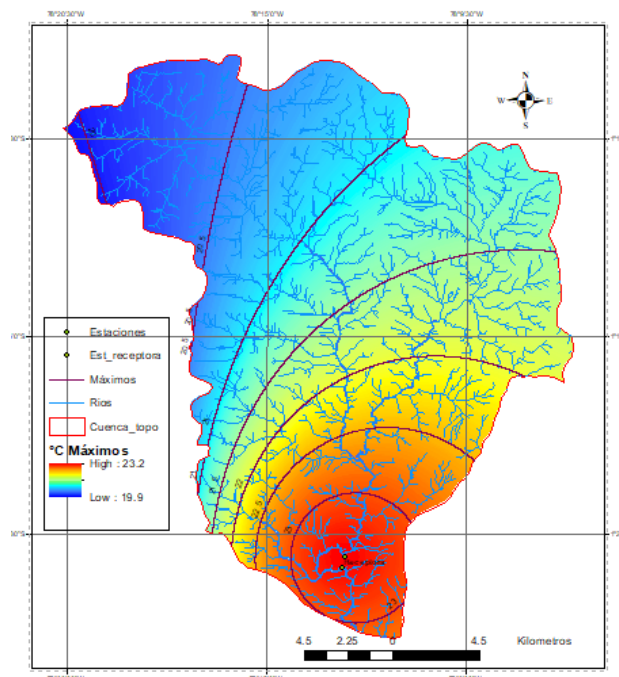
Fuente: Del autor.

Figura 33. Mapa isotermas mínimos anuales de la cuenca del Río Topo [°C]



Fuente: Del autor.

Figura 34. Mapa isotermas máximos anuales de la cuenca del Río Topo [°C]



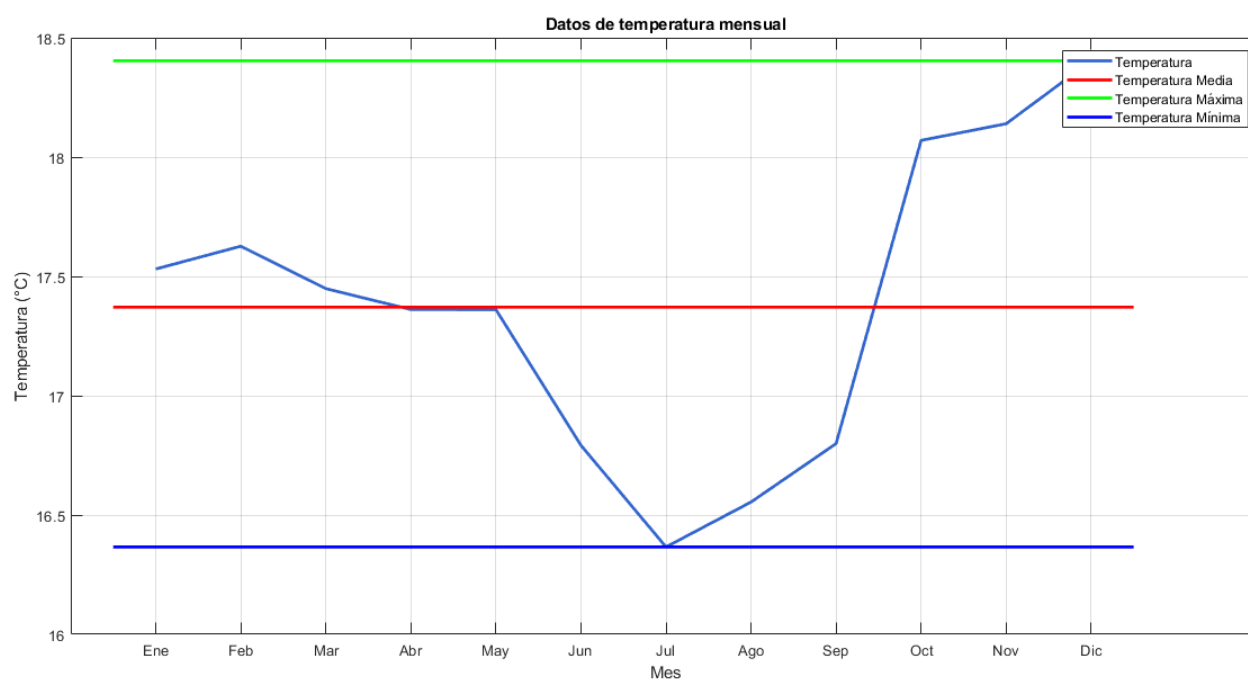
Fuente: Del autor.

Con respecto a su estacionalidad de los datos de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022), se puede observar que la zona baja de la cuenca presenta una temperatura constante de (17.3 °C), a partir de mayo comienza a descender llegando a un mínimo de 16.2 °C en julio y finalmente la temperatura comienza a subir llegando a un pico de 18.3 °C en el mes de

diciembre; presentando un clima templado (figura 35). Partiendo de los datos disponibles en la cuenca, lo que se observa es que en la parte alta de la cuenca (páramos) el clima es frío por las altas montañas (3000 – 4809) msnm. Las diferencias de temperatura por la altura, llegan a tener consecuencia en las pérdidas de agua a causa de la evaporación. *(Los rangos de temperatura máxima y mínima a nivel nacional se reflejan en los anexos H1 y H2).*

La temperatura por ejemplo en la estación El Puyo registra una media anual de 21.1 °C (Ramírez & Rosero, 2013) y según Ramírez et al. (2016), en la región amazónica del Ecuador suele presentar una temperatura media anual de 24 °C. Por otro lado, en el área de los páramos del Ecuador a una altura de 3600 msnm suele presentar temperaturas en promedio que oscilan entre 8.32 °C y 9.32 °C (Camacho, 2014) y según Armijos et al. (2018), la temperatura en la sierra varía entre (10 – 16) °C y en la Amazonía varía entre (20 – 22) °C.

Figura 35. Estacionalidad con temperaturas medias mensuales de la estación M01



Fuente: Del autor.

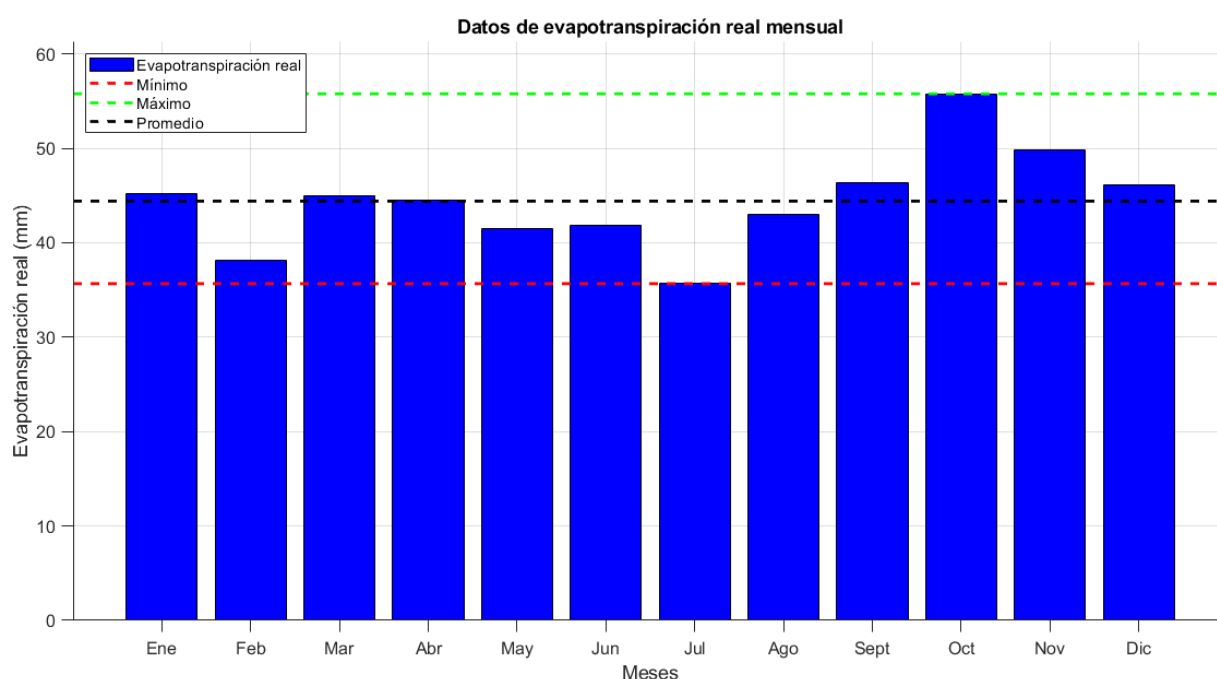
Evapotranspiración Real

Como se observa en la (figura 36), la cuenca mensualmente pierde en promedio 44.42 mm por evapotranspiración real, en el mes de octubre presenta una mayor evapotranspiración real, con un pico de 55.78 mm y el mes de julio presenta la menor evapotranspiración real en 35.67 mm, anualmente rodea los 532.98 mm, lo cual representa el 11.38% de la precipitación anual (4658.63 mm). En los páramos del Ecuador al norte, la cantidad de agua que se evapora y transpira anualmente oscila entre 544 y 514 mm lo que equivale mensualmente a 45.33 y 42.83 mm según Alvarado & Zapata (2017). Según Torres & Proaño (2018), en los páramos del Jatun Sacha, norte del Ecuador la evapotranspiración real en esta zona es relativamente

baja (237 mm/año). (Nota: Evapotranspiración potencial, medida de diferentes estaciones del Ecuador y la evapotranspiración real en función del uso del suelo se reflejan en los anexos I1 y I2)

Por ejemplo, en la estación de El Puyo, se evidencia que 19.21% de la precipitación anual (4581 mm) se convierte en evapotranspiración real (880.07 mm) (Ramírez & Rosero, 2013). En la cuenca del Río Chiguaza al sureste de la cuenca del Río Topo presenta el 36% de la precipitación (3000 mm) anual se evapotranspira (1095 mm) (Rivadeneira, 2017). En la cuenca del Río Araujo al este del Río Topo, la evapotranspiración (1400 mm) ocupa el 40% de la precipitación (3500 mm) (Vela, 2012).

Figura 36. Evapotranspiración real mensual de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)

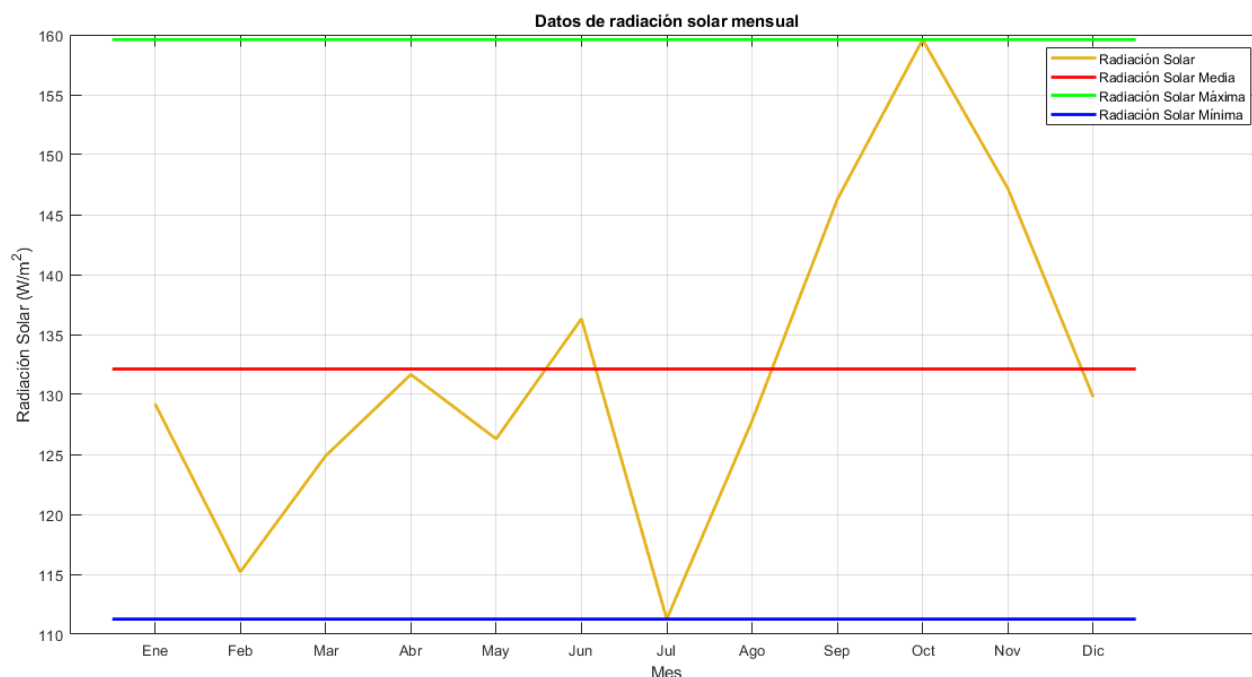


Fuente: Del autor.

Radiación solar

Durante los meses de septiembre a noviembre hay una mayor incidencia de radiación solar, con un pico en el mes de octubre de 159.59 W/m^2 , para los meses de diciembre a julio la radiación solar disminuye, presentando una baja radiación solar en el mes de julio de 111.27 W/m^2 , en promedio presenta una radiación solar de 132 W/m^2 (figura 37).

Según lo expuesto por Alvarado & Zapata (2017), en las zonas de los páramos del Ecuador al norte suele presentar radiación solar alta que oscila entre 104 hasta 166 W/m^2 . En la Amazonía refleja altas nubosidades que absorben la radiación solar por tal motivo sus temperaturas son un poco más bajas que en la costa ecuatoriana, la radiación solar en Pastaza / Río Amazonas suele presentar una radiación solar que rodea los 161.5 W/m^2 .

Figura 37. Radiación solar mensual de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)

Fuente: Del autor.

La infraestructura construida y los minerales en los suelos que son descubiertos, tienden a absorber la radiación solar, provocando un aumento de la temperatura superficial y a la vez la radiación infrarroja (Moreno et al., 2021). En la cuenca del Río Topo, al ser una cuenca con escasa infraestructura antrópica, la cuenca no presentaría radiación infrarroja y la temperatura superficial de sus suelos no aumentaría. A la vez, no se registran alteraciones en el uso del suelo en la cuenca: por tal motivo, no se altera el flujo de energía y masa en su superficie y no provoca un efecto invernadero, porque la vegetación consume la radiación solar y no induce a un aumento de temperatura en su superficie.

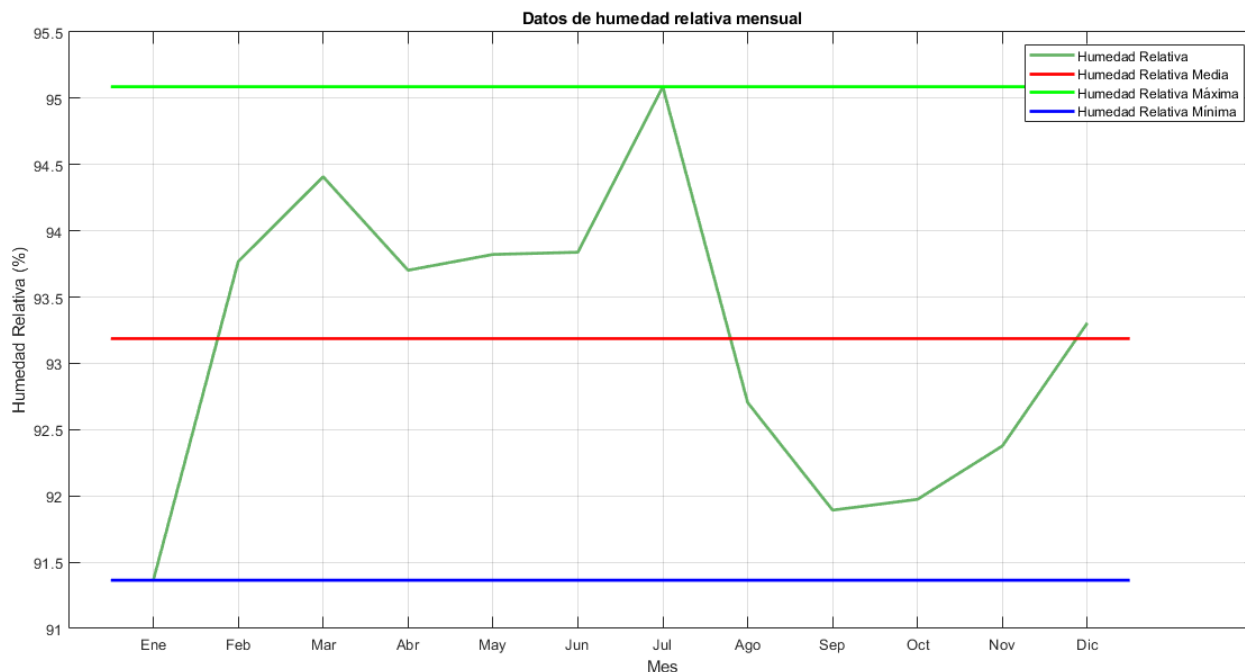
Humedad relativa

La humedad relativa para la cuenca del Río Topo se mantiene aproximadamente constante en los meses de febrero a junio, presentando niveles bajos de humedad en los meses de agosto a enero, con un mínimo de 91.36%. El mes de julio presenta el máximo nivel de humedad relativa 95.08 % y en promedio se tiene un 93.2 % de humedad relativa. Como se observa la humedad relativa registrada en el área de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022) es significativa alta ya que durante todos los meses se registra humedades mayores al 90%. La humedad relativa es alta en el área de estudio, por lo que representa un clima tropical húmedo (figura 38). Esta humedad relativa aumenta o es alta debido a las persistentes lluvias (Torres et al., 2013).

En los páramos suele presentar humedad relativa más baja a comparación de la Amazonía, en promedio registran un 87 % (Peña). En la Amazonía ecuatoriana suele presentar

humedades relativas que varían entre (75 – 85)% (Velásquez & Castro, 2023), en cambio para Hidalgo (2012), la humedad relativa en la Amazonía del Ecuador varía entre (85 – 100) %.

Figura 38. Humedad relativa mensual de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)

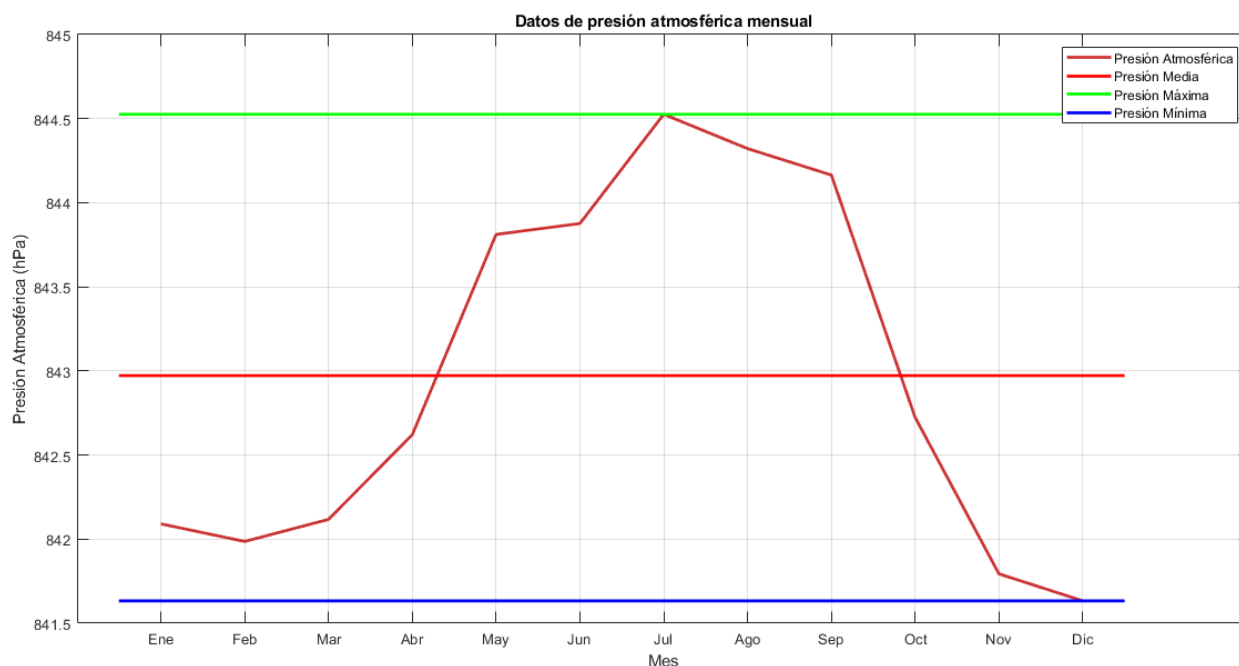


Fuente: Del autor.

Presión

La presión en la estación M01 se encuentran medidos en [hPa], para los cálculos de la evapotranspiración se hizo la transformación a [kPa]. En la (figura 39), se detalla la dinámica de la presión en la cuenca del Río Topo, donde se ve que la presión aumenta desde el mes de abril hasta octubre, presentado una presión máxima de 844.52 hPa en el mes de julio, la temperatura disminuye desde el mes de octubre hasta diciembre y de enero a abril, donde muestra un mínimo de 841.98 hPa en el mes de diciembre, como se ve la presión durante todo el año en la cuenca no muestra grandes cambios, presentado en promedio un valor de 843 hPa.

En los páramos del Ecuador la presión atmosférica suele ser baja según Chuncho (2019), al sur del Ecuador suele variar entre (63 – 68) hPa (Gualipa & Céleri, 2013) y a nivel del mar la presión se encuentra en 1013.25 hPa (Hidalgo, 2013).

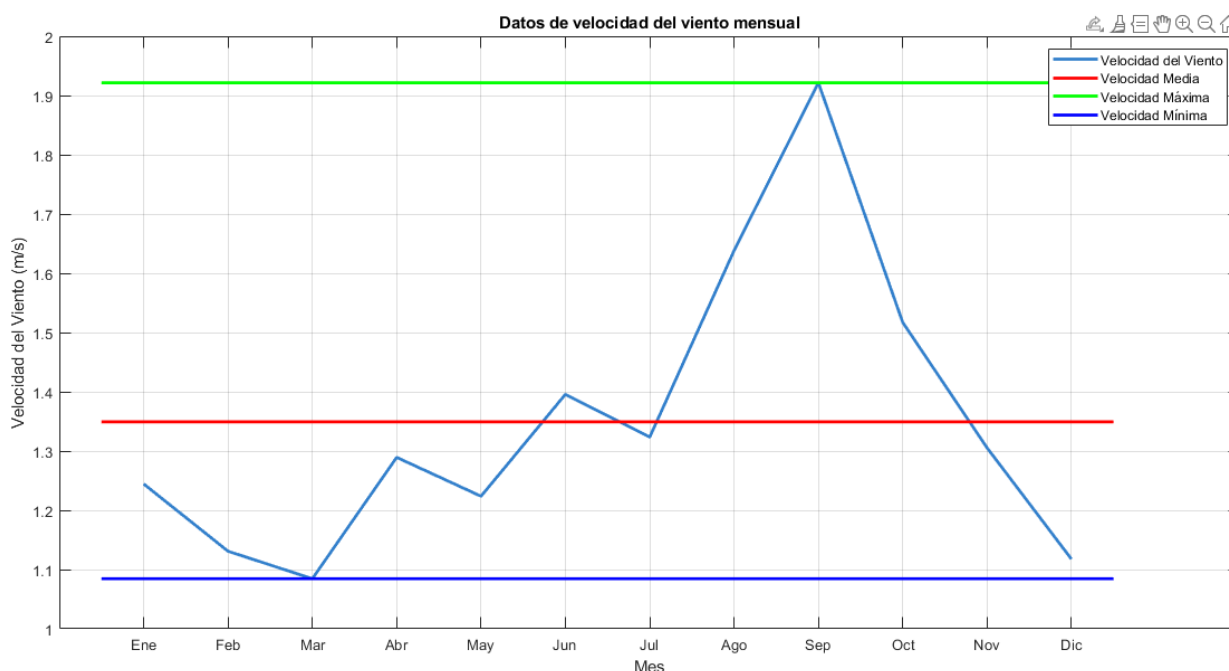
Figura 39. Presión atmosférica mensual de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)

Fuente: Del autor.

Velocidad del Viento

La velocidad del viento en la cuenca del Río Topo a los 10 m de altura, muestra valores altos desde julio a noviembre con un máximo valor de 1.92 m/s en el mes de septiembre, tiende a disminuir desde noviembre a diciembre, luego de enero a mayo, presentando bajos niveles de velocidad de viento, mostrando un mínimo de 1.08 m/s en el mes de marzo y presenta en promedio una velocidad del viento de 1.35 m/s, lo cual demuestra un aire ligero (figura 40).

En los páramos del Ecuador, específicamente en el Chimborazo, la velocidad del viento suele ser mayor a comparación a la amazonia, registrando en promedio en 4.08 – 4.5 m/s (brisa suave) (Cunalata et al., 2013). En la Amazonía del Ecuador (Pastaza), la velocidad del viento en promedio se encuentra en 0.23 m/s (Uvidia et al., 2015).

Figura 40. Dinámica de la velocidad del viento mensual de la estación M01 (altura 10 m)

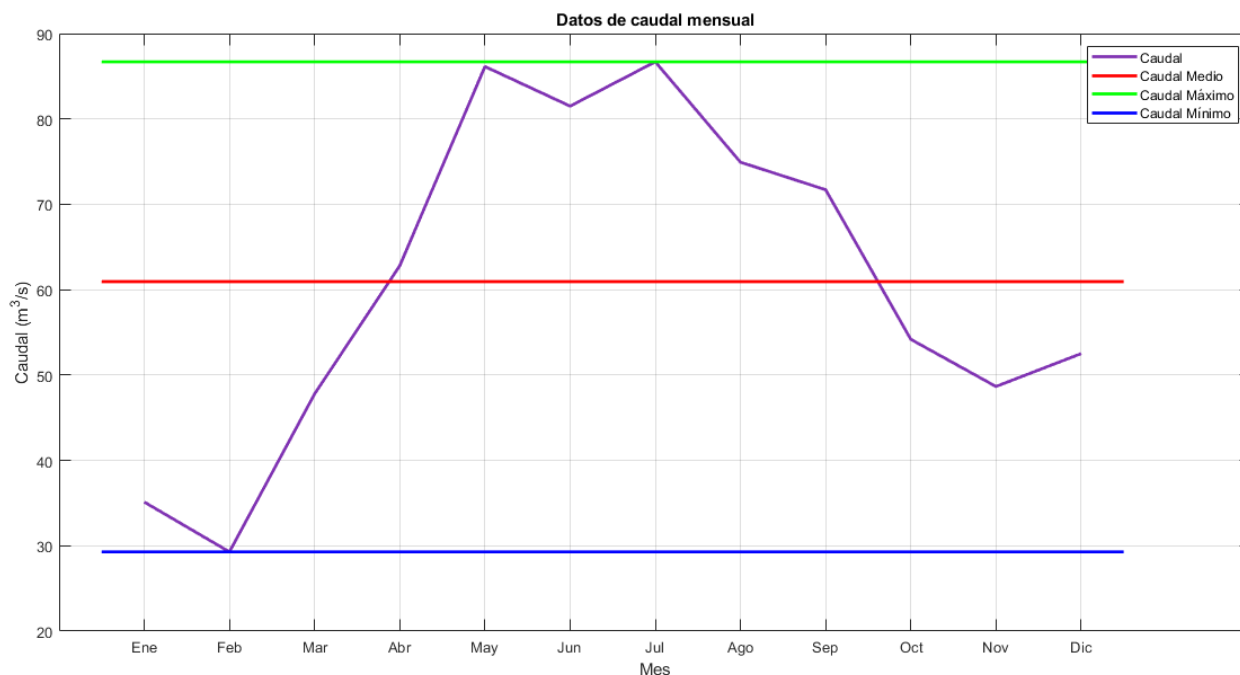
Fuente: Del autor.

Escorrentía

Escorrentía Superficial. A Continuación, se presenta un hidrograma de caudales de la cota 1520 msnm en la cuenca baja del Río Topo, en donde se puede notar los picos de caudales en los meses de mayo y julio (máximo 86.69 m³/s), el caudal comienza a descender hasta llegar mínimo de 29.28 m³/s en el mes de febrero, los máximos caudales se dan de abril a septiembre, mientras que los caudales más bajos de octubre a diciembre y de enero a abril, presentando una media de 60.88 m³/s (figura 41).

Por ejemplo, el río de la cuenca del Jubones al sur del Ecuador presenta en promedio un caudal de 47.37 m³/s, la cual es aprovechada por la hidroeléctrica Minas San Francisco; los ríos en los páramos presentan niveles de caudal bajos de aproximadamente 0.25 m³/s como es en la microcuenca del Río Jatunhuayco que queda al norte de la cuenca del Río Topo (Rojas, 2018). En los páramos del Cayambe, al norte del Ecuador, presenta caudales de 0.62 m³/s (Valencia et al., 2014). Por otro lado, en la cuenca del Río Cosanga en la Provincia del Napo en sus páramos presenta caudales en 6.90 m³/s, en el pasto rodea caudales 12.30 m³/s y en los bosques de 18.60 m³/s, presentando una oferta hídrica media en 42.70 m³/s (Yaguache et al., 2015).

Figura 41. Hidrograma de caudales mensuales de la cuenca del Río Topo cota 1520 msnm



Fuente: Del autor.

Infiltración

Según la categorización de las tasas de infiltración, el suelo forestal tiene una infiltración rápida; por tal motivo, la cuenca del Río Topo, al poseer una mayor área de cobertura vegetal boscosa, podría presentar una infiltración rápida, ya que la vegetación mejora la estructura del suelo, mejorando con eso la circulación del agua dentro del suelo; así como también, la hojarasca en la superficie del suelo, provoca que se demore el escurrimiento de la superficie provocando así más tiempo para que el agua sea infiltrada. Sin embargo, hay que tomar en consideración otros factores que influyen en la infiltración como es el uso del suelo, el contenido de arcilla y limo, porosidad y humedad del suelo. Por ende, la cuenca baja del Río Topo al presentar un suelo limo arcilloso presenta una infiltración lenta de 13 – 36 mm/h (*En el anexo J, se da a conocer una tabla con la clasificación del suelo en función de su infiltración*).

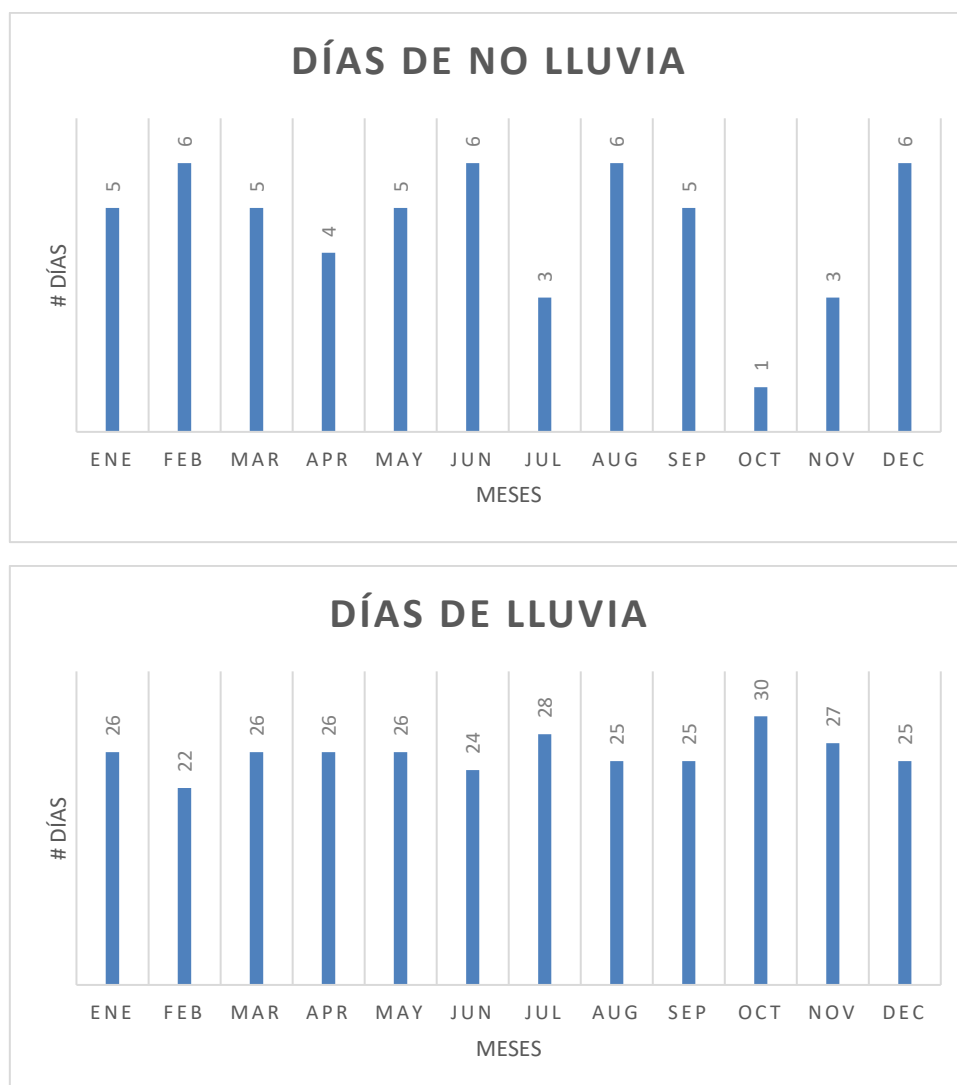
El limo y arcilla presente en la cuenca baja no promueve la infiltración rápida debido a su textura firme. Pero los árboles y arbustos presentes en la cuenca tienden a mejorar la capacidad de infiltración en el suelo; por otro lado, existe una menor capacidad de infiltración en áreas de pastizales por los animales, ya que debido al pisoteo por el ganado compacta el suelo y reduce esta capacidad de infiltración (acción muy poco probable en la cuenca baja).

Evaluación de las Variables que Conforman la Ecuación del Balance Hídrico

Regímenes de Lluvia

Un día seco según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) se define como un día donde la lluvia es menor o igual a 0.2 mm. Por lo tanto, los días secos en la cuenca del Río Topo durante el periodo de análisis (enero 2021 – agosto 2022), presenta como máximo 5 días consecutivos secos, del 7 al 12 de marzo de 2022. Se registra también un máximo de 32 días consecutivos de lluvia; por tal motivo, la cuenca permanece en constante presencia de lluvias durante el periodo de tiempo analizado. Como se puede observar, la cuenca mantiene una constante dinámica de precipitación durante un año hidrológico, presentado tan solo un rango entre 1- 6 días de no presencia de lluvia, el mes de octubre es el mes que mayor cantidad de días de lluvia presenta (figura 42).

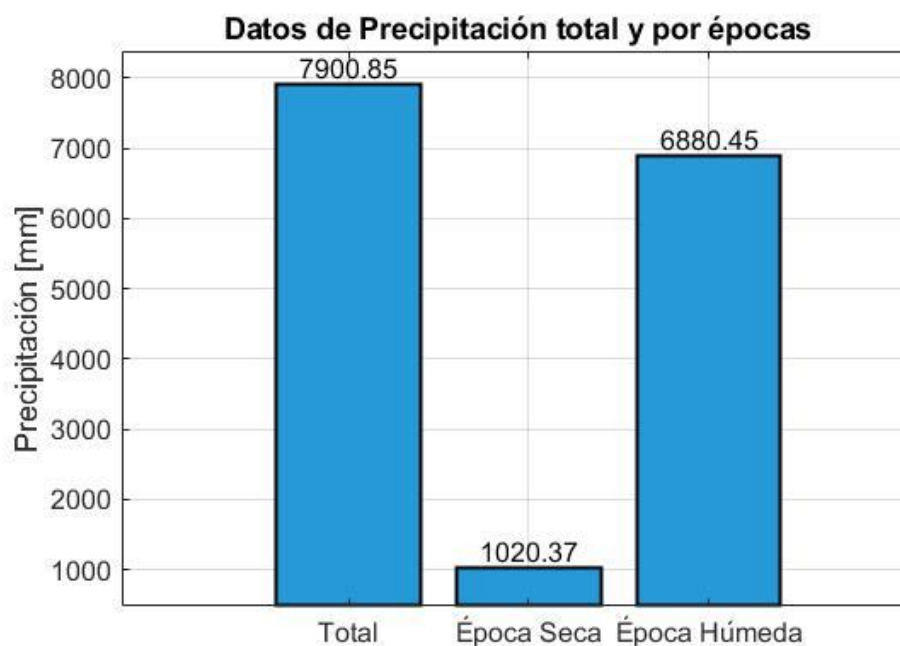
Figura 42. Días de no lluvia y lluvia que se genera en la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

En la siguiente (figura 43), se establecen los datos de precipitación por épocas durante el periodo de análisis (enero 2021 – agosto 2022) de la estación M01. La cuenca recibe un total de 7900.85 mm de lluvia, se destaca una desigual distribución en cuanto a la cantidad de lluvia en los días secos y días de lluvia, donde el 87.08% del agua que recibe corresponde a los días de lluvia y 12.91% en los días de no lluvia.

Figura 43. Precipitación total y por épocas de la de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)



Fuente: Del autor.

Análisis del Escurrimiento

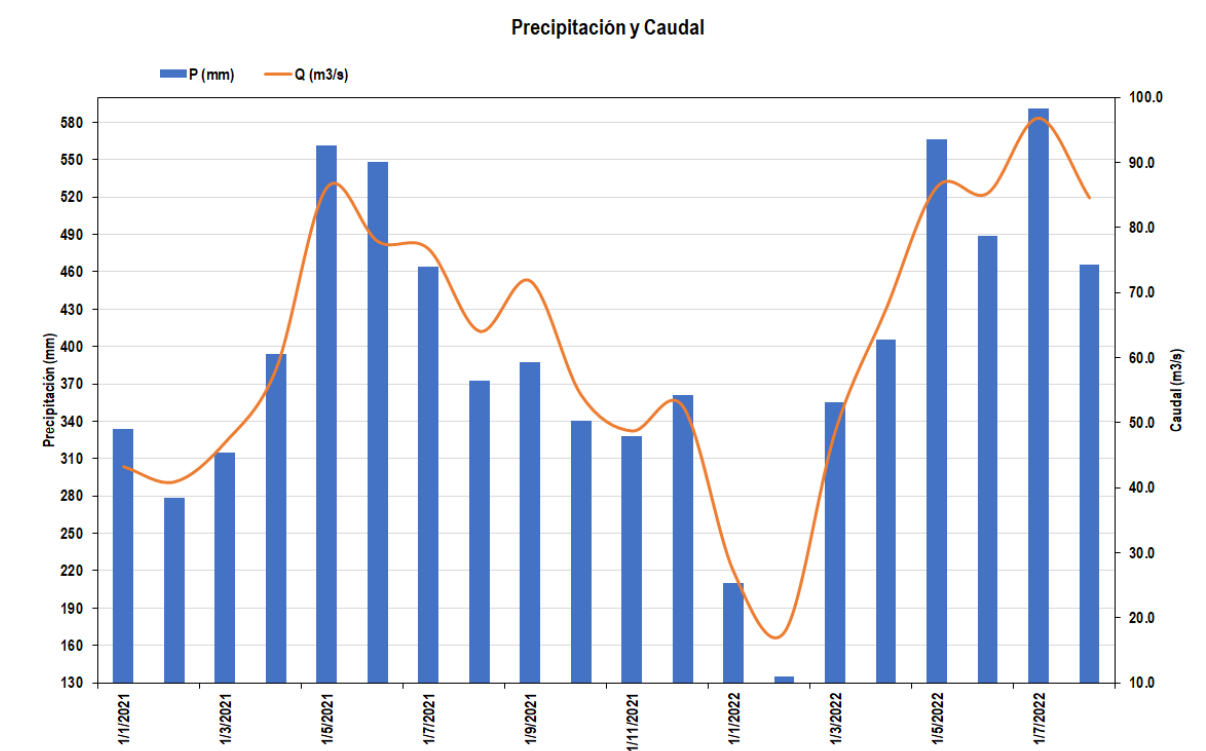
Los datos de escurrimiento (m^3/s) se refleja en la (figura 44), para el año 2021, se puede ver un incremento de caudal en los meses de mayo a julio, presentando un pico en el mes de mayo de $86.08 \text{ m}^3/\text{s}$, hay una disminución de caudal en los meses de enero a abril con un mínimo de $46.97 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de marzo, a partir de agosto a diciembre hay una reducción del caudal presentando un mínimo de $36.21 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de agosto. Para el año 2022, se presenta un escenario medianamente similar al del año 2021, donde los meses con menos caudal están entre enero a abril con un mínimo de $29.56 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de febrero, luego desde mayo a julio hay un aumento de caudal presentando un pico en el mes de julio en $96.74 \text{ m}^3/\text{s}$.

Paulatinamente se denota un comportamiento directamente proporcional entre las dos variables (precipitación y caudal). Por otra parte, el caudal base (caudales de origen subterráneo) durante el periodo de análisis (enero 2021 – agosto 2022) de la cuenca del Río Topo en promedio rodea los $43.43 \text{ m}^3/\text{s}$. Por ejemplo, para Yaguache et al. (2015), el caudal

base en la cuenca del Río Cosanga al Norte de la cuenca del Río Topo se ha cuantificado en $11.50 \text{ m}^3/\text{s}$ (bosque), $6.20 \text{ m}^3/\text{s}$ (páramo) y $1.40 \text{ m}^3/\text{s}$ (pasto). Para el Río Quijos en la provincia del Napo tiene un caudal base de $20 \text{ m}^3/\text{s}$. (Valdivieso, 2011)

En caudal base en la cuenca del Río Topo es alto por lo que se sustenta en una alta recarga del agua subterránea almacenada en los acuíferos, bajas tasas de evapotranspiración y altas tasas de precipitación; por ejemplo, en ríos de similares características como el Río Surata y el Río de Oro en Colombia (1800 - 2000) msnm presentan caudales base en 48.6 y $52.6 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente (Gómez, 2016). (En el anexo P se puede observar el caudal base obtenido para las subcuencas del Río Topo).

Figura 44. Representación precipitaciones vs caudal mensual



Fuente: Del autor.

En la (figura 45), se puede observar el total del escurrimiento durante el periodo de análisis y entorno a los días de no lluvia y días de lluvia; en donde, en los días con menos lluvia, el escurrimiento rodea el 3.17% del escurrimiento total, en cambio en los días de lluvia el escurrimiento rodea el 96.83% del escurrimiento total. En función a la precipitación recibida en los días secos y días de lluvia, la cuenca del Río Topo pierde por escorrentía entre el 2.80% y 85.57% respectivamente; por lo tanto, el flujo por escorrentía representa el 88.37% de la lluvia recibida.

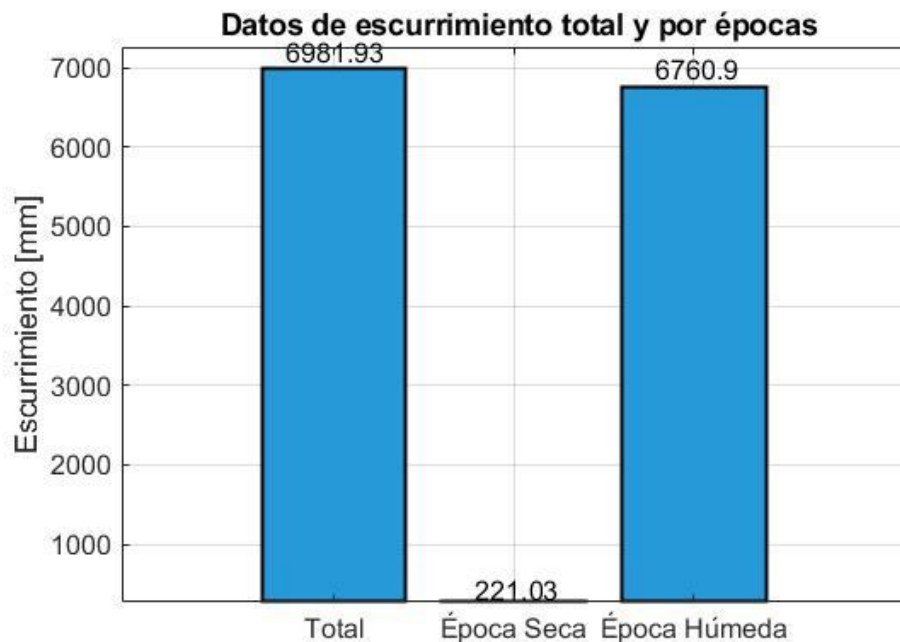
Presenta un alto coeficiente de escurrimiento que se da por la dinámica de la precipitación alta, por pendientes fuertes y el suelo de la cuenca baja (limo arcilloso), un relieve alto, el

área accidentada y escarpada, suelo poco permeable; a su vez, suelos talvez de profundidad corta como los litosoles, lo que produce el nivel alto de escurrimiento en la cuenca del Río Topo.

El coeficiente de escorrentía en la cuenca del Río Topo es del 0.88 y según se sustenta en la investigación de Ibáñez et al. (2011) donde recalca la presencia de un suelo arcilloso, las pendientes (5° - 40°) y según el Método de Molchanov y el método de Keler dan este tipo de escorrentía. Por ejemplo, en el Ecuador se tiene una evaluación del coeficiente de escorrentía en cuencas de páramo, que se encuentran en los volcanes Antisana y Pichincha, los resultados obtenidos mostraron que los valores del coeficiente de escorrentía se encontraban en un rango de 8% al 13% (Torres & Proaño, 2018).

Por otro lado, en la Amazonía, según (Comisión Mixta de Cooperación Amazónica - ecuatoriano - colombiana - Plan de Ordenamiento y Manejo de las Cuencas) revela que, en la región de la Amazonía ecuatoriana, el coeficiente de escorrentía (C) alcanza un valor de 0.91, esto indica que una gran proporción de la precipitación se convierte en escorrentía, lo que sugiere que hay una alta cantidad de agua que fluye hacia los ríos y cursos de agua en la región amazónica.

Figura 45. Esgurrimiento total y por épocas de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)



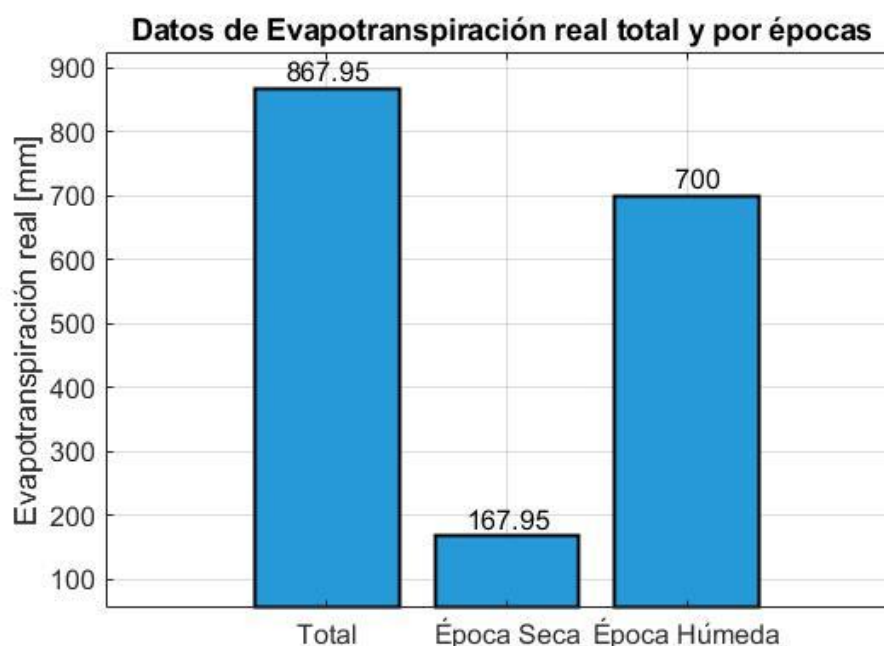
Fuente: Del autor.

Caracterización de la Evapotranspiración Real

En la (figura 46), se representa los datos de la evapotranspiración real total en los días de lluvia y días secos del periodo de análisis de los datos (enero 2021 – agosto 2022), para la

época seca le corresponde el 19.35% del total de evapotranspiración real, en cambio en la época húmeda se observa el 80.65% del total de evapotranspiración real que ocurre durante el periodo de análisis. En función a la precipitación recibida de los días secos y días de lluvia, la cuenca del Río Topo pierde por evapotranspiración entre el 2.29% y 9.53% respectivamente; por lo tanto, el flujo atmosférico recolectado representa el 11.82% de la lluvia recibida.

Figura 46. Evapotranspiración real total y por épocas de la estación M01 (enero 2021 – agosto 2022)



Fuente: Del autor.

Balance Hídrico de la Cuenca

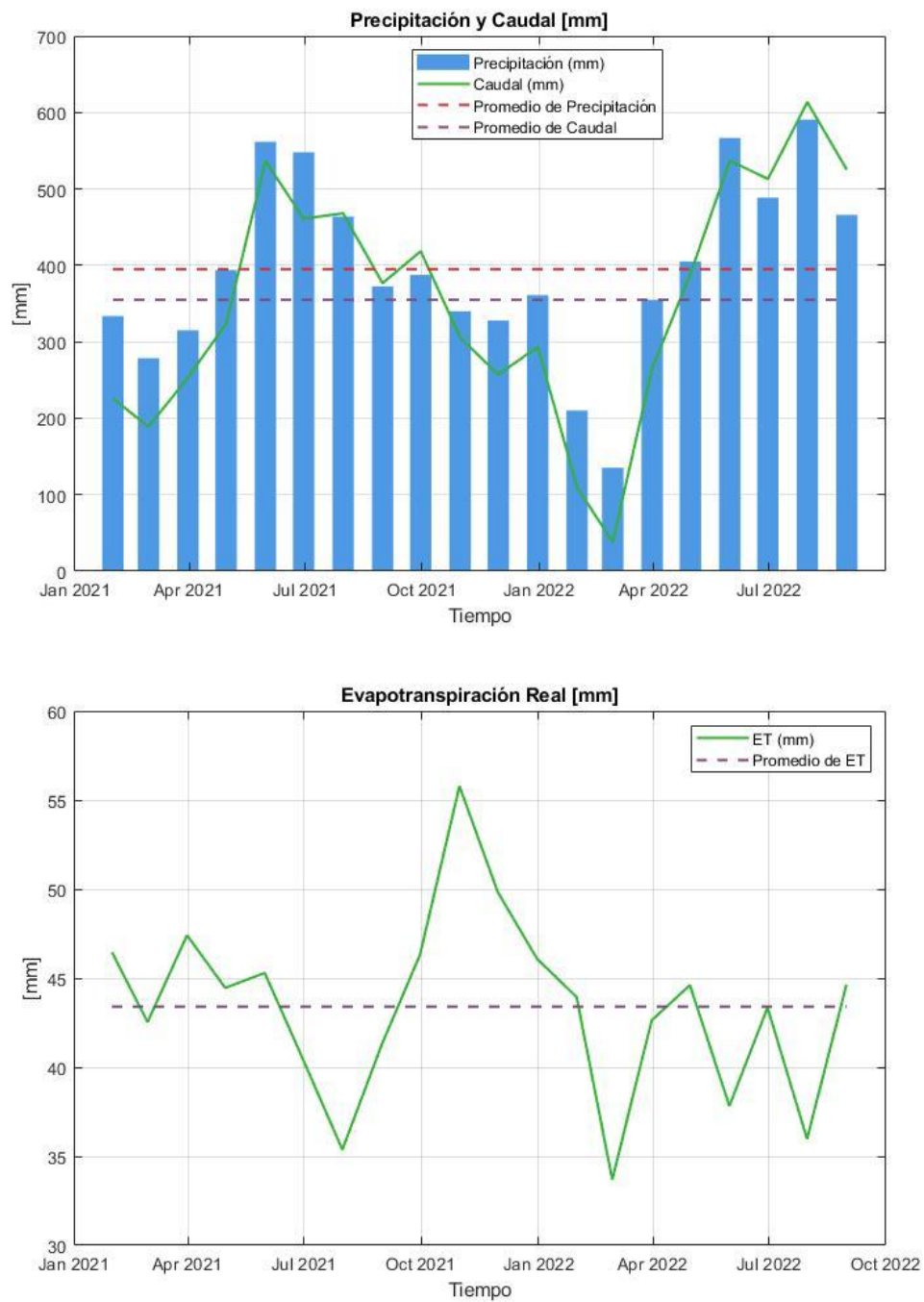
Silva (2005) señala que, mientras mayor sea el valor de precipitación y escurrimiento, y la evapotranspiración sea menor, la cuenca tiene una mayor eficiencia hídrica. En la (figura 47), se presenta la dinámica del balance hídrico en la cuenca del Río Topo (enero 2021 – agosto 2022); en donde, la cuenca presenta un almacenamiento medio de 154.72 mm de agua. En los periodos de abril 2021 a septiembre 2021; así como, los periodos de febrero 2022 a agosto 2022, presenta almacenamientos mayores a la media con un pico de 288.28 mm en abril de 2022. Por otra parte, presenta menos almacenamiento de agua en los periodos enero 2021 a abril 2021, septiembre 2021 a febrero 2022 con un mínimo de 49.41 mm de agua en el mes de agosto 2022. El gran almacenamiento de agua se ve influenciado por las bajas evapotranspiraciones y las altas precipitaciones que se presentan en el periodo de estudio, llegando a almacenar al final del periodo de análisis 50.97 mm de agua.

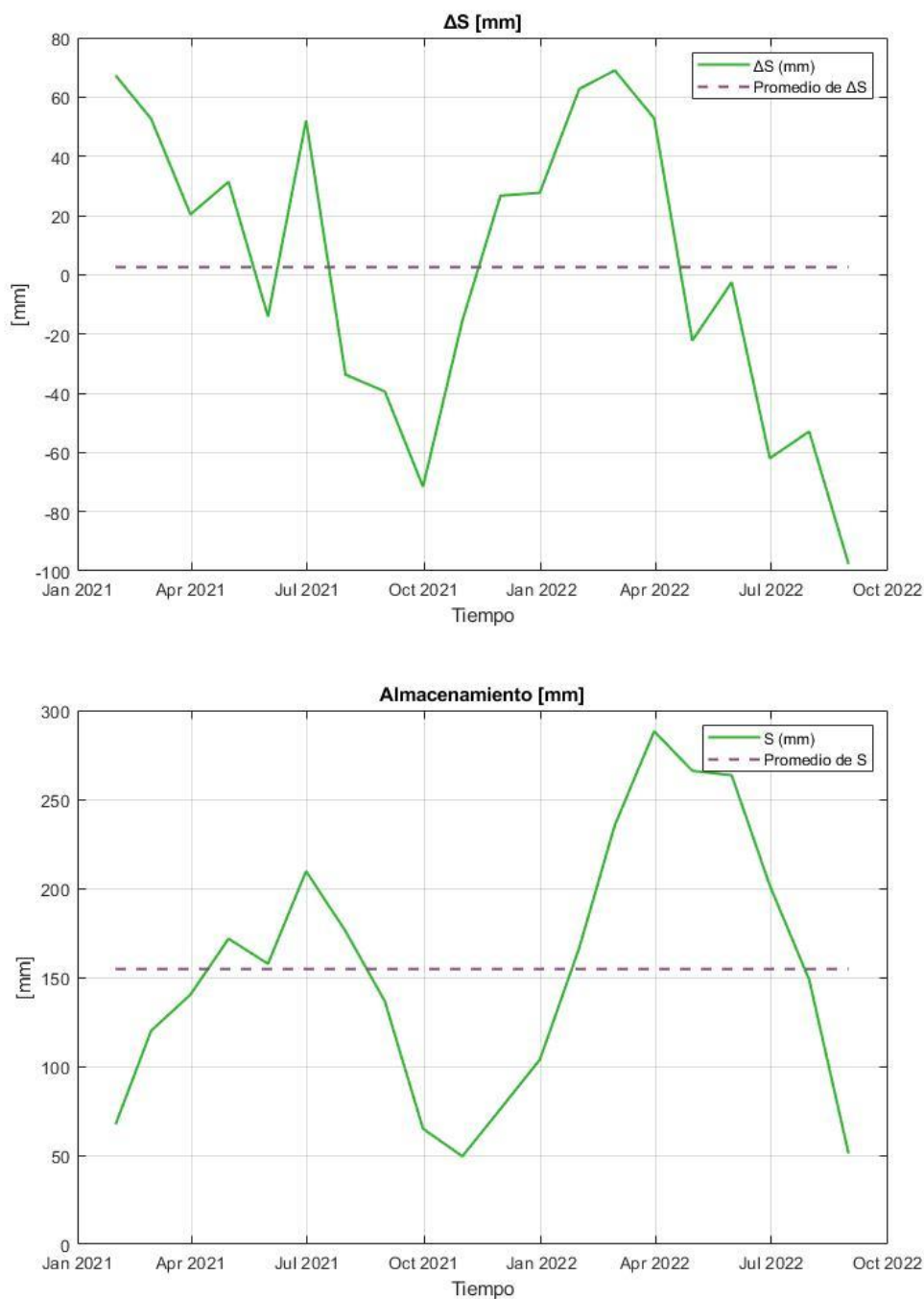
Durante el periodo de análisis (enero 2021 – agosto 2022), la cuenca precipita 7900.85 mm, 867.95 mm se transforma en evapotranspiración real, 6981.93 mm es la escorrentía, lo que ha promovido un almacenamiento de 50.97 mm al final del periodo de estudio. Por ende, se evidencia que el 88.37% de la precipitación se convierte en escorrentía, el 10.99% de la precipitación total es evapotranspiración real y el 0.65% de la precipitación total es el almacenamiento en la cuenca hasta el final del periodo de análisis; ahora bien, anualmente la cuenca del Río Topo recibe 4658.63 mm de precipitación, 532.98 mm corresponde a la evapotranspiración real (11.44% de la precipitación anual) y 4116.53 mm es la escorrentía (88.36% de la precipitación anual), presentando un almacenamiento en promedio anual de 141.19 mm (3.03% de la precipitación anual) y un exceso anual de 218.88 mm (4.70% de la precipitación anual).

Por ejemplo, las microcuencas del cantón Joya de los Sacha (noreste de la cuenca del Río Topo) que proveen de agua a la cuenca del Río Napo presenta el 17% de la precipitación (4534 mm) que se convierte en escorrentía (800.55 mm), el 32.5% se transforma en evapotranspiración (1475.23 mm) presentando un exceso de agua del 16.93% (767.7 mm) (Poma & Usca, 2020).

Duque et al. (2019), en el estudio de la estimación del balance hídrico en una cuenca tropical de los Andes en el Ecuador (microcuenca del Chilcay) en la provincia del Azuay, con un área de 20,92 km², estima un total de 843.7 mm de precipitación anual total, una evapotranspiración de 680.5 mm, un almacenamiento de 18.71 mm y un excedente de 144.5 mm; este almacenamiento se da dentro de un ecosistema de bosque y vegetación protectora. Otro estudio según Torres & Proaño (2018), en la cuenca del Jatun Sacha, presenta una precipitación (840.24 mm), la evapotranspiración real en esta zona es relativamente baja (237 mm), mientras que el caudal presenta una variabilidad significativa (89 mm), lo que resulta en un coeficiente de escorrentía bajo (10.6%); además, se ha identificado una alta tasa de percolación (513 mm), característica común en zonas con geología porosa.

Por otro lado, en la región costa, se tiene una dinámica distinta en cuanto al almacenamiento de agua, es el caso de la cuenca del Río Jipijapa, en donde presenta precipitaciones anuales de 52.6 mm, evapotranspiración anual de 163.8 mm, presentando deficiencia hídrica superficial lo que tiende a ser un balance hídrico negativo (Wajarai & Jaramillo, 2023). En el caso de la cuenca del Río Blanco ubicado en Santo Domingo, muestra un exceso de agua en 161.33 mm presentado 0% de arcilla en su suelo (Zambrano et al., 2021).

Figura 47. Balance hídrico en la cuenca del Río Topo



Fuente: Del autor.

En el (anexo K, se muestra una cartografía del déficit o exceso de agua en el Ecuador), se puede observar la disponibilidad de agua a nivel del territorio ecuatoriano, donde para el caso de este estudio, la disponibilidad de agua se encuentra en un margen superávit, mostrando tendencias de 125 a 325 mm de agua mensual. Por otra parte, el estrés hídrico en el área de la cuenca del Río Topo es bajo (en el anexo L, se muestra un mapa de estrés hídrico en el Ecuador). Ahora bien, el balance hídrico anual calculado para la cuenca del Río Topo en comparación al (Anexo K); en el mes de enero la cuenca evidencia un balance hídrico de

116.91 mm a comparación del (Anexo K) que lo sitúa en el rango de (125.1 – 225) mm, en cambio en el mes agosto la cuenca estima un balance hídrico de 93.74 mm a comparación del (Anexo K) que lo sitúa en el rango de (75 – 125) mm (Tabla 17).

Tabla 17. Almacenamiento mensual de agua en la cuenca del Río Topo

Tiempo	S (mm)
Enero	116.91
Febrero	177.73
Marzo	214.31
Abril	218.88
Mayo	210.55
Junio	205.61
Julio	162.30
Agosto	93.74
Septiembre	64.96
Octubre	49.41
Noviembre	76.10
Diciembre	103.79
Promedio	141.19

Fuente: Del autor.

Modelo SWAT

Calibración del Modelo SWAT

Luego de 600 simulaciones en el modelo SWAT-CUP, se obtuvieron los siguientes parámetros de calibración (tabla 18); donde la simulación 309 es la que presenta las mejores métricas estadísticas entre los caudales observados vs los caudales simulados.

Tabla 18. Parámetros empleados en la calibración del modelo SWAT

Sim_No.	309
1:V__ALPHA_BF.gw	0.3951
2:V__GW_DELAY.gw	3.5099
3:V__GW_REVAP.gw	0.1008
4:V__GWQMN.gw	2965.0042
5:V__REVAPMN.gw	37.5093
6:V__ESCO.hru	0.5337
7:V__EPCO.hru	0.4684
8:V__CANMX.hru	28.9071
9:V__TIMP.bsn	0.1753
10:V__SMFMX.bsn	7.4525
11:V__SMFMN.bsn	4.1558
12:V__SFTMP.bsn	3.2585

13:V__SMTMP.bsn	1.4721
14:V__SURLAG.bsn	9.579
15:V__CH_K2.rte	59.7576
16:V__CH_N2.rte	0.136
17:R__CN2.mgt	0.2922
18:V__TLAPS.sub	-1.38
19:V__SHALLST.gw	413.0059
20:V__DEEPST.gw	1975.0061
21:V__RCHRG_DP.gw	0.9356
22:V__GWHT.gw	6.8822
23:V__GW_SPYLD.gw	0.3871
24:V__BIOMIX.mgt	0.7535

Fuente: Del autor.

Resultados del Modelo SWAT

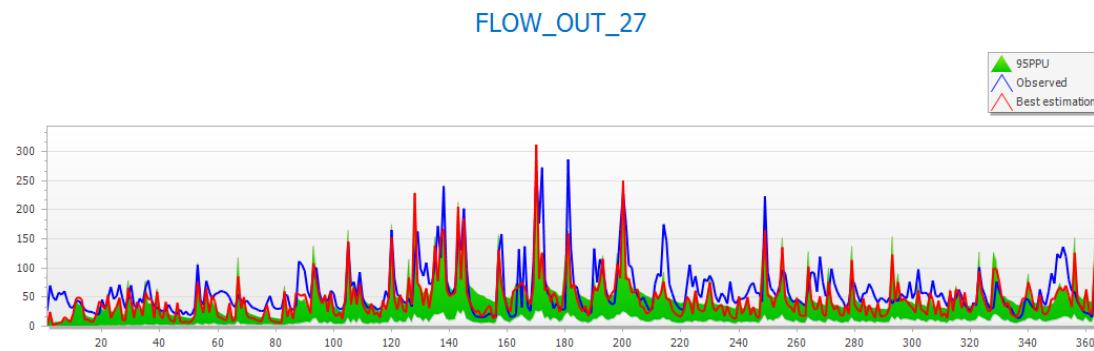
Para este estudio las métricas estadísticas dieron los siguientes resultados (tabla 19); como se puede dar a notar, las métricas estadísticas entre los caudales observados vs los simulados se encuentran en un margen medianamente razonable. Esto se debe a que el modelo SWAT primero necesita datos climáticos de unos dos años atrás como periodo de calentamiento; además, necesita datos climáticos históricos que brinden un mejor rendimiento al modelo, otra de las posibilidades podría darse por un mal registro de caudales medidos en campo. Cabe mencionar que las métricas estadísticas fueron obtenidas solo para el periodo de calibración (periodo de estudio) omitiendo el periodo de validación, ya que no se contó con más información climática a escala diaria.

A continuación, se presenta un hidrograma del caudal simulado vs caudal observado del año (2021) (figura 48). A partir del mejor caudal simulado en SWAT-CUP para un año hidrológico de la serie de datos (año 2021), se obtuvieron los parámetros de calibración mostrados en la (tabla 17), los cuales sirvieron para calibrar todo el periodo de estudio de la cuenca del Río Topo (enero 2021 – agosto 2022) en el modelo SWAT (figura 49).

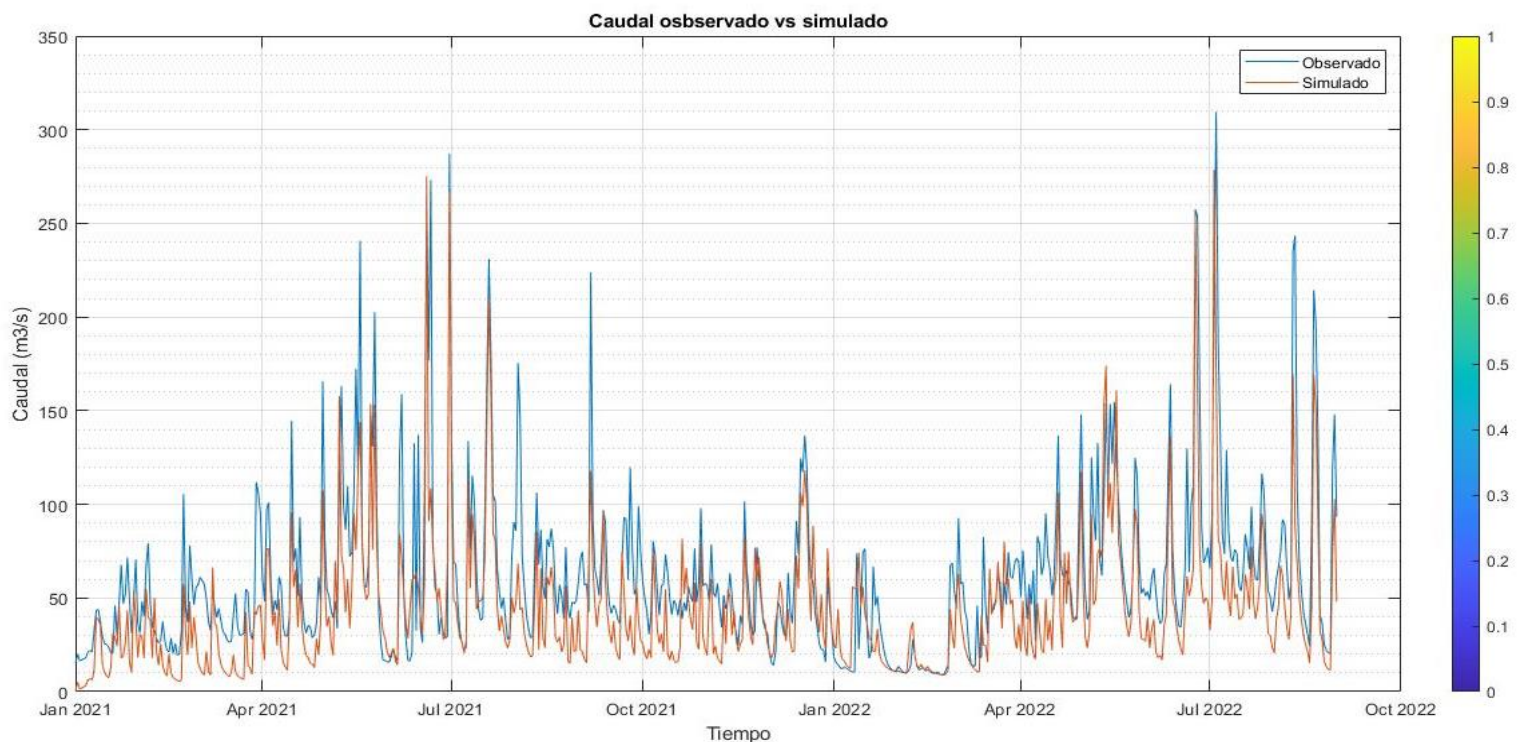
Tabla 19. Resultados de las métricas estadísticas en la calibración del modelo SWAT

Criterios	Valor	Clasificación
R ²	0.69	Satisfactorio
NASH	0.53	Satisfactorio
PBIAS	-29.18	No Satisfactorio

Fuente: Del autor.

Figura 48. Caudal medido y simulado con SWAT-CUP periodo de un año (año 2021)

Fuente: Del autor.

Figura 49. Caudal observado vs simulado con SWAT para el periodo de estudio

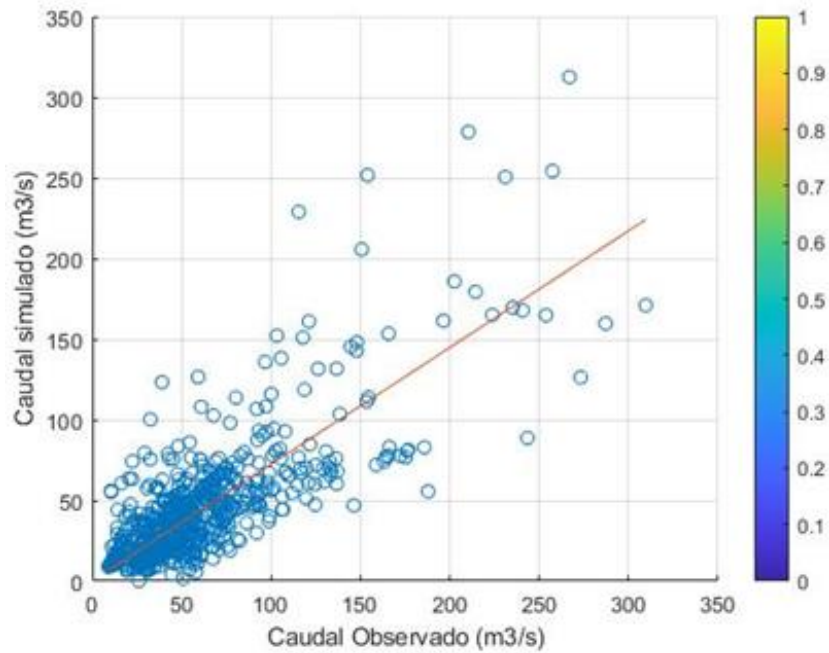
Fuente: Del autor.

A continuación, (figura 50 y 51), se da a conocer una gráfica de dispersión tanto para los caudales (simulados vs observados) como para la evapotranspiración real (simulada vs observada) luego de la calibración en SWAT. Como se puede ver, el modelo refleja una mejor predicción de datos en la evapotranspiración real para la cuenca del Río Topo.

Figura 50. Dispersión de los caudales (simulados vs observados)

$$y = 0.681x + 1.6857$$

$$R^2 = 0.69$$

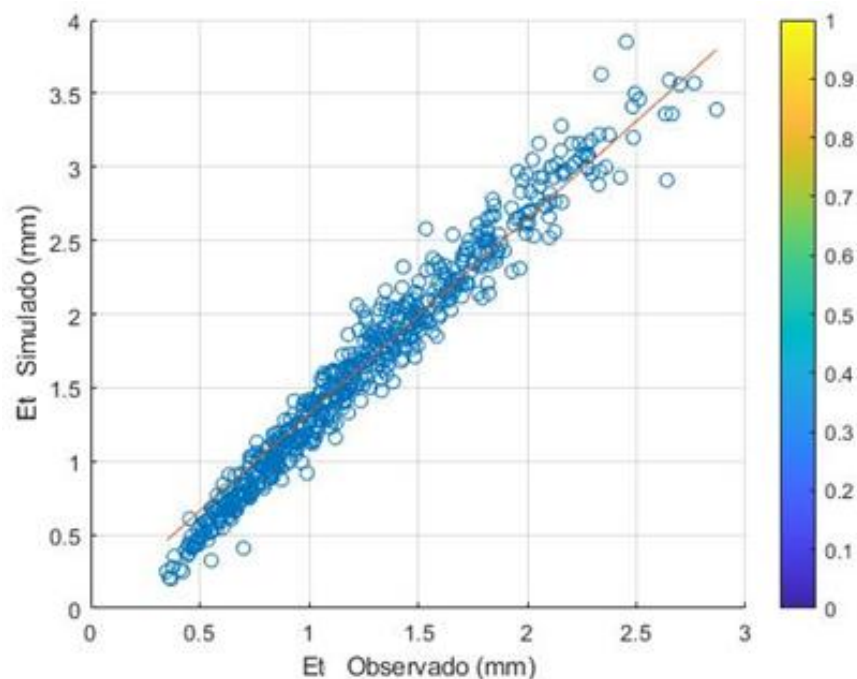


Fuente: Del autor.

Figura 51. Dispersión de la evapotranspiración real (observados vs simulados)

$$y = 1.4443x - 0.1755$$

$$R^2 = 0.97$$



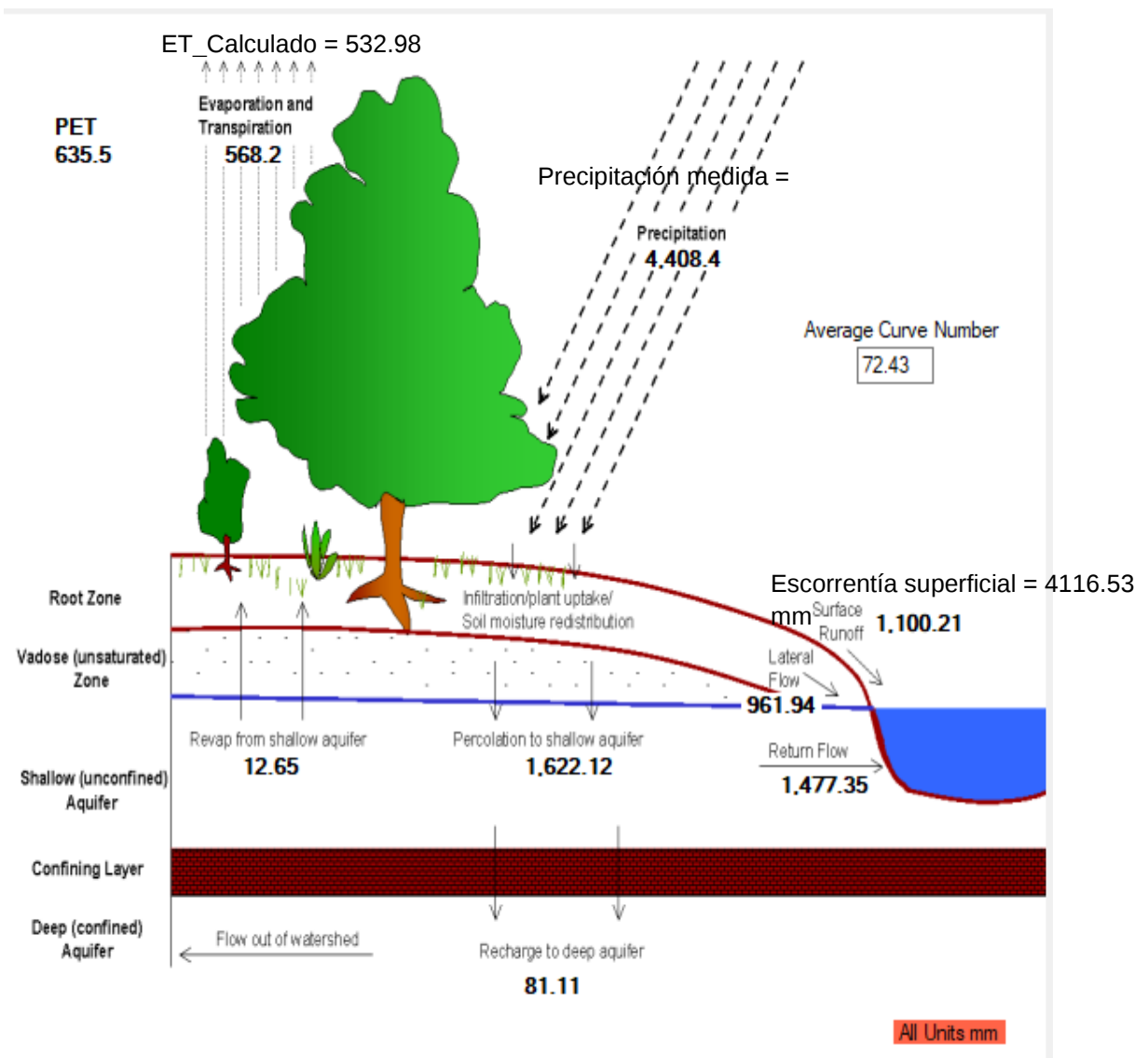
Fuente: Del autor.

A continuación, se representa un gráfico donde se reúne las características del ciclo hidrológico simulado por el modelo SWAT. Además, se tiene la comparación de los resultados obtenidos del ciclo hidrológico tanto en la modelación como en lo calculado (figura 52). Se

muestran los resultados del balance hídrico generado por el modelo SWAT para el periodo (1/enero/2021-31/agosto/2022). La simulación muestra la dinámica reflejada en la precipitación, evapotranspiración y escurrimientos dentro de la cuenca.

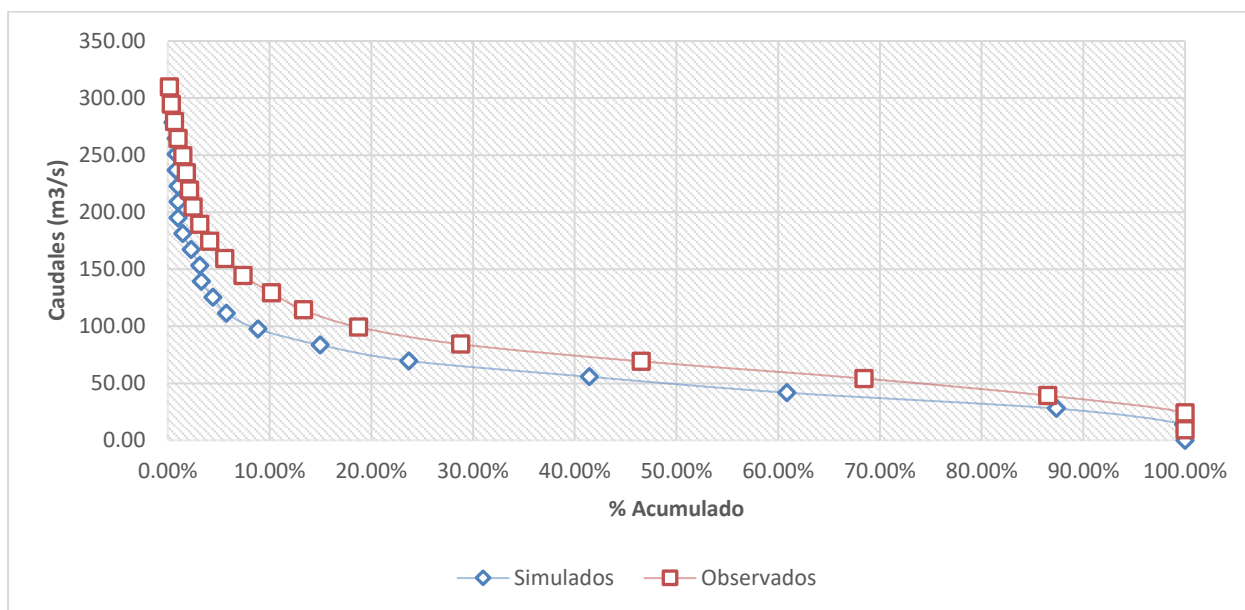
El modelo SWAT sería muy accesible y factible mientras se implemente más información detallada. De la misma manera, se ha procedido a calibrar los parámetros del modelo SWAT, porque esos valores están optimizados para climas en Estados Unidos (Gomariz & Alonso, 2018). La precipitación media anual de la cuenca alcanza los 4658 mm/año en base a los datos cuantificados por la empresa ECUAGESA, mientras que el modelo SWAT estima 4408 mm/año. El valor de evapotranspiración real calculado en la cuenca del Río Topo durante un año hidrológico fue 532.98 mm/año frente a 568.2 mm/año estimado en el modelo SWAT, si bien se observa un incremento del 6.20% en el modelo a comparación del valor calculado, esto se refleja también en el estudio de Contreras et al. 2006, donde presenta un valor de evapotranspiración calculado de 292 mm frente a los 315 mm estimado en el modelo SWAT (incremento del 8%). El valor de la escorrentía se refleja en 4116.53 mm/año frente a 3539.5 mm/año estimado en el modelo, incremento del 14.02%.

Figura 52. Representación del ciclo hidrológico en la cuenca por medio del SWAT



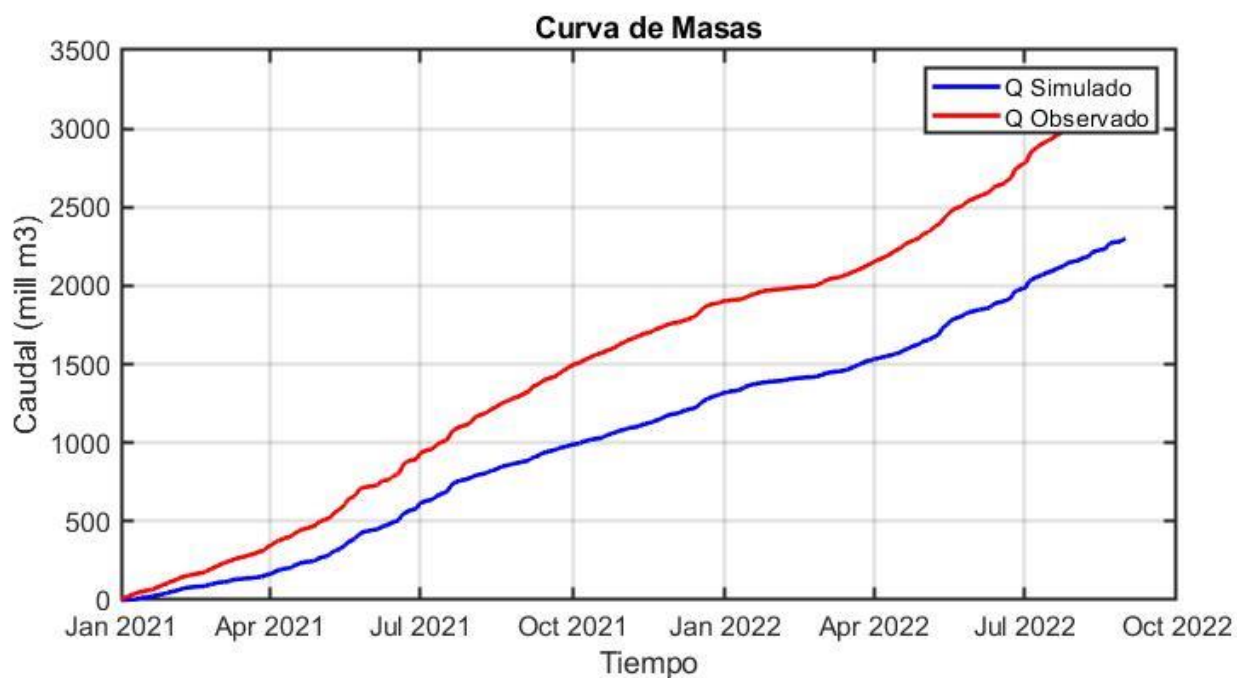
Fuente: Del autor.

En la (figura 53), se puede apreciar un gráfico de la curva de duración de los caudales simulados vs los observados, donde se observa la semejanza de la tendencia de su curva es bastante similar. Para los caudales observados se tiene un caudal ($24.15 \text{ m}^3/\text{s}$) el cual es frecuentemente igualado o excedido en un 100%, mientras que para los caudales simulados es de $13.94 \text{ m}^3/\text{s}$. Caudales con menor ocurrencia (0-20)%, se encuentran en un rango ($100 - 300 \text{ m}^3/\text{s}$), para los caudales observados; mientras que, para los caudales simulados, se encuentran entre ($70 - 280 \text{ m}^3/\text{s}$). Presentado un rango de error medio del 14% en la curva de duración de los caudales observados vs los simulados.

Figura 53. Curva de duración de los caudales observados vs simulados

Fuente: Del autor.

A continuación, (figura 54), se representa la cantidad total de agua durante el periodo de estudio (1/enero/2021 – 31/agosto/2022) tanto para los caudales observados como para los simulados; donde se observa que los caudales observados transportan un volumen total de agua de 3248.23 mill de m³, mientras que los caudales simulados transportan un total de agua de 2300.62 mill de m³, presentando un error medio del 29.17%.

Figura 54. Curva másica de los caudales observados vs simulados

Fuente: Del autor.

Características Generales de la Eficiencia Hídrica en la Cuenca

Potenciales Lugares en donde Puede Estar Almacenando el Agua en la Cuenca

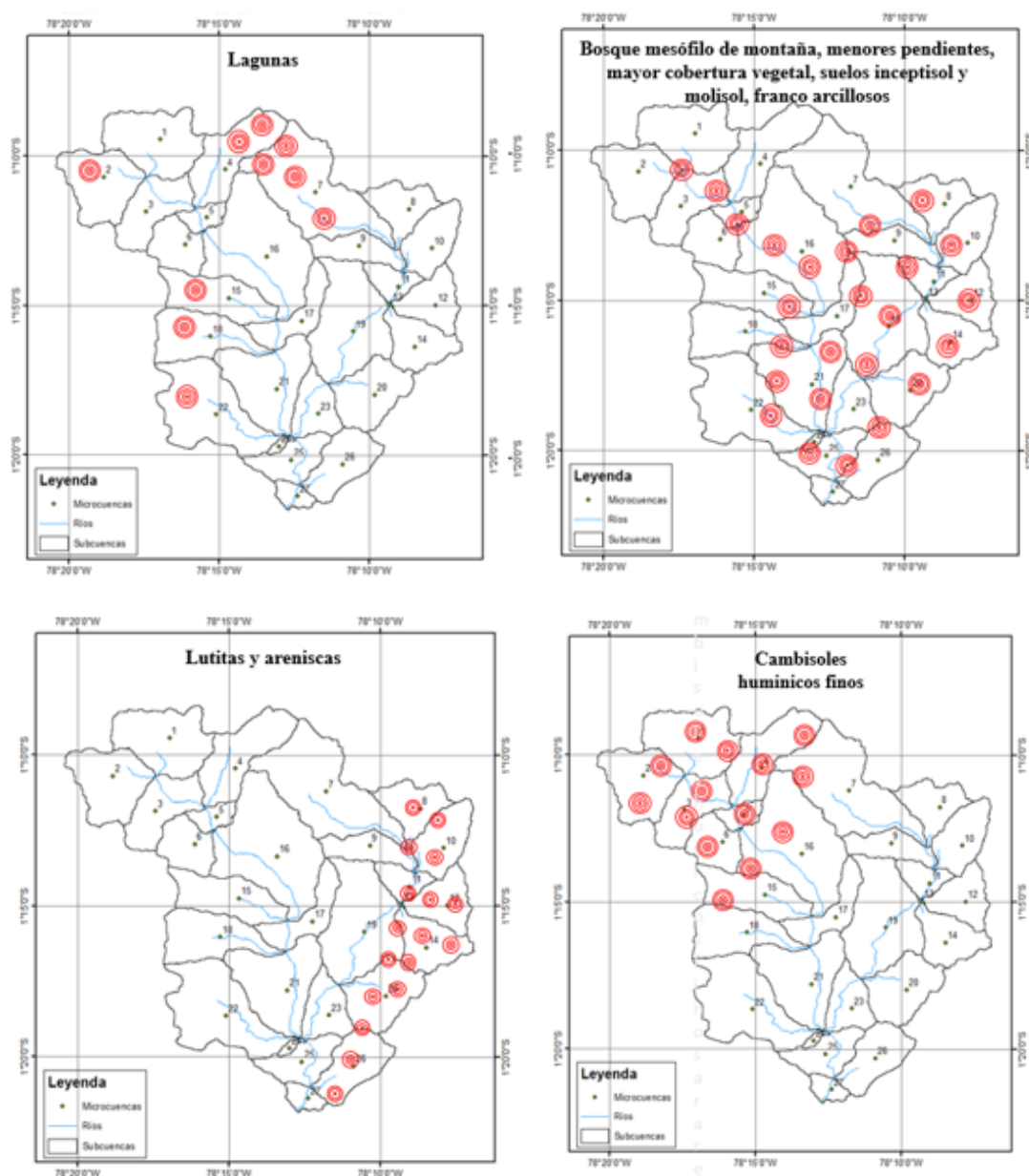
Como se puede apreciar en la (figura 55), los potenciales lugares donde se podría almacenar el agua en la cuenca del Río Topo estarían en primer lugar en las áreas de lagos y lagunas, estas áreas se localizan en las zonas altas de la cuenca, al noreste; estas áreas (lagos y lagunas) se sitúan en la cordillera de los Llanganates, los cuales actúan como reservorio de agua, estos reservorios son normalmente alimentados por las precipitaciones y arroyos que nacen en las montañas. Si se indaga sobre las fuentes donde se almacena agua en la Amazonía, estas estarían asociadas a ríos, lagos y humedales (Astaburuaga, 2004).

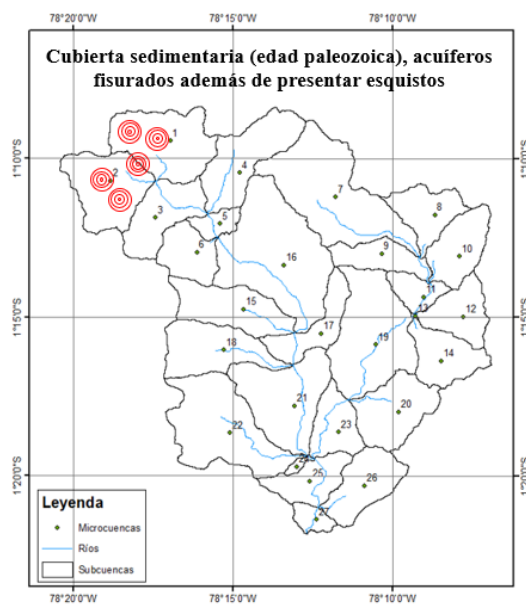
Otras regiones donde pudiese estar una reserva de agua son en las áreas ubicadas más al sureste dirección amazónica; ya que visualmente la cuenca está formada por cadenas montañosas que dan un aspecto de bosque mesófilo de montaña y según Santillán et al. (2020), este tipo de bosque es un buen captador de agua; por lo que, en la zona baja de la cuenca es donde se genera un superávit de agua por intercepción del agua precipitada en su follaje y escurrida por los troncos. A su vez, como la cuenca está protegida por el Parque Nacional Llanganates en su mayor área, la cuenca está en estado natural, no presenta intervenciones silvícolas en su bosque; por lo que, no sufre de estrés hídrico o variaciones en sus reservas de agua del suelo, evapotranspiración y percolación.

Por otra parte, los suelos de orden inceptisol presentes en estas regiones, muestran una textura del suelo preponderante limo-arcilloso. Este tipo de suelo tiene capacidad de retener el agua según Santos (2014). También en estas regiones más cercanas a la Amazonía, la geología que presenta está conformada por lutitas y areniscas que al ser rocas sedimentarias tienen una gran capacidad para retener agua, ya que están conformadas por arcillas, tienen una naturaleza porosa, lo cual permite el almacenamiento de agua entre sus poros y alimenta a las aguas subterráneas y estos pueden actuar como acuíferos naturales (Duque et al., 2019).

Finalmente, en las partes más altas de la cuenca donde nace el Río Topo, se encuentra un tipo de suelo formado por cambisoles humínicos finos, este tipo de suelo establecido por la FAO, son suelos que presentan una gran capacidad para retener agua, debido a su estructura porosa que ayuda a la infiltración. Por otra parte, en las áreas de la cordillera de los Andes (noroeste) la cuenca se desarrolla bajo una cubierta sedimentaria (edad paleozoica) que según Senisterra et al. (2014), pueden dar origen a los sistemas subterráneos (acuíferos fisurados).

Figura 55. Potenciales lugares de almacenamiento de agua en la cuenca del Río Topo





Fuente: Del autor.

Potencial Relación de la Dinámica Hídrica con la Morfometría, Cobertura Vegetal y Geología de la cuenca del Río Topo

En función de su morfometría, la cuenca posee altas elevaciones que llegan hasta los 4809 msnm lo que establece que nace en la cordillera de los Andes (Llanganates). Parte del almacenamiento de agua se presenta en las áreas lagunares (1.52 km²) o en ciénegas o bofedales localizados en su mayoría en estas zonas altas de la cuenca. En las zonas altas de la cuenca donde se presentan lagunas, estas pueden ser alimentadas por los acuíferos y a su vez son áreas con materiales de baja permeabilidad (Rodríguez et al., 2017). La cuenca al tener el 1.52 km² de su área cubierta por lagunas, se podría presentar esta dinámica.

La pendiente media de la cuenca (45%), es pronunciada debido a su relieve de altas montañas; a su vez, esta cuenca por su pendiente pronunciada, facilita el escurrimiento superficial del agua; en adición, la infiltración del agua no se genera fácilmente, ya que va ligado con la pendiente y una gran velocidad que tiene una gota de agua al transitar por la superficie (García, 2021). Según Schosinsky & Losilla (2000), indica que, si existe una menor pendiente en el terreno y una mayor cobertura vegetal, la velocidad de escurrimientos llega a retrasarse, lo que provoca que mayor sea su infiltración, pero la cuenca del Río Topo tiene pendientes de mayor magnitud, suelo impermeable y abundante cobertura vegetal, lo que podría generar un mayor escurrimiento del agua y baja infiltración. La cuenca presenta muy pocos relieves planos por lo que el traslado del agua superficial es rápido; al presentar suelos limo arcillosos (zona baja de la cuenca) tiene facilidad para compactarse y a la vez que no provocan procesos de fisuración y los niveles de esorrentía aumentan (Sasal, 2012).

Por otra parte, Marchesini et al. (2009), indica que un cambio en el estrato arbustivo o herbáceo (cobertura vegetal) podría generar afecciones fuertes a la dinámica del agua

(disminución de la evapotranspiración y aumentar el almacenamiento de agua en el suelo); sin embargo, en la cuenca del Topo no se presenta dichos cambios en su estrato.

En el relieve escarpado, por lo general se localizan las rocas metamórficas (esquistos) característicos en pendientes mayores al 50% (Sánchez, 2018). Según Mejía et al. (2021), los esquistos constituyen áreas de conducción y retención de humedad, que ayudan a la producción de cauces, el mantenimiento de su flujo base y la transmisión hídrica hacia los acuíferos o depósitos subterráneos; además, según Salcedo & Ramirez (2015), los esquistos son rocas metamórficas que presentan porosidad y permeabilidad baja. Los esquistos se localizan en los nacimientos del Río Topo (área andina).

La cuenca al estar conformada por materiales metamórficos y graníticos; según este tipo de material favorece al río lo que ayuda a mantener un caudal permanente a largo de un año hidrológico (Cabrera et al., 2015). En adición, las rocas graníticas ejercen controles en la disponibilidad de agua distintamente de la región (Centeno & García, 2008). El suelo granítico en la cuenca del Río Topo se localiza en el nacimiento del Río Topo y también en dirección este hacia la Amazonía.

El contenido de material de grava también se presenta en la cuenca, este material presenta mejoras en el almacenamiento de agua en el suelo aproximadamente hasta unos 15 cm de profundidad, pero este material no ayuda al contenido de agua a niveles más profundos de suelo (Delgadillo et al., 2022). Sumando a esto, las rocas meta-volcánicas y meta-sedimentarias que conforman la cuenca, reducen a la posibilidad de recargas en acuíferos porque actúan como material cementante e impermeable, por lo que las aguas precipitadas no logran infiltrarse hasta llegar a recargar los acuíferos; por tanto, estas aguas se mueven por escurrimiento superficial (Herrera & Moreno, 2022). En este estudio no se pudo establecer la ubicación y porcentaje de estos tipos de materiales geológicos en la cuenca.

En los ecosistemas con suelos con alta porosidad, existen mayormente flujos subterráneos (Cervantes, 2007). El suelo en la cuenca del Río Topo está cubierto por un suelo limo arcilloso plástico de permeabilidad media a baja (zona baja de la cuenca); por ende, se localizan porosidades bajas y a su vez lo que genera los niveles altos de escorrentía superficial. A su vez, las metalavas (zona baja de la cuenca), se relacionan con la profundidad del suelo, pero tiene propiedades que no permiten el paso del agua a través del suelo y proceden a sobresaturar las capas superiores del suelo favoreciendo el movimiento del agua (Pineda, 2012).

Por otra parte, la cuenca posee una altura máxima, media y mínima es de 4809, 2683 y 1291 msnm respectivamente. El factor de forma de la cuenca es de 0.43 lo que resulta en las crecidas moderadas de su caudal, presenta un orden 6 lo que se ve reflejado en tener un sustrato que no es muy duro y en su cobertura vegetal abundante, el índice de bifurcación es

de 4.5 valor que se ve reflejado en su torrencialidad, el valor de la densidad de drenaje es de 2.14, causa probable de su escurrimiento alto y a la vez que presenta suelos impermeables y menos infiltración. El relieve que muestra es accidentado y según Urrego (s.f.), una topografía accidentada influye en la presencia de grandes concentraciones de agua en su esorrentía o almacenamiento hídrico.

Como la zona baja de la cuenca presenta un clima húmedo, se pueden encontrar pastizales húmedos; en donde, según Jobbágy et al. (2013), presentan niveles freáticos cerca de la superficie, pero una baja capacidad de transpiración a comparación de los bosques y cultivos; como también, la forestación de cobertura pastizal puede mermar el reabastecimiento de agua subterránea, generando depreciaciones en el manto freático y reducción del agua subterránea; sin embargo, este aspecto no afectaría a la reducción de agua en la cuenca del Topo, porque el área de estos pastizales representa el 6.20% del área total de la cuenca.

Como las condiciones del suelo en la cuenca del Río Topo no han sido modificadas por diligencias agropecuarias, los rasgos morfométricos no se ven afectados; por lo que, no hay una afección en el almacenamiento de agua en la cuenca; al mismo tiempo, las actividades ganaderas no se ven a menudo en la cuenca; por tanto, no se da el pisoteo por parte de los animales para compactar y dejar pocos espacios porosos en el suelo, entonces no se ve afectado la capacidad de retención de agua, la permeabilidad, estructura, porosidad y consistencia (Daza et al., 2014).

Características Generales de la Dinámica Hídrica en la Cuenca del Río Topo en Base a los Resultados del Modelo SWAT

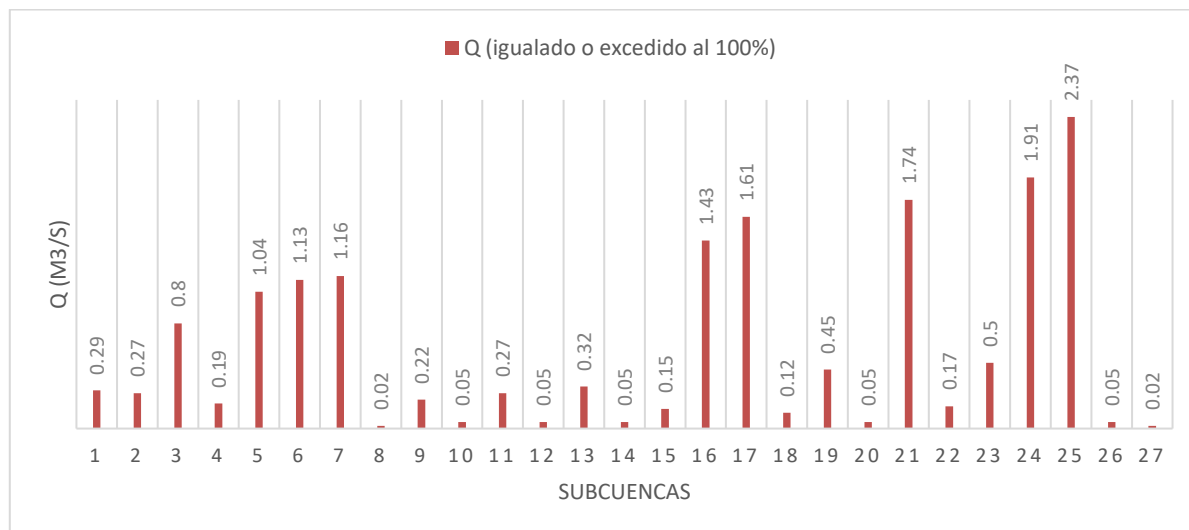
Para el periodo de estudio en esta investigación (enero 2021 – agosto 2022) a escala diaria; en la (tabla 22), se da a conocer un resumen de las características morfométricas e hidrometeorológicas que se sustenta en cada subcuenca de la cuenca del Río Topo. A continuación, se detalla un breve análisis de cada una de estas características. En la (tabla 23), se da a conocer las características hidrometeorológicas y morfométricas tanto del área de la cordillera como de la Amazonía, en donde la región amazónica de la cuenca presenta los mayores valores de caudal, evapotranspiración y mayor almacenamiento de agua; mientras que en la región Andina muestra los mayores valores en las pendientes, mayor porcentaje de área de la cuenca y un mayor caudal específico.

Curvas de Duración por Subcuencas

Como se observa en la (figura 56), las subcuencas que se localizan al exterior de la cuenca (localizados cerca a la divisoria de aguas), donde habitualmente nacen los primeros ríos que alimentan al río principal, tienden a presentar bajos caudales de ocurrencia; conforme las subcuencas se generan en el centro de la cuenca, estos caudales de ocurrencia comienzan a crecer paulatinamente, donde en las subcuencas ubicadas aguas abajo llegan a presentar

caudales más grandes, pero este factor no están ocurriendo, ya que en la última subcuenca (27) presenta el caudal más bajo de ocurrencia. *(En el anexo M, se muestran las curvas de duración de cada subcuenca).*

Figura 56. Caudales de la curva de duración de cada subcuenca



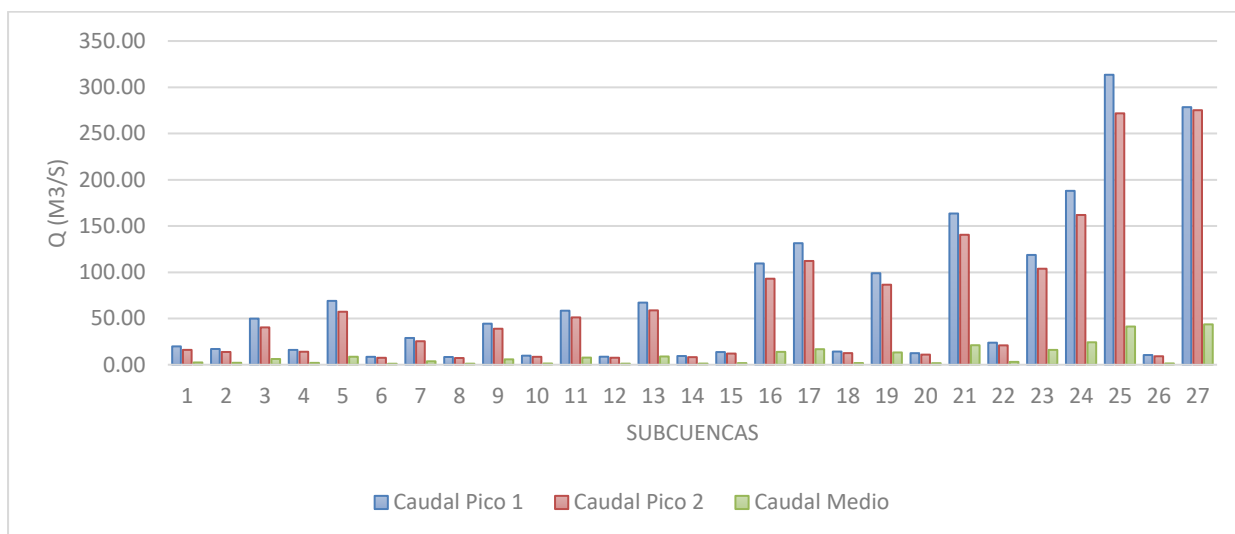
Fuente: Del autor.

Caudales Picos y Caudales Medios por Subcuencas

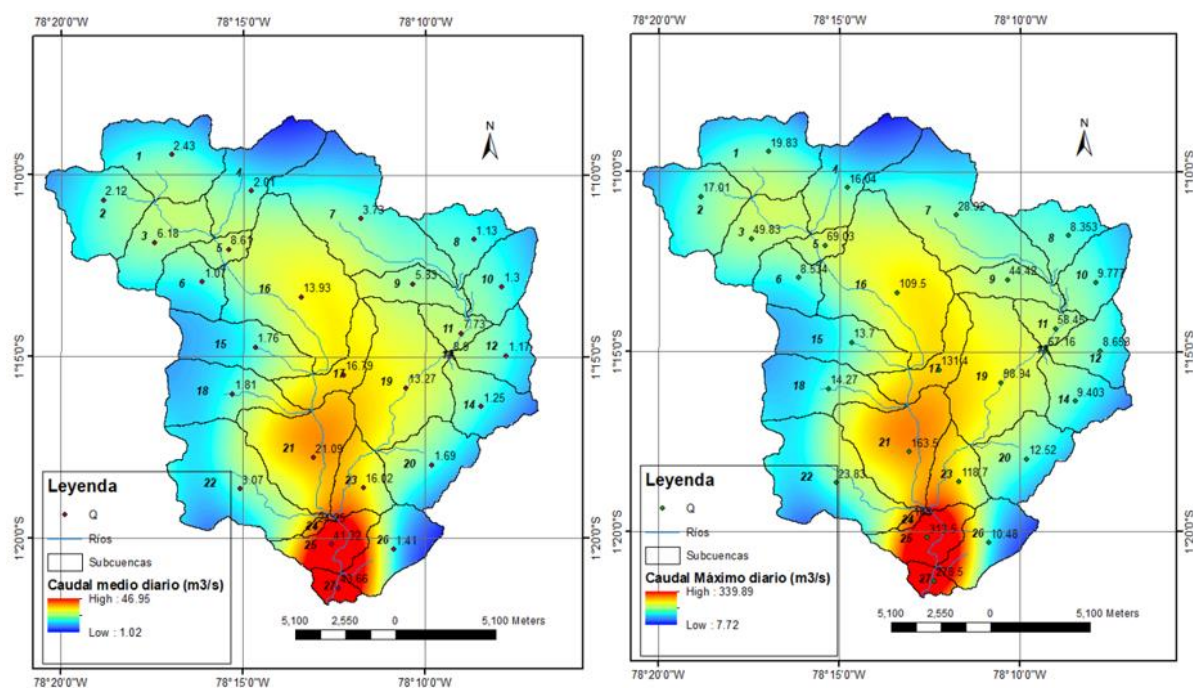
Primeramente, el comportamiento de los caudales para cada una de las subcuencas que conforman la cuenca del Río Topo, tiene una dinámica similar presentando un comportamiento bimodal en cada hidrograma. *(En el anexo N, se muestra el hidrograma de cada subcuenca).*

En la siguiente (figura 57), se da a conocer los caudales picos y caudales medios pertenecientes a cada subcuenca; los caudales picos ocurren simultáneamente el mismo mes de cada año (en los primeros quince días de junio). Las subcuencas que se encuentran aguas arriba; presentan caudales picos que rodean aproximadamente los 12.34 m³/s en promedio, estos pertenecen a los ríos nacientes que se encuentran en las primeras subcuencas. Luego, las subcuencas que se localizan más al interior de la cuenca; rodean caudales picos aproximados a los 53.55 m³/s y 105.27 m³/s en promedio; a su vez, subcuencas localizadas aguas abajo llegan a tener caudales picos de 201.54 m³/s en promedio.

Como se puede ver, el caudal es mínimo en áreas cercanas a los límites de la cuenca, estas están ubicados en áreas de mayor altitud; más al centro de la cuenca, se llega a tener un aumento de caudal y a la salida de la cuenca (parte más baja) es donde se concentran su mayor caudal. En la (figura 58), se representa un esquema de la dinámica de los caudales medio y pico en la cuenca del Río Topo para cada subcuenca.

Figura 57. Caudales pico y caudales medios para cada subcuena

Fuente: Del autor.

Figura 58. Caudales pico y caudal medio diario para cada subcuena

Fuente: Del autor.

Respuesta Hidrológica en base a la Evapotranspiración Real en Cada Subcuena

En la siguiente (figura 59), se muestran los resultados de la evapotranspiración real máxima, mínima y media diaria de cada subcuena; en donde, se puede detallar la dinámica del comportamiento de la evapotranspiración real. Se observa que en las subcuenas localizadas más hacia el noreste (áreas altas) es donde se tiene la menor evapotranspiración, conforme se avanza hacia el sureste, la evapotranspiración comienza a aumentar paulatinamente, esto se debe a la topografía y cobertura vegetal que presenta la cuenca; por ende, en la zona

donde se tiene la presencia de la cordillera de los Andes se tiene una evapotranspiración real menor a comparación de las áreas más cercanas hacia la Amazonía ecuatoriana.

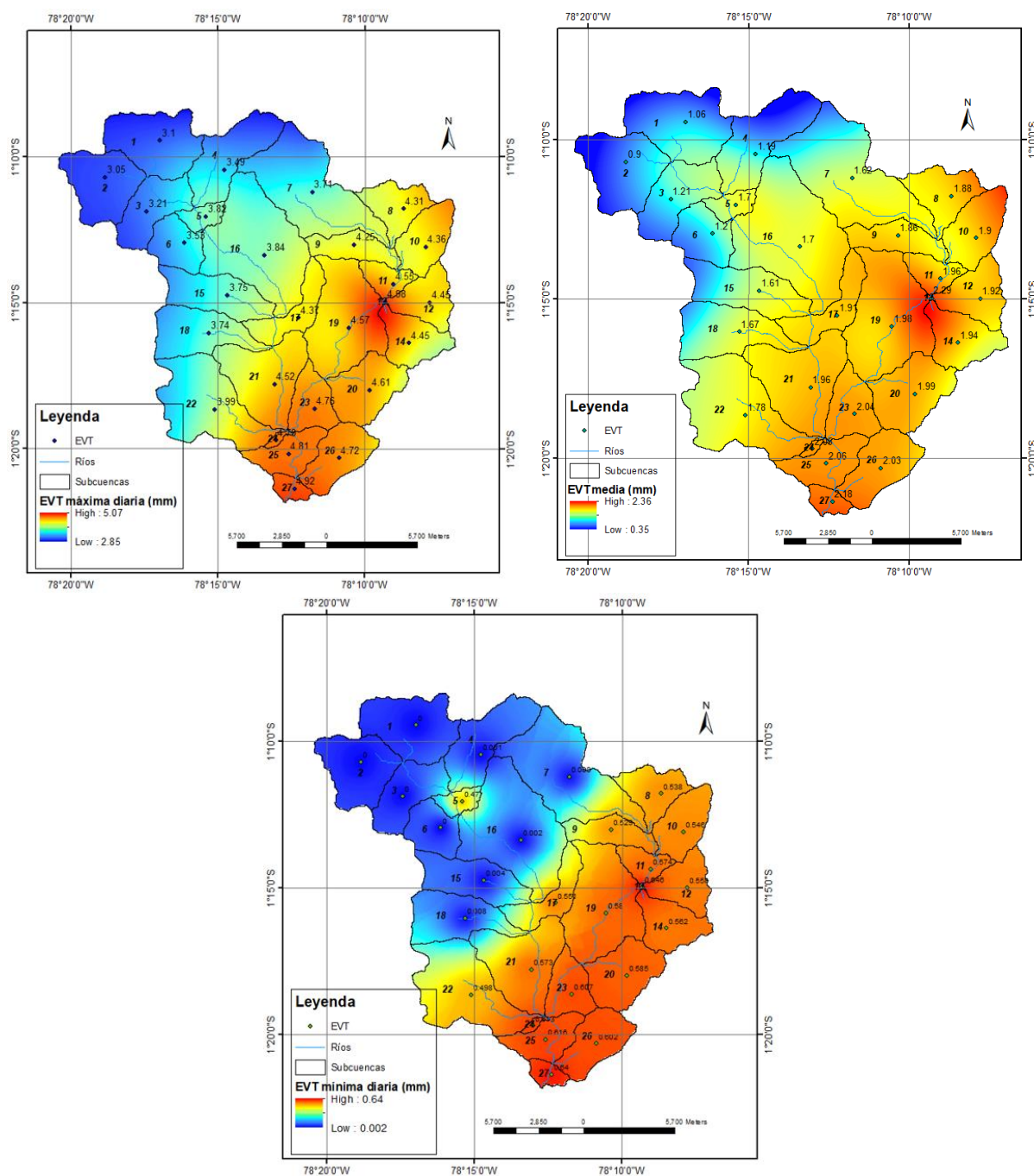
A su vez; en la Amazonía, la evapotranspiración es más alta a causa de las altas temperaturas, humedad y presencia de una densa cobertura vegetal (bosques) y como son regiones húmedas y cálidas contribuyen a las altas tasas de evapotranspiración. En la cordillera de los Andes (áreas altas), la temperatura es más fría y la cobertura vegetal es más escasa por lo que la evapotranspiración tiende a ser menor (tabla 20).

Tabla 20. Cobertura vegetal vs evapotranspiración

Subcuenca	Tipo de suelo	Cobertura vegetal	ET máximo (mm/día)	ET medio (mm/día)	ET mínimo (mm/día)
1	I-Bh-c	RNGE	3.1	1.07	0.00
2	I-Bh-c	FRSE	3.05	0.90	0.00
3	Bh3-3c	FRSE	3.21	1.21	0.00
4	Bh3-3c	RNGE	3.49	1.19	0.00
5	Bh3-3c	FRSE	3.82	1.70	0.47
6	Bh3-3c	RNGE	3.53	1.20	0.00
7	I-To-c	RNGE	3.71	1.63	0.01
8	I-To-c	FRSE	4.31	1.89	0.54
9	I-To-c	FRSE	4.25	1.87	0.53
10	I-To-c	FRSE	4.36	1.91	0.55
11	I-To-c	FRSE	4.55	1.97	0.57
12	I-To-c	FRSE	4.45	1.93	0.56
13	I-To-c	FRSE	4.98	2.21	0.65
14	I-To-c	FRSE	4.45	1.95	0.56
15	I-To-c	RNGE	3.75	1.62	0.00
16	I-To-c	FRSE	3.84	1.71	0.00
17	I-To-c	FRSE	4.37	1.92	0.55
18	I-To-c	RNGE	3.74	1.67	0.01
19	I-To-c	FRSE	4.57	1.98	0.58
20	I-To-c	FRSE	4.61	1.99	0.59
21	I-To-c	FRSE	4.52	1.97	0.57
22	I-To-c	FRSE	3.99	1.78	0.50
23	I-To-c	FRSE	4.76	2.05	0.61
24	I-To-c	FRSE	4.79	2.06	0.61
25	I-To-c	FRSE	4.81	2.07	0.62
26	I-To-c	FRSE	4.72	2.03	0.60
27	I-To-c	FRSE	4.92	2.18	0.64
Promedio			4.17	1.76	0.38

Fuente: Del autor.

Figura 59. Evapotranspiración real máxima, media y mínima en cada subcuenca



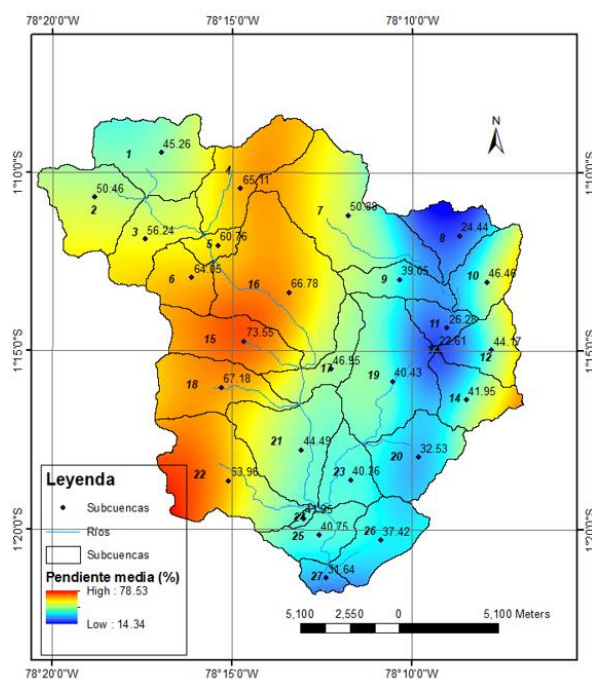
Fuente: Del autor.

Caudales Picos vs Pendientes Medias de Cada Subcuenca

En la (figura 60 y 61), se da a conocer es un esquema de la dinámica de la pendiente media que conforman las subcuencas en la cuenca del Río Topo, como se puede apreciar, las subcuencas englobadas en las áreas altas (cordillera) generan pendientes altas a comparación de las subcuencas en las zonas más bajas. Existen altos valores de caudal en las subcuencas localizadas aguas abajo; sin embargo, la pendiente en estas regiones es baja a comparación de las subcuencas aguas arriba. Esto se debe a que, en una cuenca

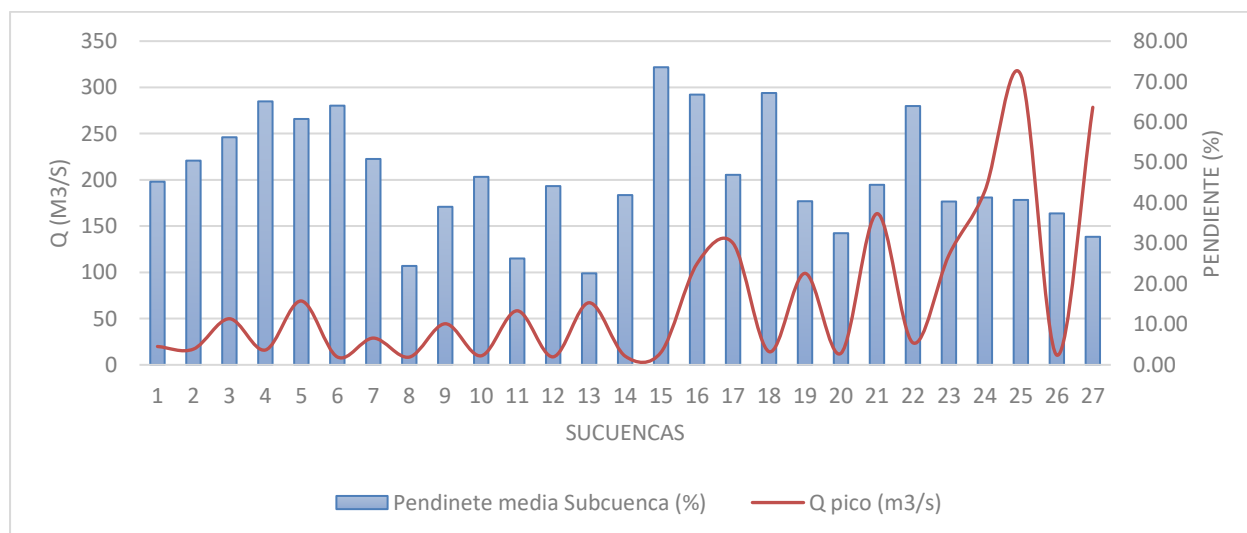
hidrográfica, el caudal aumenta a medida que se van receptando las aguas de cada drenaje de las subcuencas aledañas. Cabe recalcar, que en las subcuencas donde se dan los ríos nacientes, presentan altas pendientes y bajos caudales, mientras que en las subcuencas que reciben las aguas de los ríos nacientes presentan bajas pendientes y altos niveles de caudal.

Figura 60. Representación de la pendiente media de cada subcuenca



Fuente: Del autor.

Figura 61. Caudales picos vs pendientes medias de cada subcuenca



Fuente: Del autor.

Caudales Específico de Cada Subcuenca

Para determinar el caudal específico de cada subcuenca, se basó bajo el cálculo establecido por Grandjouan et al. (2018), donde indica que el caudal específico es la proporción entre el

caudal medio (m^3/s) y el área de la cuenca (km^2). En la siguiente (tabla 21), se da a conocer los diferentes parámetros morfométricos y el caudal específico de cada subcuenca.

Como se puede observar, en las áreas que tienen cadenas montañosas de los Andes mantienen un caudal específico de $0.12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$; mientras, que en el área amazónica su caudal específico es de $0.11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. En el Ecuador, los ríos de la región Andina como: Alao, Toachi, Matadero, Quijos, Alambi y Yanahurco presentan caudales específicos aproximados de $0.025 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ (Andrade & Ríos, 2014). Por otra parte, los caudales específicos en el Ecuador rodean valores mínimos de $0.0066 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ hasta $0.11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ (Laraque, Loup & Pombosa).

En nuestro estudio, para la región de los Andes, se tiene caudales específicos medios de $0.12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$; mientras que para la zona amazónica se tiene caudales específicos medios de $0.11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$; como se observa, se tiene valores altos aproximados a comparación del estudio establecido por Laraque, Loup & Pombosa (s.f.). *(En el anexo Q, se da a conocer los hidrogramas de caudales específicos para cada subcuenca).*

Tabla 21. Caudal específico generado en cada subcuenca

Subcuenca	Área (km^2)	Tipo de suelo	Cobertura vegetal	Pendiente media Subcuenca (%)	Caudal Específico ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)
1	19.78	I-Bh-c	RNGE	45.27	0.12
2	17.22	I-Bh-c	FRSE	50.47	0.12
3	13.16	Bh3-3c	FRSE	56.25	0.12
4	17.30	Bh3-3c	RNGE	65.11	0.12
5	3.59	Bh3-3c	FRSE	60.77	0.12
6	9.24	Bh3-3c	RNGE	64.06	0.12
7	32.27	I-To-c	RNGE	50.88	0.12
8	9.92	I-To-c	FRSE	24.44	0.11
9	8.40	I-To-c	FRSE	39.06	0.12
10	11.28	I-To-c	FRSE	46.46	0.12
11	5.19	I-To-c	FRSE	26.29	0.12
12	10.12	I-To-c	FRSE	44.18	0.12
13	0.08	I-To-c	FRSE	22.61	0.12
14	10.92	I-To-c	FRSE	41.96	0.11
15	15.05	I-To-c	RNGE	73.55	0.12
16	36.32	I-To-c	FRSE	66.79	0.12
17	9.62	I-To-c	FRSE	46.96	0.12
18	15.71	I-To-c	RNGE	67.18	0.12
19	27.22	I-To-c	FRSE	40.44	0.11

20	14.84	I-To-c	FRSE	32.54	0.11
21	21.75	I-To-c	FRSE	44.49	0.12
22	26.63	I-To-c	FRSE	63.96	0.12
23	9.27	I-To-c	FRSE	40.36	0.11
24	0.78	I-To-c	FRSE	41.36	0.07
25	9.21	I-To-c	FRSE	40.76	0.12
26	12.36	I-To-c	FRSE	37.43	0.11
27	3.02	I-To-c	FRSE	31.64	0.12
Promedio	13.17			46.86	0.12

Fuente: Del autor.

Almacenamiento de Agua Media Diaria a Través de los Datos Generados por SWAT

En la (figura 62), se da a conocer la producción hídrica en la cuenca del Topo; en donde, por medio del periodo de estudio a escala diaria (enero 2021 – agosto 2022), en el modelo SWAT, se evidencia que la cuenca tiene una producción de agua en promedio diaria de 293.42 mm, existe una mayor producción de agua en dirección hacia la Amazonía de la cuenca (subcuenca 24 evidencia una mayor producción hídrica). Presenta en promedio un valor de 325.69 mm en las regiones de la Amazonía y en las regiones Andinas, el almacenamiento promedio disminuye un aproximado del 24.32% (246.48 mm). En la zona baja de la cuenca (subcuenca 27) se determinó una producción hídrica media diaria de 221.62 mm; a comparación de lo estimado manualmente, que se calculó una producción media diaria de agua de 156.73 mm, dando como error del 29.28%.

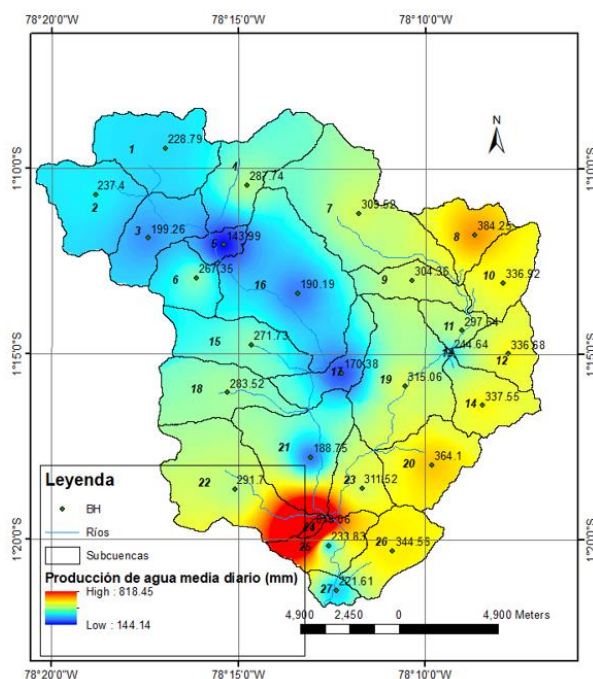
En el estudio realizado por Tamayo (2017), con el uso del modelo SWAT para la cuenca del Río Coca (133 296 km²), estimó una mayor producción hídrica en dirección de la Amazonía del Ecuador.

Según Chuncho (2019), la importancia de los ecosistemas de páramos es en su gran capacidad de almacenar y regular el agua que se resume por las precipitaciones y el descongelamiento de la nieve y el hielo que se localizan más arriba; además, indica que los suelos en los páramos tienen una baja densidad aparente, la vegetación con una morfología especial y acumulación de materia orgánica, lo que logra tener capacidad para el almacenamiento hídrico. La capacidad de almacenamiento de agua en las áreas altas de la cuenca procede de las lluvias, los deshielos y la condensación de la neblina; sin embargo, no hay duda de que la presencia de los bosques es de importancia para la captura y almacenamiento de agua (Morales et al., 2006)

Conforme a León et al. (2017), indica que los suelos de páramo tienen funciones directas de almacenamiento de agua. Por otra parte, Chamorro et al. (2017), también recalca que los suelos en los páramos con el gran contenido de materia orgánica que poseen, llegan a tener una gran capacidad de almacenamiento de agua, los páramos altos andinos suelen tener un

grado de acidez alta; por ende, mayor será la capacidad de retener agua; por otra parte, mantener la cobertura vegetal y las características de la estructura del suelo favorece el almacenamiento de agua.

Figura 62. Producción de agua media diaria al finalizar el periodo de estudio por subcuenca



Fuente: Del autor.

Tabla 22. Potenciales parámetros morfométricos vs parámetros hidrológicos

Subcuenca	Área (km ²)	Caudal Específico (m ³ /s/km ²)	Pendiente media Subcuenca (%)	Pendiente rio (%)	Tipo de suelo	Cobertura vegetal	Q (igualado o excedido al 100%) (m ³ /s)	Q Base o Subterráneo (m ³ /s)	Q medio (m ³ /s)	Q pico (m ³ /s)	ET máximo (mm/día)	ET medio (mm/día)	ET mínimo (mm/día)	S (mm/día)
1	19.78	0.12	45.27	5.16	I-Bh-c	RNGE	0.29	2.44	2.44	19.83	3.1	1.07	0.00	228.79
2	17.22	0.12	50.47	7.37	I-Bh-c	FRSE	0.27	2.12	2.12	17.01	3.05	0.9	0.00	237.41
3	13.16	0.12	56.25	4.55	Bh3-3c	FRSE	0.8	6.19	6.19	49.83	3.21	1.21	0.00	199.27
4	17.30	0.12	65.11	11.02	Bh3-3c	RNGE	0.19	2.01	2.01	16.04	3.49	1.19	0.00	287.75
5	3.59	0.12	60.77	9.33	Bh3-3c	FRSE	1.04	8.62	8.62	69.03	3.82	1.7	0.47	143.99
6	9.24	0.12	64.06	20.15	Bh3-3c	RNGE	1.13	1.08	1.08	8.53	3.53	1.2	0.00	267.36
7	32.27	0.12	50.88	12.43	I-To-c	RNGE	1.16	3.73	3.73	28.92	3.71	1.63	0.01	309.53
8	9.92	0.11	24.44	7.19	I-To-c	FRSE	0.02	1.13	1.13	8.35	4.31	1.89	0.54	384.26
9	8.40	0.12	39.06	7.46	I-To-c	FRSE	0.22	5.83	5.83	44.42	4.25	1.87	0.53	304.37
10	11.28	0.12	46.46	5.91	I-To-c	FRSE	0.05	1.3	1.3	9.78	4.36	1.91	0.55	336.93
11	5.19	0.12	26.29	3.78	I-To-c	FRSE	0.27	7.73	7.73	58.45	4.55	1.97	0.57	297.64
12	10.12	0.12	44.18	5.15	I-To-c	FRSE	0.05	1.17	1.17	8.65	4.45	1.93	0.56	336.68
13	0.08	0.12	22.61	3.61	I-To-c	FRSE	0.32	8.91	8.91	67.16	4.98	2.21	0.65	244.65
14	10.92	0.11	41.96	4.83	I-To-c	FRSE	0.05	1.25	1.25	9.4	4.45	1.95	0.56	337.56
15	15.05	0.12	73.55	15.80	I-To-c	RNGE	0.15	1.76	1.76	13.7	3.75	1.62	0.00	271.74
16	36.32	0.12	66.79	7.10	I-To-c	FRSE	1.43	13.93	13.93	109.5	3.84	1.71	0.00	190.19
17	9.62	0.12	46.96	5.28	I-To-c	FRSE	1.61	16.79	16.79	131.4	4.37	1.92	0.55	170.39
18	15.71	0.12	67.18	19.29	I-To-c	RNGE	0.12	1.81	1.81	14.27	3.74	1.67	0.01	283.53
19	27.22	0.11	40.44	2.36	I-To-c	FRSE	0.45	13.27	13.27	98.94	4.57	1.98	0.58	315.07
20	14.84	0.11	32.54	5.58	I-To-c	FRSE	0.05	1.69	1.69	12.52	4.61	1.99	0.59	364.10
21	21.75	0.12	44.49	4.18	I-To-c	FRSE	1.74	21.09	21.09	163.5	4.52	1.97	0.57	188.75
22	26.63	0.12	63.96	12.87	I-To-c	FRSE	0.17	3.07	3.07	23.83	3.99	1.78	0.50	291.71
23	9.27	0.11	40.36	1.80	I-To-c	FRSE	0.5	16.02	16.02	118.7	4.76	2.05	0.61	311.52
24	0.78	0.07	41.36	5.88	I-To-c	FRSE	1.91	24.25	24.25	188	4.79	2.06	0.61	819.06

25	9.21	0.12	40.76	2.80	I-To-c	FRSE	2.37	41.32	41.32	313.5	4.81	2.07	0.62	233.84
26	12.36	0.11	37.43	5.18	I-To-c	FRSE	0.05	1.41	1.41	10.48	4.72	2.03	0.60	344.56
27	3.02	0.12	31.64	2.18	I-To-c	FRSE	0.02	43.43	43.67	278.5	4.92	2.18	0.64	221.62
Promedio	13.71	0.12	46.86	7.34	-	-	0.61	9.38	9.39	70.08	4.17	1.77	0.38	293.42

Fuente: Del autor.

Tabla 23. Potenciales parámetros morfométricos vs parámetros hidrológicos subdividida por región

Región	Área (km²)	Caudal Específico (m³/s/Km²)	Pendiente media Subcuenca (%)	Pendiente rio (%)	Q (igualado o excedido al 100%) (m³/s)	Q Base o Subterráneo (m³/s)	Q medio (m³/s)	Q pico (m³/s)	ET máximo (mm/día)	ET medio (mm/día)	ET mínimo (mm/día)	S (mm/día)
Región Andina	206.28	0.12	60.39	11.37	0.61	4.25	4.25	33.68	3.57	1.43	0.09	246.48
Región Amazónica	163.97	0.11	37.56	4.57	0.61	12.91	12.93	95.11	4.59	2.00	0.58	325.69

Fuente: Del autor.

Descripción General del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Topo en Función de las Características Morfométricas e Hidrometeorológicas

La cuenca del Río Topo durante el análisis de su balance hídrico en el periodo de estudio (1/enero/2021-31/agosto/2022), se logra determinar que la cuenca se mantiene con reserva de agua durante este lapso de tiempo. El área de la cuenca para el análisis del balance hídrico se estimó en 370.24 km² hasta el punto de afloramiento (captación); sin embargo, la cuenca dispone un área total de 441.33 km² hasta donde se confluyen los Ríos del Topo y Pastaza. En función del análisis climático de la cuenca del Río Topo, se determinó que el clima es templado y húmedo. La cuenca presenta 4658.63 mm de precipitación anual por lo que presenta una gran cantidad de ríos de gran potencial hídrico y caudalosos, la evapotranspiración media anual fluctúa en los 532.98 mm/año y la escorrentía entre 4116.53 mm anuales. La temperatura media anual representa 17.37 °C. Duque et al. (2019), indican que los cambios bruscos de temperatura ambiental pueden provocar cambios en el equilibrio del agua; sin embargo, en la cuenca del Río Topo no puede presentar este fenómeno, ya que la temperatura fluctúa entre un mínimo de 16.37 °C a un máximo de 18.4 °C; además, los niveles de evapotranspiración se elevan a temperaturas elevadas, por lo que la cuenca no presenta altas tasas de evapotranspiración como usualmente se presenta en las áreas amazónicas.

Existe una abundante escorrentía superficial que llega a los 6981.93 mm durante el periodo de estudio, lo que representa el 88.37% de agua precipitada que se transforma en escorrentía superficial; este nivel alto de escorrentía puede deberse a varios factores, entre ellos la geología que conforma la cuenca, esta geología presenta materiales calizos, areniscas y un suelo limo arcillosos como indica Marin (1993) de la formación Napo que fomentan a la escorrentía superficial que se encuentra en las zonas bajas de la cuenca.

La cobertura boscosa de la cuenca también abarca una cubierta herbácea (zona baja) (0.11%) lo que produciría mayor cantidad de agua percolada en los suelos de la cuenca; también, es de notar que los grandes aportes de agua por precipitación permiten disponer de agua para el requerimiento hídrico en los bosques de esta cuenca. La interceptación al ser una parte de la lluvia interceptada por la cobertura vegetal donde se da los procesos de la evapotranspiración; por ende, el 11% de la lluvia es interceptada por la vegetación en el periodo de análisis y el 11.44% en promedio anual; por lo que, hace referencia a la publicación de Rivadeneira (2017), donde indica que la interceptación en bosques de clima templado-tropical intercepten entre el 10 al 20% de la lluvia total. A su vez, Yaguache et al. (2015), indican que, en regiones al sur del Ecuador, se ha estimado que entre el 9% y el 38% de la lluvia vertical es interceptada por la cobertura vegetal.

La cuenca solo presentó como máximo cinco días seguidos de un periodo seco; presenta el 87.08% de la lluvia generada en época húmeda, por lo tanto, el agua en el suelo va a depender mucho de la lluvia acumulada en los días lluviosos. Los resultados del balance hídrico, muestran un balance positivo para la serie con un superávit de 50.97 mm al culminar periodo de estudio, siendo la escorrentía la que provocaría la mayor pérdida de agua en el suelo (un 88.37% de su precipitación). Además, se tiene valores altos de almacenamiento de agua llegando a tener picos de hasta 288.28 mm de almacenamiento de agua durante el periodo de estudio.

En cuanto al modelo SWAT, se generaron automáticamente las redes de drenaje de la cuenca del Río Topo y un total de 27 microcuencas. El modelo generó una representación de área boscosa como el principal uso del suelo en la cuenca que ocupa el 61.50% de su área y el suelo de la cordillera de los Llanganates el 32.1%. Los suelos predominantes en la cuenca, según el modelos SWAT, están clasificados en su mayoría como litosoles y andisoles ócricos, el primero son suelos son delgados y pedregosos que pueden presentar material calcáreo, son suelos comunes en áreas de montaña, tiene un bajo potencial agrícola y en adición poseen una escasa retención de humedad; el segundo, son suelos negros volcánicos también encontrados en áreas montañosas, permiten un potencial agrícola, se localizan en los suelos andinos boscosos y páramos; además, en la cuenca baja presenta una textura de suelo limo arcilloso. Aproximadamente, el 46% representa una pendiente de relieve montañosos de pendientes entre 50-70%.

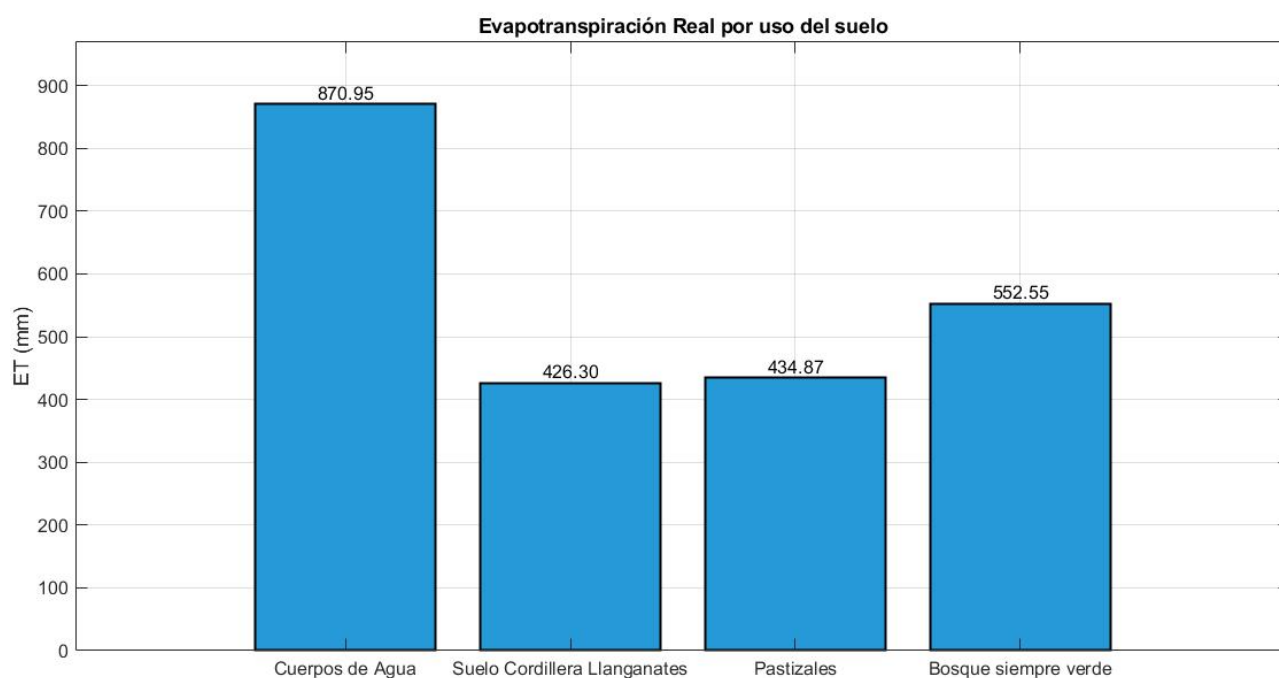
Finalmente, el patrón de evapotranspiración estimado en el modelo en función de la cobertura vegetal y el uso del suelo que prevalecen en la cuenca del Río Topo, donde se encuentra los valores más bajos de evapotranspiración en los pastizales (434.87 mm/año) y los valores mayores en la cobertura boscosa (552.55 mm/año), (tabla 24); este análisis también se refleja en el de estudio de Contreras et al., (2006), donde indaga que los valores bajos de evapotranspiración están en los cultivos herbáceos y leñosos y según Galván & Márquez (2006), esta clase de vegetación está asociada a los pastizales.

A comparación del estudio realizado por Yaguache et al. (2015) en la cuenca del Río Cosanga, donde se tiene que la evapotranspiración real para el páramo rodea los 355 mm/año (frente a los 426.3 mm/ años de la cuenca del Topo), para bosque los 451 mm/año (frente a los 552.55 mm/año de la cuenca del Topo) y 586 mm/año para el pasto (frente a los 434.87 mm/año de la cuenca del Topo) (figura 63). En adición, los mismos autores recalcan que los niveles de evapotranspiración real en los suelos inceptisoles y andisoles están en (1.19 – 1.66) mm/día y (1 – 1.50) mm/día respectivamente; a comparación de nuestro estudio que se estimaron en promedio 1.67 mm/día para los inceptisoles y 1.32 mm/día para los andisoles (suelo asumido en la cordillera de los Llanganates de la cuenca del Topo).

Tabla 24. Evapotranspiración según el uso del suelo en la cuenca

Uso del Suelo	% Área	ET (mm)
Cuerpos de Agua	0.2	870.95
Suelo Cordillera Llanganates	29.1	426.3
Pastizales	9.2	434.87
Bosque siempre verde	61.5	552.55

Fuente: Del autor.

Figura 63. Evapotranspiración real por tipo de uso de suelo por medio del SWAT

Fuente: Del autor.

En la siguiente tabla se ilustra una breve referencia de datos en cuanto a caudales medios, específicos y la escorrentía de diferentes ríos en cuencas de la Amazonía del Ecuador incluida la cuenca de nuestro estudio; por ejemplo, se tiene que cuencas con un área mayor generan caudales medios superiores, pero sus niveles de escorrentía son menores; por otro lado, el caudal específico es menor en las cuencas de mayor área a comparación de cuencas con un área menor; como se observa, cuencas con un caudal medio bajo, tienden a generar caudales específicos mayores.

Tabla 25. Caudales medios, específicos y escorrentía media anual en diferentes cuencas

Rio	Cuenca	Área (km ²)	Q Medio anual (m ³ /s)	Q Específico (L/s/km ²)	Escorrentía (mm/año)
Topo	Pastaza	370.24	43.67	117.95	3959.52
Cosanga	Napo	495	49.3	99.7	3144

Jatunyacu	Napo	3128	296	94.6	2984
Napo	Napo	12401	1086	87.6	2761
Alao	Pastaza	124	10.7	86.9	2739
Puela	Pastaza	185	17.6	94.7	2988
Verde	Pastaza	136	19.6	144.4	4553
Sabnilla	Santiago	185	28.8	155.1	4891
Zamora	Santiago	6825	652.7	95.6	3016

Fuente: (Laraque et al., 2007)

Dinámica de las Variables Climáticas del Ciclo Hidrológico en Relación al Almacenamiento de Agua en la Cuenca del Río Topo para un Año Hidrológico

Finalmente, se tiene una descripción gráfica de la dinámica climática en la cuenca del Río Topo (figura 64), se analiza a continuación:

La dinámica del almacenamiento de agua en la cuenca se visualiza como una gráfica de la función trigonométrica del seno. La cuenca generalmente sostiene un superávit de agua, los meses de mayor oferta hídrica se encuentran entre enero a julio y los meses de menor oferta hídrica entre agosto y diciembre. El almacenamiento de agua tiene una relación inversamente proporcional a la dinámica de la evapotranspiración; ya que, en los meses de enero a julio, el almacenamiento aumenta debido a una disminución en la evapotranspiración; mientras que, en los meses de agosto a diciembre, el almacenamiento disminuye debido al aumento de la evapotranspiración.

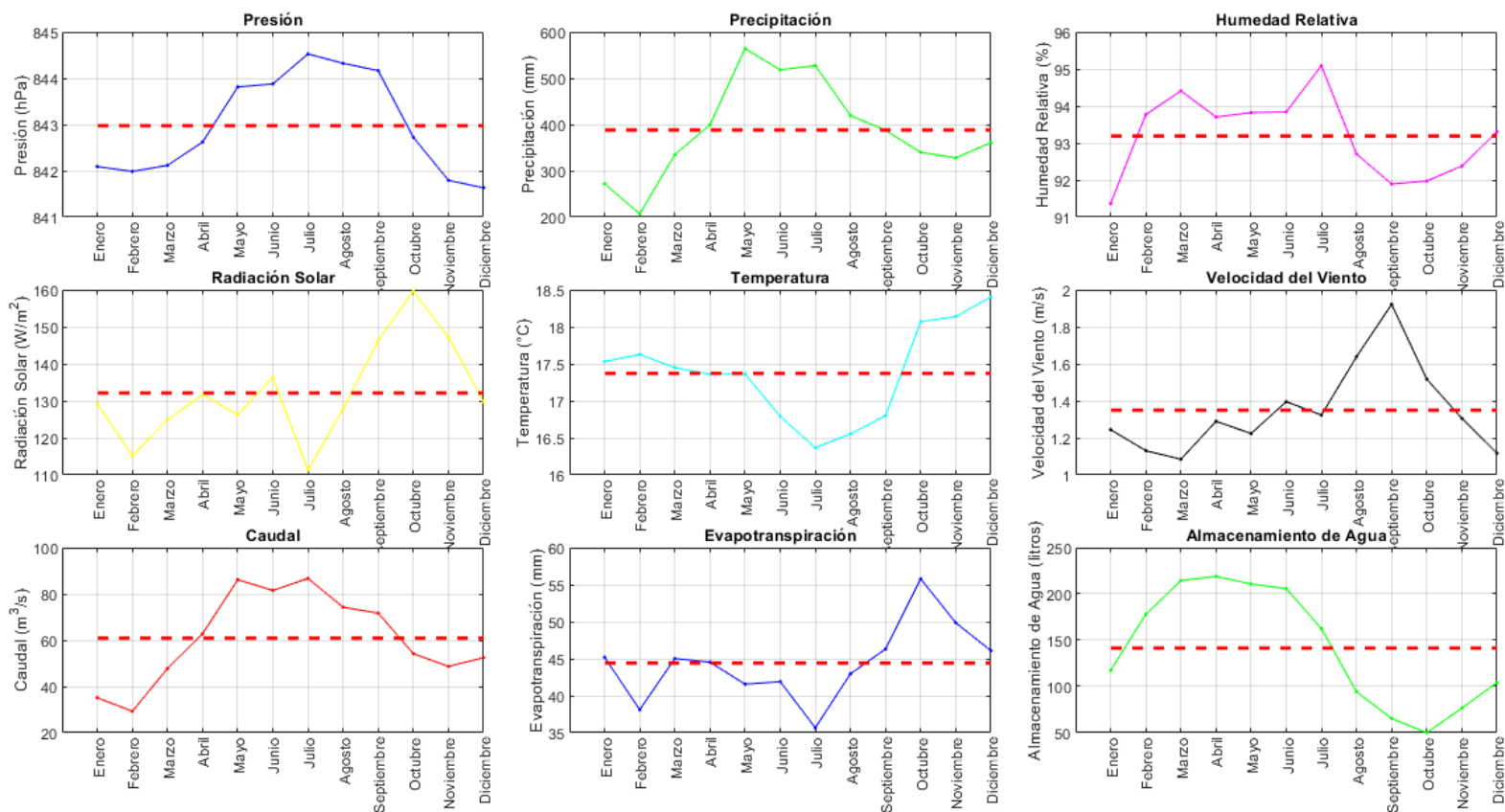
La precipitación es la principal fuente de ingreso de agua a la cuenca, y el almacenamiento de agua depende de este factor. Cuando el almacenamiento de agua disminuye, hay una disminución en la dinámica de la precipitación. Por otra parte, la temperatura influye en la disponibilidad hídrica, ya que un descenso en la temperatura aumenta la disponibilidad de agua, mientras que un aumento de la temperatura reduce el almacenamiento de agua en la cuenca. En cambio, la radiación solar está relacionada con la temperatura, su presencia aumenta la temperatura del aire, lo que a su vez incrementa la evapotranspiración y reduce el almacenamiento de agua.

La presión atmosférica tiene un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura. Una mayor presión atmosférica se relaciona con una disminución de la temperatura, disminuyendo la evapotranspiración y aumentando la oferta hídrica. Por otra parte, la humedad relativa y la evapotranspiración son inversamente proporcionales, a mayor humedad relativa, la capacidad de retener el aire esa humedad disminuye, lo que afecta y reduce la evapotranspiración aumenta el almacenamiento de agua.

La velocidad del viento es directamente proporcional a la evapotranspiración, ya que favorece una mayor evaporación al eliminar la capa de aire húmeda que rodea la superficie y promueve

la transpiración de las plantas, lo que disminuye el almacenamiento del agua en la cuenca. El caudal y la precipitación están relacionados directamente, ya que un aumento en la precipitación tiende a aumentar el caudal de agua en la cuenca. Silva (2005) recalca que, mientras mayor sea el valor de precipitación y escurrimiento, y la evapotranspiración sea menor, la cuenca tiene una mayor eficiencia hídrica.

Figura 64. Resumen de la dinámica hidrometeorológica de manera mensual de la cuenca del Topo



Fuente: Del autor.

CAPÍTULO VI

Conclusiones, Limitaciones y Recomendaciones

Conclusiones

En este estudio, se llevó a cabo un diagnóstico exhaustivo de la dinámica hidrometeorológica en la cuenca del Río Topo, centrándose en el balance hídrico. Además, se realizaron visualizaciones de las subcuencas que contribuyen significativamente a la producción hídrica, utilizando el modelo SWAT.

Este enfoque con el modelo SWAT permitió determinar el estado de la cuenca hidrográfica y evaluar el aporte hídrico para su ecosistema. De esta manera, se logró obtener una visión integral de la dinámica hidrometeorológica en la cuenca del Río Topo, lo cual es fundamental para la gestión sostenible de sus recursos hídricos.

El factor clave que facilitó el diagnóstico de la dinámica hidrometeorológica fue la utilización de la fórmula de Lvovitch (1959) para evaluar el balance hídrico. Esta fórmula permitió calcular con precisión las variaciones en el almacenamiento de agua a lo largo del tiempo. Gracias a este enfoque, se obtuvo una comprensión más profunda de cómo el agua se distribuye y se comporta en la cuenca del Río Topo a lo largo de diferentes períodos.

Partiendo con la morfometría de la cuenca, en donde se exhibe pendientes pronunciadas, lo que provoca una rápida concentración de escorrentía en la red de drenaje y sus afluentes, lo que caracteriza a la cuenca por una alta densidad de drenaje, lo que implica suelos moderadamente impermeables, especialmente en la zona media y baja, donde predominan los suelos limo arcillosos. Además, la presencia de actividad volcánica ha contribuido a la formación de una capa impermeable en algunos sectores. La geología también presenta características impermeables, aunque permite una retención de agua en proporciones menores. Esto resulta en un aumento significativo de los caudales, lo cual también se refleja en un coeficiente de escorrentía elevado en la cuenca.

Debido a las fuertes pendientes y la menor duración en la concentración de la escorrentía, el flujo de agua se acelera, generando un mayor caudal en el Río Topo y sus afluentes. Esta dinámica hidrometeorológica influye directamente en el balance hídrico de la cuenca y es crucial para comprender y gestionar adecuadamente los recursos hídricos en la región. A pesar de estas características, la cuenca cuenta con una amplia cobertura de bosques, incluyendo bosques húmedos premontanos y montanos, lo que favorece la infiltración de agua en el suelo. Esto se traduce en un Coeficiente de Curva (CN) moderado en la cuenca, lo que indica una capacidad razonable para la dinámica de la infiltración y, por ende, el almacenamiento hídrico en las áreas subterráneas. De esta manera, los suelos impermeables presentes en la cuenca están asociados a su alta densidad de drenaje.

Durante el periodo de estudio, en la cuenca del Río Topo no presenta estación seca, se observa un excedente en el almacenamiento hídrico que varía entre 49.41 mm y 288.28 mm durante el año hidrológico. Se identificó que las zonas en dirección a la Amazonía de la cuenca son las que tienen el mayor potencial de almacenamiento hídrico.

Por otra parte, se puede tener una dinámica positiva en términos de producción hídrica en las áreas cubiertas por pastizales en la cuenca. Esto sugiere que dichas áreas contribuyen significativamente al caudal de agua en el Río Topo. Mediante el uso del modelo SWAT, se logró identificar la presencia de suelos denominados litosoles en la cuenca. Estos litosoles se caracterizan por contener calizas, lo que da lugar a una textura limo arcillosa en la zona media y baja de la cuenca. Además, se observó que los litosoles tienen propiedades que los hacen impermeables, lo que limita la capacidad de infiltración del agua. En contraste, en las partes más altas de la cuenca, donde nace el Río Topo, se encontraron suelos del tipo cambisoles húmnicos finos, tal como los define la FAO, estos suelos poseen una estructura porosa que les otorga una gran capacidad para retener agua y favorecer la infiltración.

Por otro lado, en la cuenca alta, donde nace el Río Topo, se encuentran un relieve elevado y accidentado. También se pueden encontrar suelos de profundidad corta como los litosoles, lo que aumenta el nivel de escurrimiento en la cuenca. La presencia de materiales metamórficos y graníticos en la cuenca favorece un alto coeficiente de escurrimiento, lo que a su vez contribuye a mantener un caudal constante a lo largo de todo el año hidrológico. Esta combinación de factores geológicos y topográficos influye significativamente en la dinámica hidrometeorológica de la cuenca, determinando su caudal y comportamiento hídrico.

Los lugares potenciales para el almacenamiento de agua en la cuenca del Río Topo se encuentran en las áreas de lagos y lagunas, situadas en las zonas altas al noreste de la cuenca, específicamente en la cordillera de los Llanganates. Estas áreas son fuentes cruciales para el almacenamiento de agua en la región amazónica y están asociadas con ríos, lagos y humedales. En las áreas media y baja de la cuenca, los suelos predominantes son los inceptisoles, que presentan una textura mayoritaria limo-arcillosa, lo que les confiere una capacidad destacada para retener el agua. Esta característica es fundamental para el almacenamiento sostenido de agua en la cuenca.

En relación a los suelos de páramos, la literatura los describe como bastante homogéneos, y en áreas con influencia volcánica, se los clasifica como Andisoles. Sin embargo, lamentablemente, debido a la escasa información de suelos disponible en la zona de estudio, no se pueden visualizar en detalle. La característica destacada de estos suelos es su gran capacidad de almacenamiento de agua, que se debe a su alto contenido de materia orgánica en su primera capa. Esta particularidad hace que los suelos de páramos sean fundamentales

para el ciclo hidrológico de la región, ya que retienen y liberan el agua de manera gradual, contribuyendo así al caudal constante de los ríos y a la regulación de los recursos hídricos en la cuenca.

La mayor parte de la cuenca del Río Topo se encuentra protegida dentro del Parque Nacional Llanganates, lo que ha preservado su estado natural sin intervenciones silvícolas en su bosque. Esta protección ha sido clave para mantener el equilibrio hídrico en la cuenca, ya que no ha experimentado estrés hídrico ni variaciones significativas en sus reservas de agua del suelo. Gracias a la preservación del bosque y a la ausencia de actividades humanas que afecten negativamente su entorno, la cuenca puede mantener su capacidad de retención y regulación del agua de manera natural. Esta condición es fundamental para asegurar un flujo constante y sostenible de agua en los ríos y afluentes que forman parte de la cuenca del Río Topo.

Además, las constantes lluvias y la presencia de nubes en este ecosistema de la cuenca juegan un papel clave. Esto se traduce en que los suelos en esta región se mantienen húmedos prácticamente todo el año. En este contexto, la hidrología de la región se caracteriza por un alto flujo superficial debido a la saturación del suelo y su baja capacidad de infiltración. Esto significa que cuando llueve, el suelo no puede absorber toda el agua y se forma un flujo superficial rápido. A su vez, el flujo subsuperficial también es alto debido a la baja capacidad de retención del suelo, lo que resulta en valores bajos de percolación. Basado en lo expuesto, es comprensible que la cuenca propicie la formación de acuíferos con niveles de agua freática relativamente próximos a la superficie.

La dinámica hidrometeorológica de las cuencas hidrográficas es un tema de suma importancia para una adecuada gestión de los recursos hídricos y la conservación del medio ambiente. Para obtener una visión integral y precisa de estas áreas, es fundamental realizar el cálculo del balance hídrico, analizar la morfometría y la hidrometeorología de la cuenca, y emplear modelos de simulación como SWAT. Estas herramientas nos brindan información valiosa que permitirá tomar decisiones informadas y estratégicas en la planificación y gestión de los recursos hídricos. De esta manera, podemos garantizar la sostenibilidad a largo plazo de nuestras fuentes de agua, promoviendo la preservación de los ecosistemas acuáticos y el abastecimiento adecuado para las necesidades de la población y las actividades productivas. La aplicación de técnicas y análisis avanzados en el estudio de la dinámica hidrometeorológica nos proporciona una comprensión más profunda de cómo el agua fluye y se comporta en la cuenca, lo que resulta esencial para la toma de decisiones responsables y la implementación de medidas efectivas de conservación y uso sostenible de los recursos hídricos. Así, podemos contribuir activamente a la protección y preservación del valioso recurso del agua para futuros proyectos.

El estudio integral de la cuenca del Río Topo proporcionó valiosos conocimientos para la gestión sostenible de los recursos hídricos. La combinación de información hidrometeorológica, análisis morfométrico y modelos hidrológicos como SWAT brindó una base sólida para comprender y abordar los desafíos relacionados con el agua en la cuenca. El cálculo del balance hídrico es especialmente importante para las industrias hidroeléctricas, ya que permitió determinar la cantidad de agua disponible para generar energía eléctrica y planificar su uso futuro, garantizando así la seguridad energética y la protección del ecosistema.

Limitaciones de Estudio

El diagnóstico de la dinámica hidrometeorológica presentó varios desafíos, entre ellos el empleo del modelo SWAT, cuyo rendimiento se vio afectado por la falta de información climática histórica y espacial en la cuenca. Esto impactó en la distribución espacial de los parámetros climáticos tanto en el modelo como en el análisis manual y en las métricas estadísticas del modelo, lo que requiere una consideración cuidadosa al interpretar los resultados obtenidos. A pesar de estas limitaciones, se logró realizar una interpretación precisa y exhaustiva de la información disponible, y los resultados obtenidos en el modelo reflejan una aplicabilidad discutida.

Con respecto a los suelos de páramos, la escasa información disponible en la zona de estudio dificultó su análisis en detalle. Sin embargo, se reconoce la importancia de estos suelos en el equilibrio hídrico de la región, lo que subraya la necesidad de considerarlos en futuros análisis y estudios para una mejor comprensión y gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Río Topo.

Además, se identificaron posibles fallos en la generación de la cartografía morfométrica e hidrometeorológica basada en los datos generados por el modelo. Aunque esta cartografía proporciona un conocimiento general de la dinámica hídrica en la cuenca, es importante considerar las limitaciones y posibles sesgos asociados con su generación.

Por último, el cálculo del caudal específico mostró discrepancias con los estudios realizados en regiones Andinas. Esto podría deberse a la generalización de los parámetros climáticos de la estación M01 de manera uniforme en toda el área de la cuenca del Río Topo. Es esencial abordar adecuadamente la variabilidad espacial de los parámetros climáticos para mejorar la precisión de los resultados del caudal específico en futuros estudios.

A pesar de las limitaciones y desafíos encontrados en el estudio de la dinámica hidrometeorológica en la cuenca del Río Topo, se obtuvo una interpretación detallada y precisa con la información disponible. Sin embargo, se destaca la necesidad de abordar las limitaciones identificadas y considerar factores como la disponibilidad de datos climáticos y espaciales para mejorar la calidad y confiabilidad de los resultados. Estas mejoras serán

fundamentales para una gestión más efectiva y sostenible de los recursos hídricos en la región.

Recomendaciones

Establecer esfuerzos de cooperación entre instituciones públicas, privadas y no gubernamentales: Para abordar la falta de información adecuada para la representación espacial del balance hídrico en la cuenca del Río Topo, se sugiere colaborar con diversas entidades interesadas en el tema. La cooperación entre estas instituciones permitirá llevar a cabo investigaciones y monitoreo exhaustivos de todos los procesos hidrometeorológicos en la zona, generando datos precisos y actualizados que serán fundamentales para una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos.

Mejorar la calidad y disponibilidad de datos climáticos y espaciales: Dado que la precisión de los resultados de los modelos hidrometeorológicos está relacionada con el tamaño y la resolución de las cuencas, se recomienda enfocar esfuerzos en futuros estudios en mejorar la calidad y disponibilidad de datos climáticos y espaciales en la cuenca del río Topo. Esto permitirá obtener resultados más confiables y precisos en la evaluación de la dinámica hidrometeorológica y mejorar la modelación.

Realizar campañas de aforo en el área del Río Topo: Para obtener una mejor recopilación de datos de los caudales en la cuenca, se recomienda llevar a cabo campañas de aforo en el área del Río Topo. Estas campañas permitirán medir y registrar los caudales con mayor precisión, lo que mejorará la base de datos hidrometeorológicos y facilitará futuros estudios y análisis.

Desarrollar un proyecto cartográfico detallado para la cuenca del Río Topo: La generación de una cartografía detallada con las mejores escalas para la cuenca del Río Topo será de gran utilidad para la empresa y para la toma de decisiones informadas. Una cartografía más detallada proporcionará información oficial y permitirá discernir recomendaciones y conclusiones más eficientes.

Disponer de información climática distribuida en la cuenca: Contar con información climática distribuida en la cuenca mejorará los resultados en un estudio hidrológico. Al digitalizar información distribuida, se obtendrán mejores resultados y el modelo hidrológico representará de manera más precisa la realidad del sistema. Esta mejora en la entrada de datos será crucial para una evaluación más precisa y confiable de la dinámica hidrometeorológica en la cuenca del Río Topo.

Referencias

- Aguirre, N. (2007). *Manual Para El Manejo Sustentable De Cuencas Hidrográficas*. Universidad Nacional de Loja.
- Alcántara, F. (2015). *Modelo de geoformaciones cóncavas para recargas de agua subterránea en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque*. Lima-Perú.
- Alencar da Silva, K., Parodi D'avila, M., Nóbrega, R., & Albarran, D. (2019). Variabilidad espacial y temporal de la cobertura vegetal de los años 1984 a 2011 en la cuenca hidrográfica del Río Moxotó, Pernambuco, Brasil. *Diálogo andino*(58), 139-150.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *198*(0).
- Alvarado, A. P., & Zapata, X. E. (2017). PIMI-17-04-Un análisis comparativo de métodos para determinar la evapotranspiración efectiva del ecosistema del páramo en el norte del Ecuador.
- Álvarez Jiménez, M., Ramírez Granados, P., & Castro Solís, J. (2021). Biophysical and socioeconomic aspects of the Páez river sub-basin, Cartago, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*(67), 170-193.
- Álvarez, L., & Devia, C. (2013). *Análisis de la escorrentía sub-superficial en cubiertas experimentales de pasto kikuyo (pennisetum calndestinum)*. Bogotá.
- Andrade, L., & Ríos, C. (2014). Variabilidad climática y caudales mínimos en los Andes Ecuatorianos. *Revista Politécnica*, 33(1).
- ANEXO, D. SUSCEPTIBILIDAD POR COBERTURAS DE LA TIERRA. (n.d.).
- Aoki, A., & Sereno, R. (2006). Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante un microsimulador de lluvias. *Agriscientia*, 23(1), 23-31.
- Armijos, M., González, V., & Fries, A. (2018). Characterization of meteorological variables to be used as sources of energy in the southern region of ecuador. *Revista Geoespacial*, 15(2), 13-23.
- Arumí, J. L., Rivera, D., Muñoz, E., & Billib, M. (2012). Interactions between groundwater and surface water in the Bío Bío region of Chile. *Obras y proyectos*(12), 4-13.
- Astaburuaga, R. (2004). El agua en las zonas áridas de Chile. *ARQ (Santiago)*(57), 68-73.
- Astromía. (s.f.). *Climas de la Tierra y la Luna*. Astromía. Obtenido de <https://www.astromia.com/tierraluna/climas.htm>
- Ataroff, M., & Sánchez, L. (2000). Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado Táchira, Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 41(1), 11-30.

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (s.f.). *Observatorio del agua Chillón, Rimac, Lurín*.
Obtenido de Observatorio del agua Chillón, Rimac, Lurín:
https://crhc.ana.gob.pe/glosario/desnivel-de-la-cuenca#:~:text=Es%20el%20valor%20de%20la,DA%3DHM%2DHm)).
- Ávila, D. Á., Carvajal, E. Y., & Gutiérrez, S. S. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41), 120-133.
- Ávila, R., Villavicencio, R., & Ruiz, J. A. (2014). Potencial distribution of *Pinus herrerae* Martínez at western Jalisco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(24), 92-10.
- Ayala, M., & León, S. (2009). *El sube y baja del Topo*. Retrieved from
https://www.terraecuador.net/revista_58/58_topo.html
- Balcázar, L., Bâ, K. M., Díaz, C., Quentin, E., & Minga, S. (2019). Daily discharges modelling in a basin in southern ecuador with precipitation and temperature estimated by satellite. *Agrociencia*, 53(4), 465-486.
- Bautista, Á. D., Cruz, C. G., Moncayo, E. R., Silva, G. J., & Estrada, G. F. (2014). Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(3), 263-274.
- Belmonte, F. (2001). Balance hídrico, distribución de flujos y modelización de la interceptación en dos arbustos semiáridos mediante lluvia simulada. *Papeles de Geografía*(33), 23-34.
- Benavides, O., & Legarda Burbano, L. (2001). Caracterización biofísica de la cuenca media del río Pasto, Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 18(1), 181-193.
- Beyá, V., & Galleguitos, M. (n.d.). Modelamiento del balance hídrico. OPTIMIZACIÓN DEL RIEGO EN PALTOS Y CÍTRICOS.
- Blandón, L. (2019). Dinámica hidrológica de las aguas superficiales en la microcuenca río Pire, usando Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Revista Científica de FAREM-Estelí*(31), 65-71.
- Bonilla, D. C., & Toapanta, E. A. (2022). Análisis de barreras rompevientos aplicadas a la restauración agroecológica de suelos con producción de maíz, en el sector de San José de Pichul, parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga.
- Burbano Girón, J., Domínguez, E., & Barón Ruiz, O. (2016). Análisis de la relación entre variables morfométricas y biofísicas en la estimación de características probabilísticas para la oferta hídrica superficial en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana*, 40(156), 514-526.

- Bussmann, R. W., & Harold, L. A. (2005). Andean Forests of Southern Ecuador, classification, regeneration and use. *Revista peruana de Biología*, 12(2), 203-216.
- Buytaert, W., Céleri, R., Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad.
- Cabrera, A., Martos, R., Marín, L., Bermúdez, J., González, R., & Navarrete, M. (2015). Incorporación de la dinámica nival al modelo hidrológico de Témez para la evaluación de recursos hídricos en cuencas de alta montaña. Aplicación a la cuenca del río Bérchules (Sierra Nevada, Granada). In *SIAGA 2015, El Agua, Clave Medioambiental Y Socioeconómica*, 1-12.
- Calizaya, T., Mendoza, J., & Copa, M. (2020). Bases hidrológicas para la conservación de los recursos naturales en la cuenca del lago Moa, Bolivia. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7(2), 30-45.
- Camacho, M. (2014). Los páramos ecuatorianos: caracterización y consideraciones para su conservación y aprovechamiento sostenible. In *Revista Anales*, 1(372), 77-92.
- Canchig, C. S. (2015). Diseño de captación y conducción para la microcentral hidroeléctrica en la Estación Científica Amazónica Juri Juri Kawsay de la Universidad Central del Ecuador.
- Caprile, A., Aparicio, V., Portela, S., Sasal, M., & Andriulo, A. (2017). Drenaje y transporte vertical de herbicidas en dos molisoles de la pampa ondulada Argentina. *Ciencia del suelo*, 35(1), 147-159.
- Cárdenas, J. A., Jácome, J. L., & Ortega, M. V. (2021). Cálculo promedio mensual de la temperatura en la cuenca hidrográfica de la quebrada Tescua. *Revista Boletín Redipe*, 10(11), 578-583.
- Cardona, F., Ávila, Á., Carvajal, Y., & Jiménez, E. (2014). Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia). *TecnoLógicas*, 17(32), 85-95.
- Castillo, A. P., Sánchez, A., Cueva, A., & Orellana, M. (2016). Puesta a punto de una técnica molecular para el estudio de hongos y bacterias totales de suelo en ecosistemas tropicales del sur de Ecuador. *Ciencia del suelo*, 34(1), 145-154.
- Castro, M. (2011). Proyecto "Creación de Capacidades para la Valoración Socioeconómica de los humedales altoandinos": Una valoración económica del almacenamiento de agua y carbono en los bofedales de los páramos ecuatorianos.
- Centeno, C., & García, R. (2008). Balance hídrico de las superficies grabadas en rocas graníticas. Un modelo geomorfológico e hidrogeológico con aplicaciones ambientales.

- Cervantes, M. Y. (2007). El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán.
- Chamba, M., Massa, P., & Fries, A. (2019). Presión demográfica sobre el agua: un análisis regional para Ecuador. *Revista Geográfica Venezolana*, 60(2), 360-377.
- Chamorro, S., González, M. A., & Palacios, T. (2017). Assessment of water storage and carbon sequestration in the high Andean moors of the El Ángel ecological reserve to evidence the impact of land use change. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 3(1), 42-48.
- Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research and Research (CISPDR). (2016). *Plan Hidráulico Regional de la Demarcación Hidrográfica Pastaza*.
- Chiriboga, J. (2015). Cambio climático, agua y conflicto: disputas sociales, crisis hídrica y oportunidades de adaptación en la Sierra Centro-Norte de Ecuador. Estudio de caso: conflicto por el uso del agua entre la ciudad de Quito y la cuenca agropecuaria de Güitig.
- Chuncho, C., & Chuncho, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71-83.
- Cogliati, M., Ostertag, G., Caso, M., Finessi, F., & Groch, D. (2018). Análisis del balance hídrico medio mensual en la provincia del neuquén (argentina). *Boletín Geográfico*, 2(40), 27-45.
- Contreras, S., Alcalá, F., Domingo, F., García, M., Puigdefábregas, J., & Pulido, B. (2006). Desarrollo de un método para la evaluación del balance hídrico anual en regiones montañosas semiáridas. Aplicación a sierra de gádor (almería). In *V Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas. Edición electrónica: área temática*, 5.
- Cordón Suárez, U., Johnson, W., & Cordón Suárez, E. (2008). Diagnóstico biofísico y socioeconómico de la cuenca Bilwi Tingni, Puerto Cabezas, RAAN. *Ciencia e Interculturalidad*, 2(2), 28-43.
- Cotler, H. (2004). La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: un análisis del problema de escala. *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*, 49-62.
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., . . . Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos. *CONDESAN*, 288-304.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A. M., López, P., & Calrea, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *101(3)*, 212-224.

- Cunalata, C., Inga, C., Alvarez, G., Recalde, C., & Echeverría, M. (2013). Determinación de carbono orgánico total presente en el suelo y la biomasa de los páramos de las comunidades del chimborazo y shobol llinllin en Ecuador. *Boletín del Grupo Español del Carbón*, 27, 10-13.
- Daza, M. C., Hernández, F., & Alba, F. (2014). Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz-Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189-7200.
- Degioanni, A., Cisneros, J., Cantero, A., & Videla, H. (2006). Water balance simulation model in shallow watertable soils. *Ciencia del suelo*, 24(1), 29-38.
- Del Toro, G., Kretschmar, T., & Hinojosa, C. (2014). Hydric Balance in a Semi-Arid Basin, El Mogor, Baja California, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6, 69-81.
- Delgadillo, R., Vázquez, R., Tirado, T., Robles, B., Pérez, G., Hernández, M., & Arias, H. (2022). Efecto de la implementación de acolchados en los componentes del balance hídrico superficial. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 16, 1-9.
- Delgado, O., & Zarate, E. (2002). Los páramos de Azuay y Cañar. *UNIVERSIDAD-VERDAD*, 197.
- Díaz, M. A., Navarrete, J. D., & Suárez, T. (2005). Páramos: hidrosistemas sensibles. *Revista de ingeniería*(22), 64-75.
- Duque, S. P., Cajamarca, R. R., & Wemple, C. B. (2019). Estimación Del Balance Hídrico De Una Cuenca Andina Tropical. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1), 56-69.
- Echeverría, C., Huber, A., & Taberlet, F. (2007). Comparative study of water balance components in a native forest and a meadow in southern Chile. *Bosque (Valdivia)*, 28(3), 271-280.
- Ecología Verde. (s.f.). *Tipos de precipitaciones según su intensidad*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-precipitaciones-3086.html#:~:text=Los%20tipos%20de%20precipitaciones%20seg%C3%BAAn%20su%20intensidad%20son%3A,mm%2Fh.%205%20Torrenciales%20cuando%20supera n%20los%2060%20mm%2Fh>
- Esper Angillieri, M., Espejo, K., Lara, G., Perucca, L., & Rothis, M. (2016). Morfometría de cuencas como base en la evaluación de la susceptibilidad/peligrosidad por aluviones, caso de estudio: cuenca del río del agua, san juan, argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 4(73), 513-519.
- Esper, M. Y., & Perucca, L. P. (2014). Morphometric characterization of the Río Seco basin concerning strong rainfall in 2013, Departamento Sarmiento, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66 (2), 235-245.

- Falcones, L., Palacios, T., & Jódar, A. (2021). Simulación hidrológica de una microcuenca en Ecuador utilizando el modelo SWAT para determinar el comportamiento del recurso hídrico frente al Cambio Climático. *Inundaciones y sequías: Análisis multidisciplinar para mitigar el impacto de los fenómenos c. Universitat d Alacant/Universidad de Alicante*, 397-408.
- Galván, A., & Márquez, A. Z. (2006). Descripción biofísica de la cuenca del río Coapa, Chiapas. *Hidrobiológica*, 16(2), 107-120.
- García, S. D. (2021). Análisis hidrológico de la cuenca del Río Chulo a partir de un balance hídrico mediante imágenes satelitales Landsat del año 2018.
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., & Marlats, R. M. (2007). Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 39(1), 21-28.
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Besteiro, S., & Delgado, M. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.
- Gomariz, C., & Alonso, S. (2018). Efecto de la subdivisión de cuencas y la estimación de variables climáticas en la simulación hidrológica con el modelo SWAT en cuencas semiáridas mediterráneas. *Papeles de Geografía*(64), 114-133.
- Gómez, G., Cerrón, R., Capcha, T., & Villavicencio, C. (2014). Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas. *Apuntes de Ciencia & Socioda*, 4(2), 8.
- Gómez, R. (2013). Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: la cuenca del Valle de México. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 4(3), 5-27.
- Gómez, S., & Gómez, V. L. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). *Dyna*, 83(196), 213-222.
- González de Matauco, A. (2004). Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*(38), 311-329.
- González de Tango, M., García, M. J., Ortega, L., Pardillo, G., & Tourné, M. (1988). Intercepción y calidad del agua de lluvia bajo diferentes condiciones de cubierta vegetal. *Ecología*, 2, 99-110.
- González, H. A., & Hernández, J. R. (2016). Agroecological zoning of Coffea arabica in the Atoyac de Álvarez municipality, Guerrero state, México. *Investigaciones geográficas*(90), 105-118.

- González, M., Polo, M., Masip, I., Márquez, A., & Giráldez, J. (2003). Importancia del flujo subsuperficial en la iniciación de cárcavas en la campiña andaluza. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo VI*, 397-402.
- Grajales, X. J. (2017). Implementación del modelo hidrológico SWAT, como herramienta para el manejo del recurso hídrico en la Unidad Hidrológica Rio Hacha–Floresia Caquet.
- Grandjouan, O., Hidalgo, L., Apaéstegui, J., Baby, P., Cochonneau, G., Condori, E., . . . Guyot, J. (2018). Las resurgencias del Alto Mayo (San Martín, Perú): estudio hidrológico sobre un karst tropical andino-amazónico.
- Gualpa, M., & Céleri, R. (2013). EFFECT OF ATMOSPHERIC PRESSURE ESTIMATION ON STAGE AND DISCHARGE CALCULATIONS. *Aqua-LAC*, 5(2), 56-68.
- Guerra, F., & González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado. *Geoenseñanza*, 7(1-2), 88-108.
- Guerrero, F. J., Kretschmar, T., & Hinojosa, A. (2014). Hydric Balance in a Semi-Arid Basin, El Mogor, Baja California, Mexico. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), 69-81.
- Herrera, T., & Moreno, R. (2022). Incidencia del uso de suelo en el Balance Hídrico de Suelo propuesto por Schosinsky.
- Hidalgo, L. G., & Hidalgo, J. A. (2013). Reconversión del QNH de aviación en presión atmosférica. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 36(3), 240-242.
- Hidalgo, O. M. (2012). Identificación de patrones de circulación atmosférica para el Ecuador y su influencia para la ciudad de Quito. *Departamento de Geociencias*.
- Hofstede, R., Coppus, R., Mena, P., Segarra, P., Wolf, J., & Sevink, J. (2002). THE CONSERVATION STATUS OF TUSsock GRASS PARAMO IN ECUADOR. *Ecotropicos*, 15(1), 3-18.
- Huber, A., & Oyarzún, C. (1983). Precipitación Neta e Intercepción en un Bosque Adulto de *Pinus radiata* (D. Don.). *Bosque*, 5(1), 13-20.
- Hurtado, J. R., & Yáñez, D. B. (2015). Aplicación del modelo hidrológico SWAT (soil & water assessment tool) para análisis del caudal de escorrentía superficial en la cuenca hidrográfica del río las juntas. *Revista Geoespacial*, 12, 106-122.
- Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. M. (2011). Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía.
- INAMHI. (2017). Boletín Agrometeorológico Mensual .

- Infraestructura de Datos Espaciales (IDE). (2022, marzo 05). *Universidad del Azuay IDE*. Retrieved from Universidad del Azuay IDE: <https://gis.azuay.edu.ec/>
- Instituto Geofísico del Perú. (s.f.). *Clasificación Climática*. Obtenido de <http://met.igp.gob.pe/clima/clasif.html>
- Izco, J., Pulgar, Í., Aguirre, Z., & Santin, F. (2007). Floristic study of the southern bunchgrass paramos of Ecuador. *Revista Peruana de Biología*, 14(2).
- Jácome, E. D., & Reinoso, E. G. (2023). Análisis de la calidad de absorción visual de las unidades del paisaje del páramo de la laguna de antejos del Parque Nacional Llanganates, propuestas de conservación, 2023 .
- Jobbágy, E. G., Noretto, M. D., Santoni, C. S., & Baldi, G. (2013). El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología austral*, 23(2), 87-96.
- Jodar, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Climate change impact assessment on a hydrologic basin under natural regime (SE, Spain) using a SWAT model. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(3), 240-253.
- Karlin, M., Salazar, J., Cora, A., Sánchez, S., Arnulphi, S., & Accietto, R. (2019). Cambios en el uso del suelo: capacidad de infiltración en el centro de Córdoba (Argentina). *Ciencia del suelo*, 37(2).
- Kunst, C., Ledesma, R., Basan, M., Prieto, D., & Godoy, J. (2003). Rolado de "fachinales" e infiltración de agua en suelo en El Chaco Occidental (Argentina). *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(3), 105-126.
- Landini, A., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agnes3, D., & Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del suelo*, 25(2), 123-131.
- Laraque, A., Loup, G., & Pombosa, R. (s.f.). Hidrometeorología del Oriente e Hidrosedimentología de la cuenca del Napo.
- Laraque, A., Ronchail, J., Cochonneau, G., Pombosa, R., & Guyot, J. L. (2007). Heterogeneous Distribution of Rainfall and Discharge Regimes in the Ecuadorian Amazon Basin. *Journal of hydrometeorology*, 8(6), 1364-1381.
- León, P., Tapia, E., & Rodríguez, F. (2017). Valor económico del almacenamiento de carbono en los páramos de la Reserva Ecológica El Ángel. *Revista Geoespacial*, 14(1), 65-82.
- Llambí, L., Soto-W, A., Céleri, R., Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos.
- Londoño, C. (2001). *Cuencas hidrográficas*. Ibagué: Universidad Del Tolima.

- López, A. A., Martínez, L. E., & Feria, J. J. (2014). Parámetros hidrológicos y tensores en la dinámica fluvial: estudio en cuencas del caribe colombiano. *Ingeniería y Desarrollo*, 32(2), 218-241.
- López, A., Fuentes, C., González, E., & López, A. (2017). Rainfall-interception loss-runoff relationships in a semi-arid catchment. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(4), 37-56.
- Lux, B. (2012). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas.
- Maila, M. V., Pérez, E. Y., & Romero, J. R. (2017). Comunidad Fitoplanctónica del Río Topo, Tungurahua-Ecuador. *Cinchonia*, 15(1), 141-157.
- Maldonado, G. A. (2017). Tasas de pérdida de agua por evapotranspiración en dos especies de anfibios ecuatorianos con hábitos ecológicos diferentes: *Hypsiboas cinerascens* (Anura: Hylidae) y *Pristimantis unistrigatus* (Anura: Craugastoridae).
- Maldonado, J. M., Samaniego, J. R., Ramos, D. M., & Abril, R. V. (2020). Curves of intensity, duration and frequency of Puyo meteorological station. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(1), 127-137.
- Marchesini, V., Sobrino, J., Hidalgo, M., & Di Bella, C. (2009). Selective elimination of woody vegetation in an Argentinean Dry Forest: the effect on water dynamics. *Revista de Teledetección*, 31(1), 93-102.
- Marin, J. (1993). Balance hidrico e hidrológico de la cuenca media del rio gallego. *Geographicalia*(30), 243-257.
- Martínez, C. (2014). Análisis estadístico de la base de datos climatológica del parámetro humedad relativa de Honduras. *Revista Ciencia y Tecnología*, 129-146.
- Mejía, J., Méndez, F., Abou, S., & Mora, E. (2021). Hidrogeografía de una cuenca de usos múltiples ubicada en la cordillera de la Costa, Venezuela. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(1), 217-238.
- Mejía, V., Orellana, D., & Cabrera, B. P. (2021). Cambio de uso de suelo en la Amazonía norte del Ecuador: un análisis a través de imágenes satelitales nocturnas VIIRS e imágenes LANDSAT. *Universidad-Verdad*, 1(78), 10-29.
- Méndez, T., Palacios, S., & Rodríguez, L. (2008). Analysis of Soil, Leaf and Water Quality for Avocado. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 75-84.
- Meza, D. (2012). *Dinámica hidrológica y régimen natural del río Ayuquila – Armería*. Guadalajara.
- Montoya Moreno, Y., & Montoya Moreno, B. (2009). Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada los Andes, El Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 31-38.

- Morales, M., Ollgaard, B., Kvist, L., Borchsenius, F., & Balslev, H. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 91-109.
- Morejón, Y. M., Vega, M. B., Escarré, A., Peralta, J. L., Quintero, A., & González, J. I. (2015). Analysis of water budget in the Sierra de los Órganos basins. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2(36), 94-108.
- Morengo, O. (1982). Estimación de la evapotranspiración en el bosque húmedo tropical de la Amazonía. *Revista Forestal del Perú*, 11(1-2), 1-13.
- Moreno, A., Neto da Silva, M., Vidal Mota, G., Tapia, S., & Barbosa da Silva, B. (2021). Analysis of net radiation in Atlantic forest affected with anthropic intervention, in São Paulo, Brazil. *Investigaciones Geográficas*(104).
- Moreno, J., Neto da Silva, M. M., Vidal, G., Tapia, S. L., & Barbosa da Silva, B. (2021). Analysis of net radiation in Atlantic forest affected with anthropic intervention, in São Paulo, Brazil. *Investigaciones geográficas*(104).
- Musálem, M. Á. (2005). Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. *Ra Ximhai*, 1(2), 421-425.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). Herramienta de evaluación del suelo y agua Documnetación teórica.
- Novák, V., & Surda, P. (2010). The water retention of a granite rock fragments in High Tatras stony soils. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58(3), 181-187.
- Ordoñez, J. J. (2011). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. Lima - Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ortega, V., Sánchez, E. I., Sánchez, L., Reyna, M. d., & Ruvalcaba, G. (2020). Arboreal vegetation of deciduous lower rainforest in degraded litosol and eutric regosol soils. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 377-390.
- Ortiz, V. O. (2015). Hydraulic Similarities among the High Andean Hydrological Systems and Transfer of Hydrometeorological Information. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 25-44.
- Oyarzún, C., & Huber, A. (1999). Balance hídrico en plantaciones jóvenes de Eucalyptus globulus y Pinus radiata en el sur de Chile. *Terra latinoamericana*, 17(1), 35-44.
- Pacheco, E. E. (2013). Dinámica hidrológica y sedimentológica en una cuenca representativa mediterránea. Riera de Vernegá (1993 – 2012). 214.
- Paredes, M. Á., & Sánchez, D. E. (2020). Propuesta de un Plan de Restauración en Áreas afectadas por Incendios de Origen Antrópico en Los Páramos del Parque Nacional Llanganates del Cantón Tungurahua.

- Peña, J. L. (n.d.). Los páramos del norte del Perú. *Revista de los estudiantes deficiencias forestales Universidad Nacional Agraria La Molina*, 57.
- Pilco, P. (2020). Balance hídrico del acuífero del proyecto Curipamba, sector “Las naves” provincia de Bolívar durante el periodo (2011-2019).
- Pineda, S. (2012). EVALUACIÓN DE RIESGO DE MOVIMIENTOS EN MASA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CARAMACATE (ESTADO ARAGUA) A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS TEMPORAL MULTIVARIADO.
- Piscocya, L. R. (2019). Índice de vegetación de diferencia normalizada (Ndvi) en el distrito de Puquina, Moquegua.
- Poma, C., & Usca, T. (2020). Estimativa do balanço hídrico climático (BHC) das microbacias do cantão Joya de los Sacha, Orellana. *Revista Científica FIPCAEC (Fomento de la investigación y publicación científico-técnica multidisciplinaria)*. ISSN: 2588-090X. *Polo de Capacitación, Investigación y Publicación (POCAIP)*, 5(55), 3-26.
- Poma, M., & Usca, M. (2020). Estimation of the climatic water balance (BHC) of the micro basins of the canton Joya de los Sacha, Orellana. *Revista Científica FIPCAEC (Fomento de la investigación y publicación científico-técnica multidisciplinaria)*. ISSN: 2588-090X. *Polo de Capacitación, Investigación y Publicación (POCAIP)*, 5(5), 3-26.
- Puig, H. (1991). Vegetación de la Huasteca, México: Estudio fitogeográfico y ecológico.
- Quiroz, C. E., & Mostacero, J. (2020). Influence of atmospheric pressure and ambient temperature on the sub-floor of the San Ildefonso micro-basin Trujillo, Peru. *Manglar*, 17(1), 47-53.
- Racca, J. G. (2007). Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín IFG*, 77, 1-2.
- Ramírez, A. G., & Rosero, C. D. (2013). Manual Hidrográfico de las Cuencas Hidrográficas de las Vertientes del Amazonas.
- Ramírez, A., González, J., Andrade, V., & Torres, V. (2016). Efecto de los tiempos de conservación a temperatura ambiente, en la calidad del huevo de gallinas camperas (*Gallus domesticus*) en la Amazonia Ecuatoriana. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 17(2), 1-17.
- Ramírez, L., Alvarado, A., Pujol, R., & Brenes, L. (2008). Caracterización física de la cuenca media del Río Reventado, Cartago, Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 32(2), 73-92.
- Reyes, A., Ulises, F., & Carvajal, Y. (2014). *Guía básica para la caracterización morfométricas de cuencas hidrográficas*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.

- Rivadeneira, J. F., & Anderson, E. (2010). *Peces de la cuenca del Pastaza, Ecuador*. Fundación Natura.
- Rivadeneira, J. L. (2017). Análisis de vulnerabilidad local al cambio climático del sector ganadero en las zonas de implementación del proyecto mgci en la provincia de morona santiago.
- Rivadeneira, R. (2017). Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas, sector Jadán y Zhidmad en el área de interceptación con el Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA).
- Rivera, C. (2014). Análisis de la Dinámica Hidrológica en Cuencas de Páramo Húmedo: Estudio de Caso a Escala de Ladera.
- Rivera, S. I. (2016). La sostenibilidad del recurso hídrico en el Ecuador: análisis multicriterial de la gestión del agua.
- Rodríguez, R., Fernández, A., & Moral, F. (2017). Groundwater input quantification to Santa Olalla pond by means of daily water balances. *Geogaceta*, 61, 47-50.
- Rodríguez, R., Sotomayor Fernández, C., Noriega, B., & Almeida, F. (2015). *Caracterización climática e hidrológica de la cuenca del río súa*. Instituto Espacial Ecuatoriano.
- Rojas, D. R. (2018). Estudio de los Requerimientos Hidráulicos de las Especies de Macroinvertebrados Bentónicos existentes en los microhábitats de ríos de páramo, caso de estudio: Río Jatunhuayco.
- Rojas, P. (2015, Febrero 9). *Ingeciv*. Retrieved from Ingeciv: <https://ingeciv.com/que-es-una-curva-hipsometrical/>
- Romero Días, A., & López Bermúdez, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicados al alto Guadalquivir. *Papeles de geografía*(12), 47-62.
- Romo, M. G., & Calero, E. (2022). Degradation of páramo vegetation due to cattle ranching in Parque Nacional Llanganates, Ecuador. *Revista Verde de Agroecología e Desenvolvimento Sustentável*, 17(1), 27-34.
- Salcedo, L., & Ramirez, R. (2015). Cartografía geológica y cálculo del balance hídrico para la construcción del túnel de carga en la Central Hidroeléctrica Chicamocha-municipio de Aratoca, Santander.
- Sánchez, D. (2018). Balance hídrico de largo plazo en las microcuencas abastecedoras de los acueductos comunitarios de la ciudad de Ibagué.
- Santillán, F., Cruz, R. S., Calva, C. A., Ireta, P. A., & Bautista, O. J. (2020). Climatic water balance of mountain mesophilic forest in the huasteca. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 7(1).

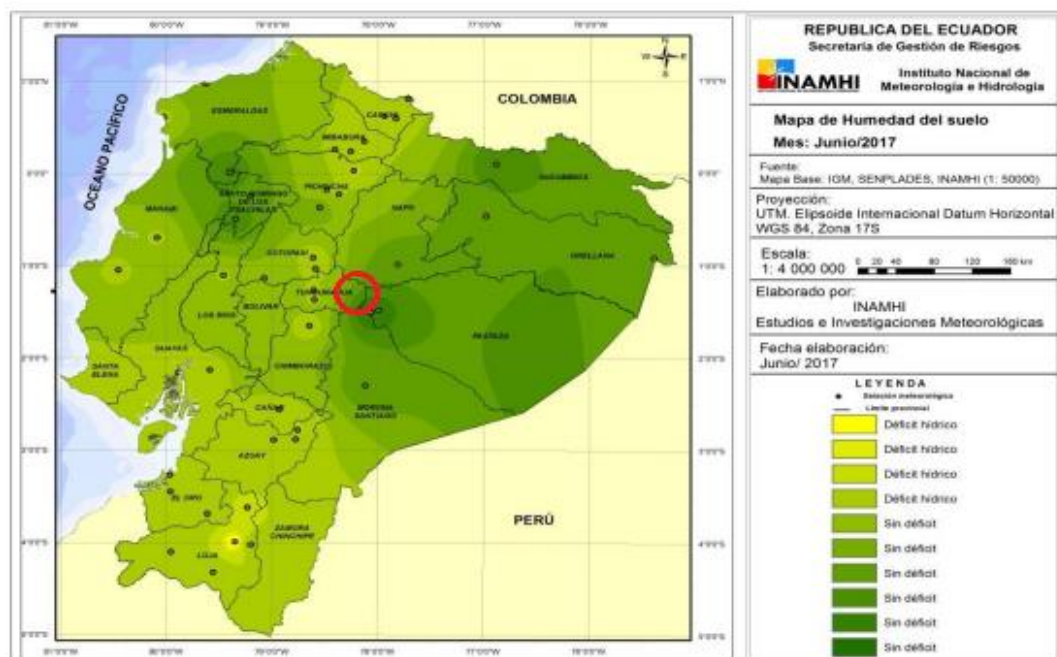
- Santos, P. (2014). Balance hídrico en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en época lluviosa en la región litoral centro, diagnóstico y servicios en la zona de producción seis (6), Ingenio Madre Tierra, Guatemala, CA.
- Sasal, M. (2012). Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*(23).
- Senisterra, G., Rodríguez, V., Gaspari, F., & Mazzucchelli, M. (2014). Aspectos morfométricos de la cuenca alta del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 55(2), 287-303.
- Silva, G. (2005). The Orinoco River basin: hydrographic view and its hydrological balance. *Revista Geográfica Venezolana*, 46(1), 75-108.
- Tamayo, G. G. (2017). *Evaluación de los caudales líquidos y de producción de sedimentos estimados con el modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) y su relación con los caudales líquidos y sólidos observados*. Quito.
- Torres, B., Fernández, R. S., Oropeza, M., & Mejía, S. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 437-444.
- Torres, D. M., Orea, C. U., Brito, M. L., & Cordero, C. E. (2013). Study of extraction of Barbasco foliage (*Lonchocarpus nicou*) as a biocide source. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 41-49.
- Torres, J., & Aragón, J. (2018). *Investigación en Hidrología general, isotópica y aplicada*.
- Torres, R. S., & Proaño, S. C. (2018). Water balance components in the paramo of jatunsacha, ecuador. *Revista de Ciencias de la Vida*, 28(2), 52-66.
- Torres, S. F., & Proaño, C. O. (2018). WATER BALANCE COMPONENTS IN THE PARAMO OF JATUNSACHA, ECUADOR. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 28(2), 52-66.
- Universidad Católica de Chile. (s.f.). *Geomorfología, dinámica y climática*. Obtenido de Geomorfología, dinámica y climática:
https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/3_1.html#:~:text=El%20perfil%20longitudinal%20de%20un,las%20diferentes%20competencias%20del%20flujo
- Urrego, H. L. (n.d.). Estudio morfométrico y balance hídrico de la subcuenca del río Sueva, Junín Cundinamarca.

- Uvidia, H., Ramírez, L. L., Leonard, I., Vargas, J. C., Verdecia, D., & Andino, M. (2015). Inventario de la sucesión vegetal secundaria en la provincia Pastaza, Ecuador. *EDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 16(11), 1-8.
- Valdivieso, P. A. (2011). Incidencia del cambio en el uso del suelo en los caudales; Caso de Estudio: Cuencas de los Ríos Alambi, Intag y Quijos.
- Valencia, R., Serrano, D., & Galárraga, R. (2014). Cambios de uso del suelo en cuencas alto andinas y consecuencias en la disponibilidad de agua. Caso de estudio en los páramos del Nevado Cayambe, Ecuador. *Revista Politécnica*, 34(2), 79-79.
- Varela , A. L., & Ron, S. R. (2022, octubre 04). *PUCE*. Retrieved from PUCE: <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/>
- Vargas, H., Neill, D., Asanza, M., Freire, A., & Narváez, E. (2000). Vegetación y flora del Parque Nacional Llanganates.
- Vargas, O. (n.d.). Los regímenes de estrés y disturbio en los páramos andinos.
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., Ortiz, L., & Araque, M. (2019). *Cuencas Hidrográficas*. Quito-Ecuador: Abya-Yala.
- Veintimilla, F. E. (2015). *Diseño de excavación del túnel de conducción del Proyecto Hidroeléctrico Topo*. Quito.
- Vela, D. M. (2012). Diseño de un Producto Turístico para la conservación y uso del Patrimonio Cultural del Centro de Turismo Comunitario San Virgilio, cantón Arajuno, provincia de Pastaza.
- Velásquez, G., & Castro, G. (2023). Fiebre amarilla: una mirada desde una Región Amazónica del Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 5483-5505.
- Velásquez, M., & Poveda, G. (2019). Estimation of the water balance of the Colombian Pacific region. *Dyna*, 86(208), 297-306.
- Velásquez, R., & Poveda, G. (2019). Estimation of the water balance of the Colombian Pacific region. *Dyna*, 86(208), 297-306.
- Vidal, J. R. (1998). Formas y paisajes graníticos.
- Vidal, M. R., Montes, C., Suárez, M. L., & Ramírez, L. (1987). Caracterización Morfométrica de la Cuenca del Río Segura: Estudio Cuantitativo de las Formas de las Subcuencas. *Papeles de Geografía*(12), 19-31.
- Wajarai, J. L., & Jaramillo, J. J. (2023). EVALUATION OF THE SUPERFICIAL WATER BALANCE OF THE HYDROGRAPHIC SUB-BASIN OF THE JIPIJAPA RIVER. *Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 5(3), 582-593.

- Yaguache, D., Felipe, L., & Vázquez, R. F. (2015). WATER AVAILABILITY MODELLING FOR A TROPICAL MOUNTAIN CATCHMENT AS A FUNCTION OF ITS SOIL COVER. *Aqua-Lac*, 7(1), 63-73.
- Zambrano, X. A., Caicedo, M. D., & Faréz, V. (2021). Distributed water balance with pedotransfer functions for estimating extreme events. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8.
- Zúñiga, R., Muñoz, E., & Arumí, J. (2012). Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y proyectos*(11), 69-78.

Anexos

Anexo A. Humedad del suelo a nivel nacional (INAMHI, 2017)



Anexo B1. Precipitaciones mensuales y anuales de las estaciones de la zona cercana a la cuenca del Río Topo

Estación	Pr	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
BAÑOS MO29	Medi	63,1	89,6	93,6	122,	142,9	200,1	171,6	148,5	126,	83,6	70,1	68	1380
	Max.	146,	260,	207,7	230,	265,0	414,2	287,3	280,9	257,	163,	132,	217	
	Min.	17,5	19,5	12,2	52,5	53,2	52,0	79,5	77,1	43,4	35,4	25,2	17	
RÍO VERDE M378	Medi	163,	189,	211,9	275,	303,4	399,6	399,3	329,1	267,	170,	142,	170	3022
	Max.	298,	468,	450,9	468,	635,9	704,1	638,3	861,4	522,	310,	344,	411	
	Min.	30,6	65,0	62,8	133,	149,8	76,5	200,1	169,1	46,9	87,1	55,4	53	
AGOYAN EN LA PRESA M220	Medi	76,7	106,	105,0	143,	161,2	218,6	185,7	162,2	146,	100,	82,8	80	1568
	Max.	164,	315,	229,2	307,	281,6	483,7	313,0	255,1	312,	233,	151,	160	
	Min.	28,9	31,0	23,3	40,3	66,2	10,5	94,2	62,0	56,2	47,8	32,4	29	
RÍO VERDE MEDIO M720	Medi	205,	267,	213,9	322,	469,4	683,4	690,5	404,6	332,	252,	206,	200	4249
	Max.	363,	519,	521,3	560,	822,4	856,0	1103,	492,5	478,	328,	345,	340	
	Min.	81,9	127,	110,9	157,	252,2	323,7	405,0	341,2	192,	160,	114,	38	
RÍO VERDE SUPERIOR	Medi	223,	263,	329,0	304,	615,2	831,6	787,8	508,9	312,	246,	219,	156	4798
	Max.	344,	339,	632,7	425,	937,4	1253,	1143,	1114,	391,	317,	279,	259	
	Min.	165,	178,	127,8	226,	222,6	388,8	551,2	328,9	205,	114,	125,	80	
EL GOLPE M688	Medi	196,	254,	225,0	246,	319,2	336,6	387,1	323,5	252,	184,	146,	198	3070
	Max.	488,	732,	412,0	377,	443,9	430,7	532,7	507,3	321,	237,	215,	276	
	Min.	58,9	51,7	76,2	116,	204,5	179,4	275,7	178,9	154,	98,9	98,0	110	
PISAYAMBO M219	Medi	76,2	109,	120,6	124,	136,7	182,9	182,3	137,2	100,	82,6	77,8	89	1420
	Max.	149,	246,	186,6	219,	243,0	334,1	304,3	241,0	184,	116,	121,	218	
	Min.	17,4	46,1	64,4	50,6	79,4	84,2	119,8	59,9	47,4	36,7	39,6	23	
EL TOPO M379	Medi	225,	241,	291,7	344,	418,1	510,4	425,6	351,0	361,	271,	241,	223	3905
	Max.	372,	544,	541,6	611,	727,7	955,6	806,1	534,4	589,	461,	409,	474	
	Min.	61,6	103,	72,5	105,	63,9	154,2	197,8	127,9	94,1	84,0	42,9	71	
PÁRAMOS DE JARAMILLO M689	Medi	113,	134,	133,0	154,	169,8	214,5	199,8	178,0	153,	123,	114,	115	1804
	Max.	321,	326,	223,9	242,	236,0	389,1	287,5	282,4	292,	188,	199,	231	
	Min.	40,0	67,0	62,0	73,0	100,3	99,3	121,3	95,0	72,0	68,0	77,9	50	

Anexo B2. Precipitación media de la cuenca del Río Topo (Estación: México – H1)

PRECIPITACIÓN MEDIA H1				
P1 (mm)	P2 (mm)	Pi (mm)	Ai (Km2)	Pi * Ai
3000	3500	3250	3,07	9977,5
3500	4000	3750	27,56	103350,0
4000	4500	4250	93,96	399330,0
4500	5000	4750	243,00	1154250,0
5000	5500	5250	14,09	73972,5
SUMA			381,68	1740880,0
Precipitación media de la cuenca				4561

Anexo B3. Temperaturas medias de estaciones cercanas a la cuenca del Río Topo

Estación	Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
BAÑOS	M029	18.3	18.1	18.4	18.4	18	17.2	16.7	16.9	17.7	18.6	18.8	18.6
TENA	M070	23.9	23.8	23.7	23.7	23.7	23.3	23	23.4	23.8	24.1	24	24
AGOYAN EN LA PRESA	M220	18.1	18.1	18.3	18.2	18.1	17.7	17.1	16.8	17.3	18.2	18.8	17.9
PUYO	M008	21.3	21.2	21.3	21.4	21.1	20.6	20.2	20.7	21.1	21.6	21.7	21.4

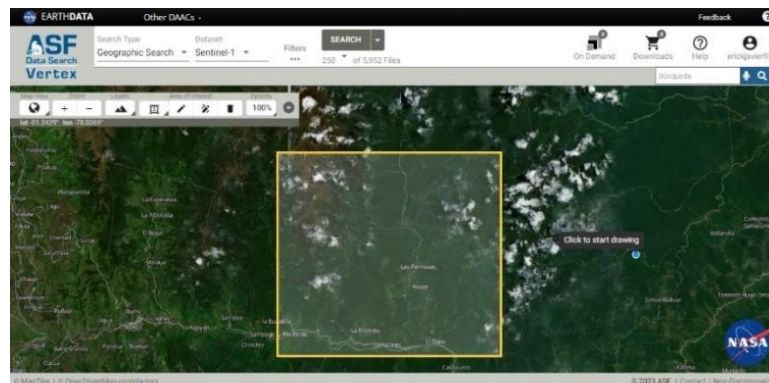
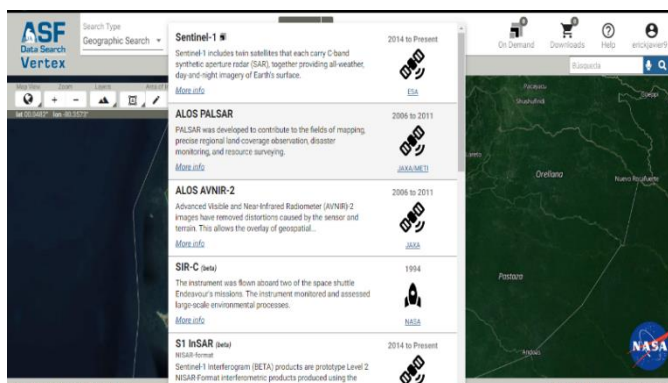
Anexo B4. Variación mensual de la humedad relativa media (%)

Estación	Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
BAÑOS	M029	82,8	84,8	83,4	83,9	85,4	86,1	85,7	84,5	83,3	83,1	82,8	83,4
TENA	M070	87	87	87,2	87	87	87,3	87	85,6	85,2	84,6	85,5	85,8
PUYO	M008	89,3	89,4	89,7	90	90,2	90,2	89	86,7	87	87,5	88,7	89,6

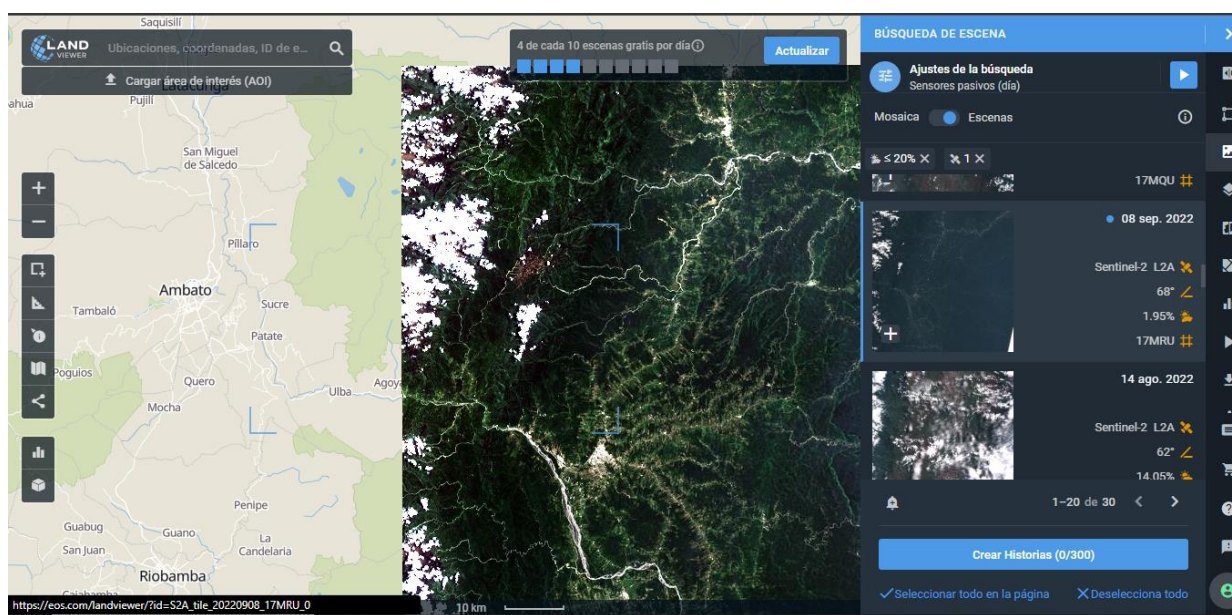
Anexo B5. Precipitación media de la cuenca Río Verde

Precipitación Media Cuenca Río Verde				
P1 (mm)	P2 (mm)	Pi (mm)	Ai (Km2)	Pi * Ai
2000	2500	2250	14,83	33367,5
2500	3000	2750	31,95	87862,5
3000	3500	3250	29,82	96915,0
3500	4000	3750	27,72	103950,0
4000	4500	4250	28,99	123207,5
SUMA			133,31	445302,5
Precipitación media de la cuenca				3340

Anexo C. Satélite Alos Palsar para la descarga del DEM



Anexo D. Descarga del formato ráster para la determinación de los NDVI

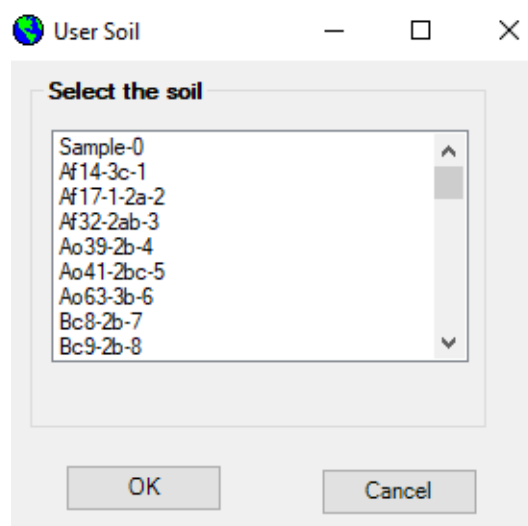


Anexo E. Apéndice A, tabla A-2 de la FAO, usos del suelo

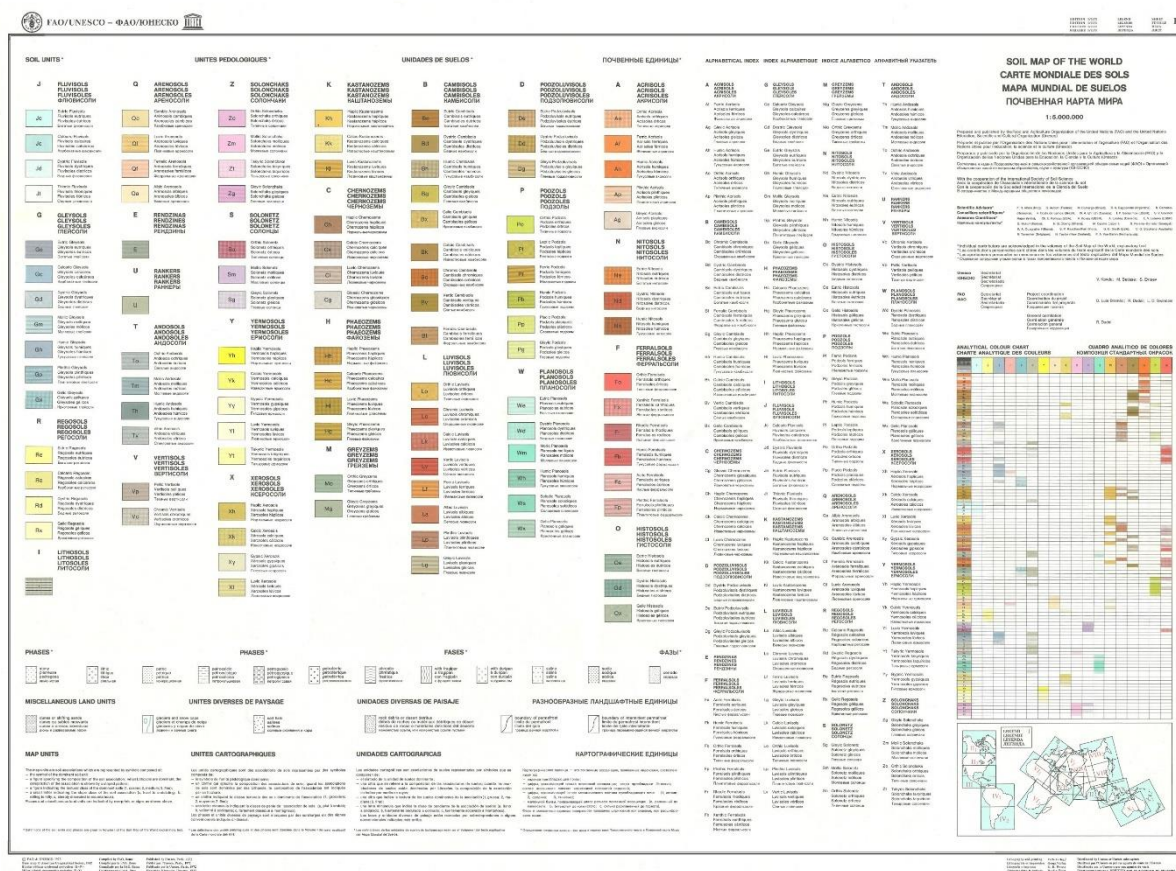
Table A-2: Generic Land Covers included in database.

Name	Plant Code	Origin of Plant Growth Values	Plant Type
Agricultural Land-Generic	AGRL	use values for Grain Sorghum	warm season annual
Agricultural Land-Row Crops	AGRR	use values for Corn	warm season annual
Agricultural Land-Close-grown	AGRC	use values for Winter Wheat	cool season annual
Orchard	ORCD	use values for Apples	trees
Hay [†]	HAY	use values for Bermudagrass	perennial
Forest-mixed	FRST	use values for Oak	trees
Forest-deciduous	FRSD	use values for Oak	trees
Forest-evergreen	FRSE	use values for Pine	trees
Wetlands	WETL	use values for Alamo Switchgrass	perennial
Wetlands-forested	WETF	use values for Oak	trees
Wetlands-nonforested	WETN	use values for Alamo Switchgrass	perennial
Pasture [†]	PAST	use values for Bermudagrass	perennial
Summer pasture	SPAS	use values for Bermudagrass	perennial
Winter pasture	WPAS	use values for Fescue	perennial
Range-grasses	RNGE	use values for Little Bluestem ($LAI_{max}=2.5$)	perennial
Range-brush	RNGB	use values for Little Bluestem ($LAI_{max}=2.0$)	perennial
Range-southwestern US	SWRN	use values for Little Bluestem ($LAI_{max}=1.5$)	perennial
Water*	WATR		not applicable

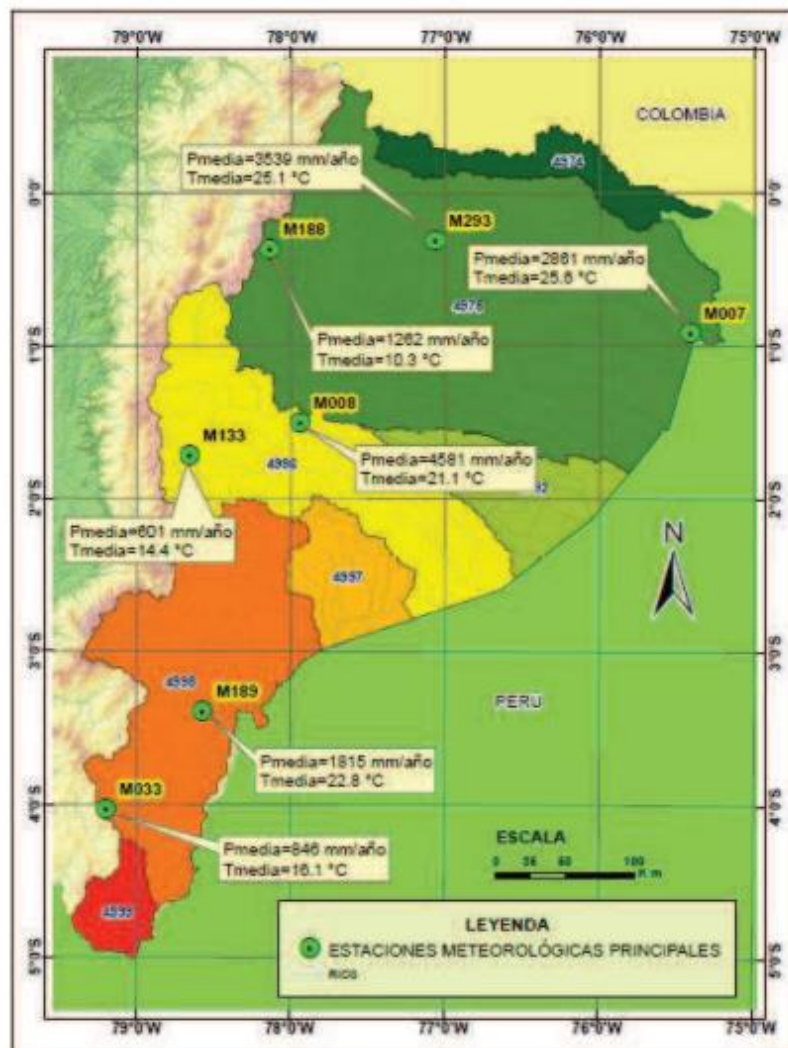
Anexo F1. Interfaz del uso del suelo en el modelo SWAT



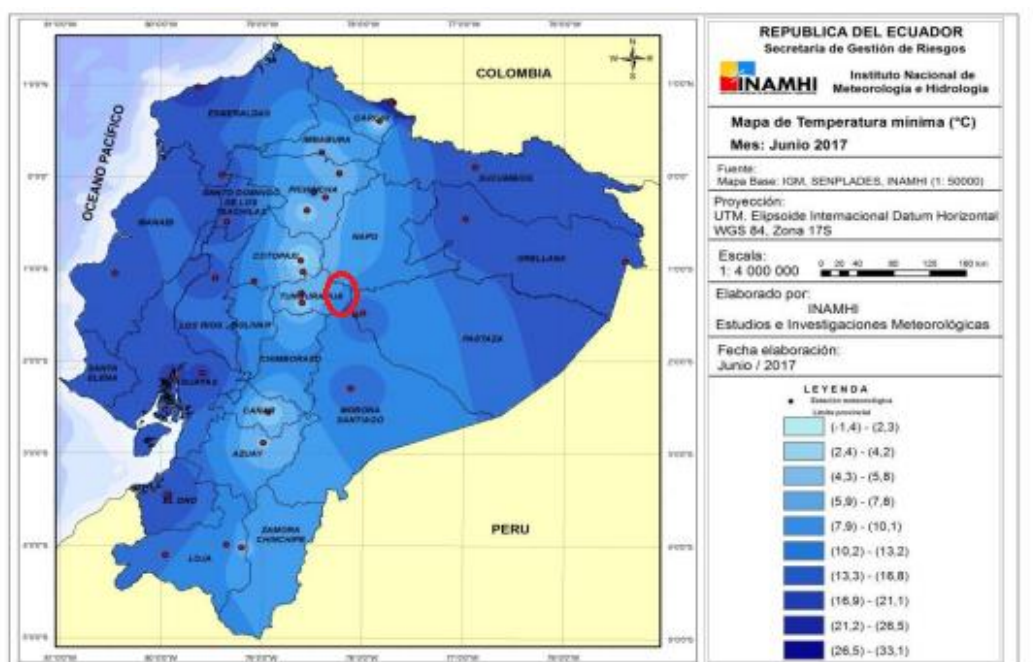
Anexo F2. Mapa mundial del suelo de la FAO/UNESCO (1)



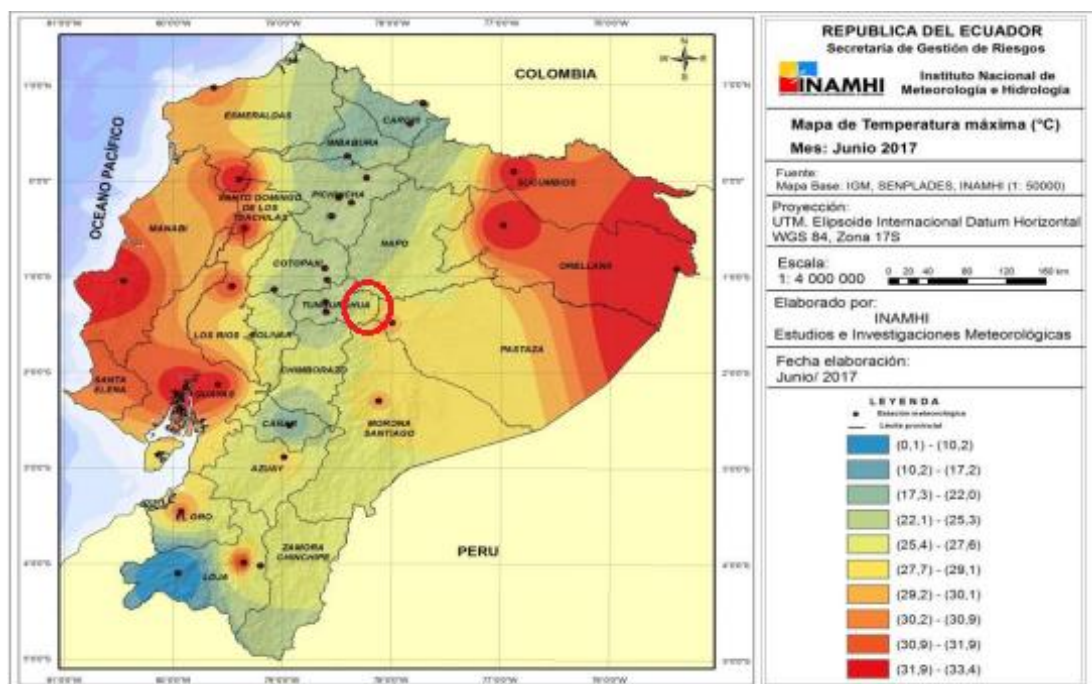
Anexo G. Localización de las estaciones meteorológicas más representativas de la Amazonía ecuatoriana (Ramírez & Rosero, 2013)



Anexo H1. Temperatura mínima a nivel nacional (INAMHI, 2017)



Anexo H2. Temperatura máxima a nivel nacional (INAMHI, 2017)



Anexo I1. Evapotranspiración potencial y medida (Ramírez & Rosero, 2013)

ESTACIÓN	CÓDIGO	EVPT. POTENCIAL (mm)	EVP. MEDIDA (mm)
NUEVO ROCAFUERTE	M007	1451.3	1024.24
EL CARMELO	M101	618.2	767.58
PALMORIENTE-H.	M293	1388.6	1186.10
LUMBAQUI	MB77	1205.5	1072.60
RUMIPAMBA	M004	678.7	1485.05
PUYO	M008	968.0	880.07
BAÑOS	M029	799.4	1067.36
SANGAY(P.SANTA ANA)	M041	1025.1	751.47
P. FERMIN CEVALLOS	M128	644.6	1213.99
PUNGALES	M243	690.9	1550.60
QUEROCHACA	M258	662.6	1230.08
CALAMACA CONVENIO IN	MA1Y	592.7	434.24
TOTORILLAS	MB83	623.9	910.00
LA ARGELIA-LOJA	M033	733	1103.98
LAS PALMAS	M045	701.9	1052.38
GUALAQUIZA	M189	1106.9	879.03
YANZATZA	M190	1143.8	1251.10
JACARIN SOLANO	M197	679.4	1264.33
PENAS COLORADAS	M217	688.4	906.82
CHANLUD-CONVENIO	MA41	564.9	716.13
EL CEBOLLAR - CUENCA	MB90	723.4	1419.60

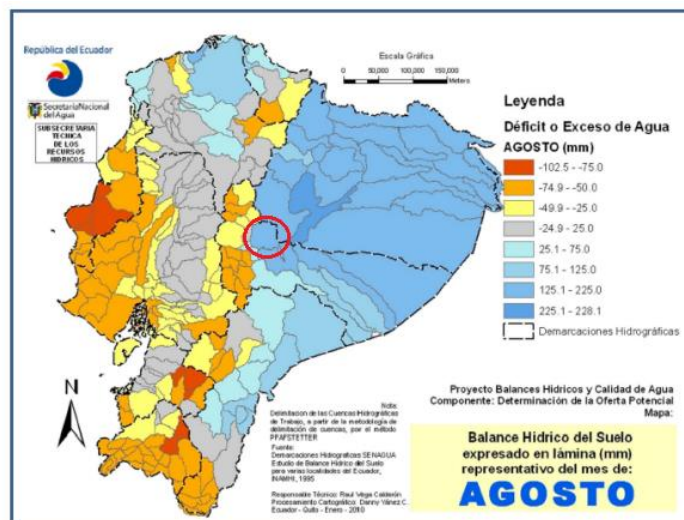
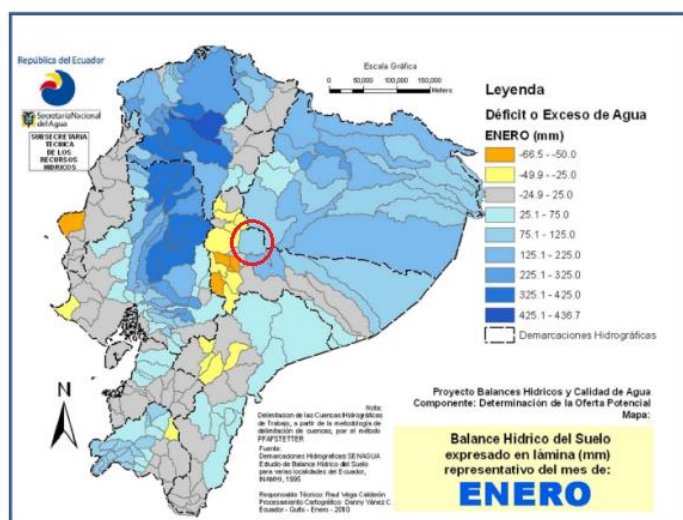
Anexo I2. Evapotranspiración potencial y real del uso del suelo (Ramírez & Rosero, 2013)

USO DEL SUELO	UNIDAD HIDROGRÁFICA	CÓDIGO	EVPT. POTENCIAL (mm)	EVPT. REAL (mm)	DIFERENCIA (mm)
AGRÍCOLA	4978	M007	1451.3	925.1	526.2
AGRÍCOLA		M101	618.2	535.9	82.3
AGRÍCOLA		M293	1388.6	930.9	457.7
CONSERVACION		MB77	1205.5	944.2	261.3
AGROPECUARIO	4996	M004	678.7	436.3	242.4
AGROPECUARIO		M008	968.0	837.7	130.3
AGROPECUARIO		M029	799.4	605.8	193.6
AGRÍCOLA		M041	1025.1	854.4	170.7
AGRÍCOLA		M128	644.6	413.7	231.0
AGRÍCOLA		M243	690.9	434.8	256.0
AGRÍCOLA		M258	662.6	440.2	222.3
AGROPECUARIO		MA1Y	592.7	438.6	154.1
FORESTAL		MB83	623.9	416.9	207.0
PECUARIO		M033	733	557.65	175.4
PECUARIO		M045	701.9	618.68	83.2
AGROPECUARIO		M189	1106.9	812.11	294.8
AGROPECUARIO	4998	M190	1143.8	845.2	298.6
AGROPECUARIO		M197	679.4	513.0	166.5
AGRÍCOLA		M217	688.4	660.5	27.9
AGRÍCOLA		MA41	564.9	485.7	79.2
AGROPECUARIO		MB90	723.4	528.4	195.0

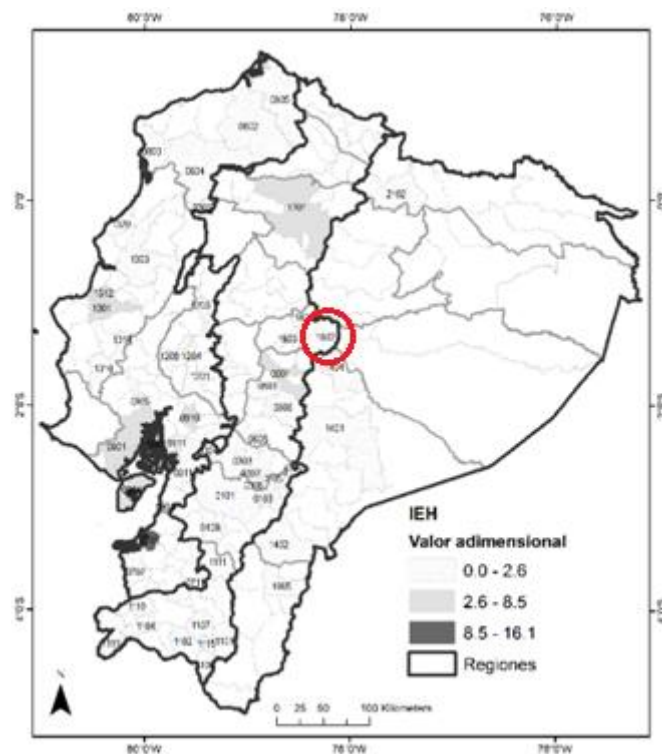
Anexo J. Clasificación del suelo en función de su infiltración

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76mm/h	Arenosa Arenosa-limosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración <13 mm/h	Arcillosa

Anexo K. Déficit o exceso de agua en el Ecuador (Rivera, 2016)



Anexo L. Mapa de estrés hídrico en el Ecuador (Chamba et al., 2019)



Anexo M. Curvas de duración de cada subcuenca

Anexo N. Hidrograma de cada Subcuenca

Anexo O. Curva de recesión para cada

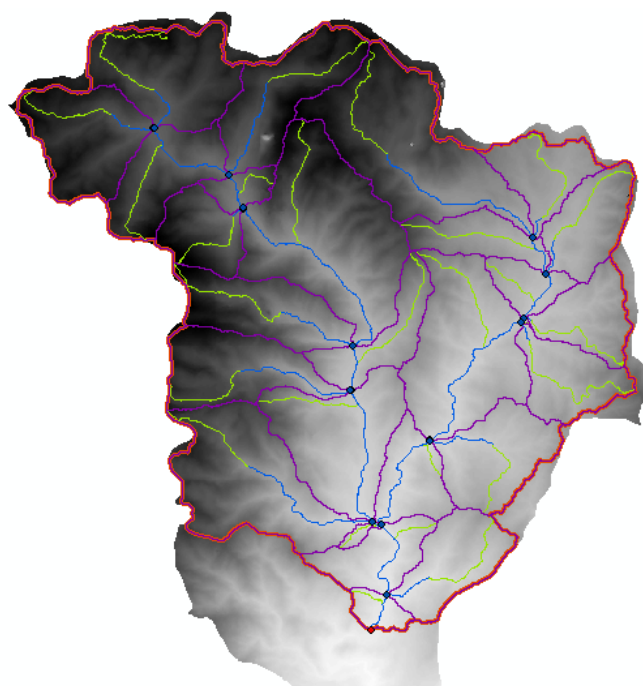
Anexo P. Caudales base para cada subcuenca

Anexo Q. Hidrograma de caudal específico de cada subcuenca

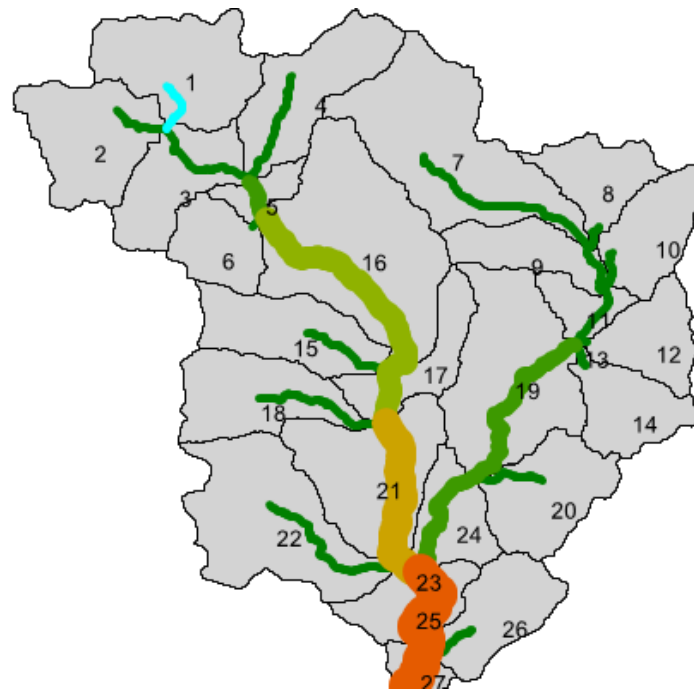
Anexo R. Breve descripción y rangos de los parámetros de calibración en SWAT-CUP (Jodar et al., 2018)

Parámetro	Descripción (unidad)	Rango Iter1 (Min.....Máx.)	Valor fijado Iter5 (NSE)
R_CN2.mgt	CN2: número de curva de escurrimiento inicial, según el SCS (<i>Soil Conservation Service</i>), para la condición de humedad II (humedad media). Adimensional.	[-0.2....0.2]	-0.158
V_ALPHA_BF.gw	α_{gw} : factor alfa del caudal base (1/días).	[0.0....1.0]	0.001
V_GW_DELAY.gw	δ_{gw} : periodo de retardo de las aguas subterráneas (días).	[30.0..450.0]	110.946
V_GWQMN.gw	$aqshthr,q$: umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo necesario para que se produzca el flujo de retorno hacia la superficie (mm H ₂ O).	[0.0....2.0]	0.851
R_SOL_AWC(x).sol	AWC_{ly} : capacidad de agua disponible en la capa de suelo x (mm H ₂ O/mm suelo).	[-0.2....0.4]	0.129
R_SOL_K(x).sol	Ksat: conductividad hidráulica saturada de la capa de suelo x (mm/hr).	[-0.8....0.8]	-0.267
R_SOL_BD(x).sol	pb: Densidad aparente húmeda en la capa de suelo x (Mg/m ³).	[-0.5....0.6]	0.784
R_ESCO.hru	ESCO: factor de compensación de la evaporación del suelo (adimensional).	[0.8....1.0]	0.792
V_GW_REVAP.gw	β_{rev} : coeficiente "Revap" de las aguas subterráneas (adimensional).	[0.0....0.2]	0.279
R_SLSUBBSN.hru	L_{slp} : longitud media de la pendiente (m).	[0.0....0.2]	0.125
V_SFTMP.bsn	Ts-r: temperatura de las nevadas. Es la temperatura media del aire en la que la probabilidad de que la precipitación caiga como nieve es análoga a que caiga como lluvia helada (°C).	[-5.0....5.0]	-3.716
V_REVAPMN.gw	$aqshthr,rvp$: umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo necesario para que se produzca el coeficiente "Revap" o la percolación del agua hacia el acuífero profundo (mm H ₂ O).	[0.0....10.0]	5.576
R_HRU_SLP.hru	slp: inclinación media de la pendiente (m/m).	[0.0....0.2]	0.136
R_OV_N.hru	n: valor del coeficiente de rugosidad "n" de Manning para el flujo superficial (adimensional).	[-0.2....0.0]	-0.067

Anexo S. Delimitación de la cuenca del Río Topo hasta su punto de desagüe con sus microcuencas



Anexo T. Visualización del número de microcuencas por medio del software SWAT Output Viewer

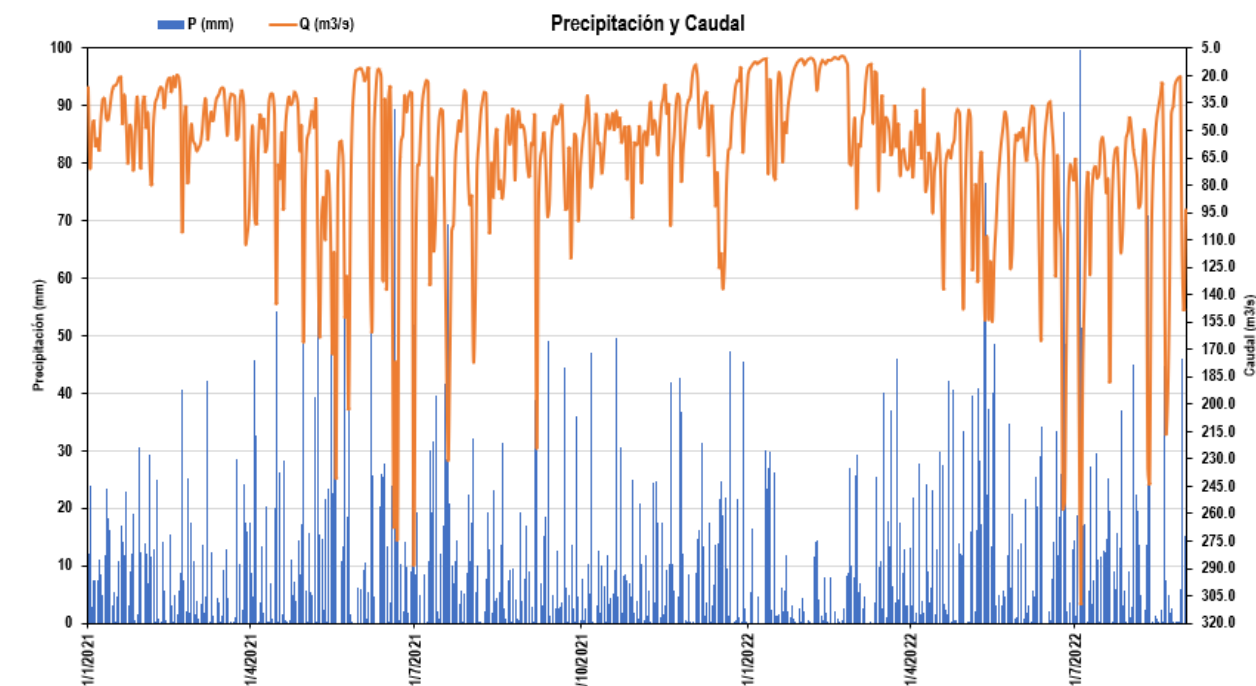


Anexo U. Factores para conversión de unidades en la variable de radiación usados en la FAO

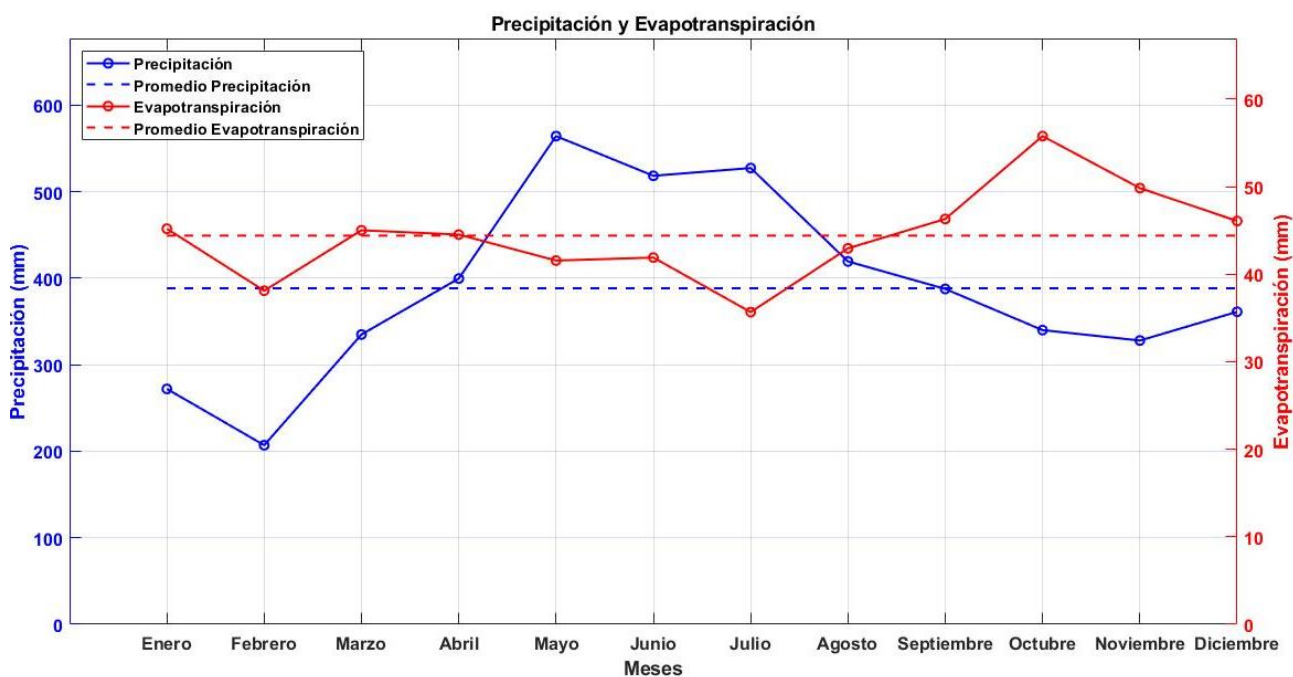
Factores de conversión para la radiación

	Factor multiplicador para obtener la energía recibida en una superficie por unidad de tiempo				Evaporación equivalente mm día ⁻¹
	MJ m ² día ⁻¹	J cm ² día ⁻¹	cal cm ² día ⁻¹	W m ²	
1 MJ m ² día ⁻¹	1	100	23,9	11,6	0,408
1 cal cm ² día ⁻¹	4,1868 x 10 ⁻²	4,1868	1	0,485	0,0171
1 W m ²	0,0864	8,64	2,06	1	0,0353
1 mm día ⁻¹	2,45	245	58,5	28,4	1

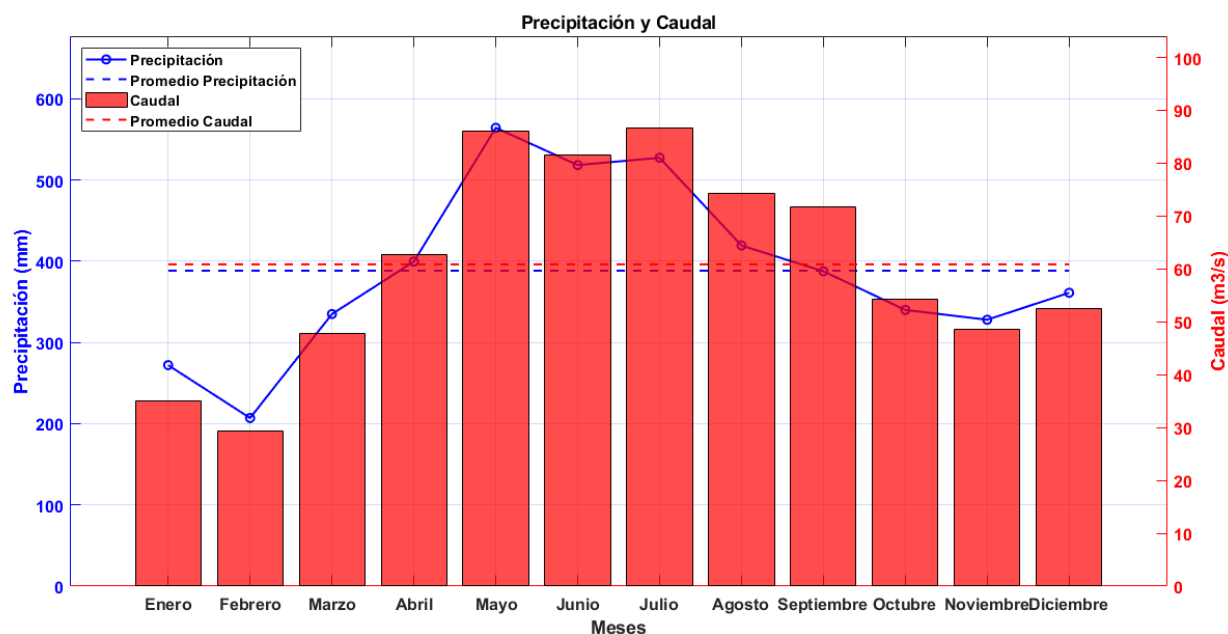
Anexo V. Precipitación vs caudal a escala diaria



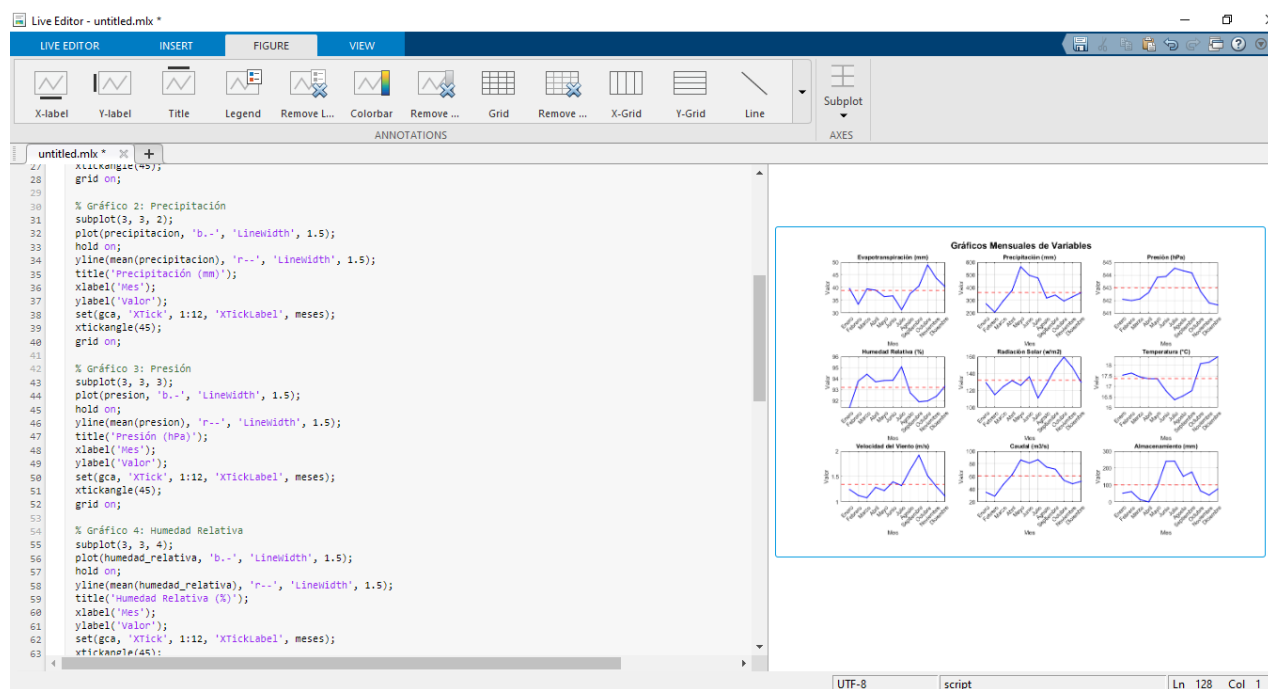
Anexo W. Precipitación vs evapotranspiración mensual



Anexo X. Precipitación vs caudal mensual.



Anexo Y. Interfaz Matlab como herramienta para cálculos y gráficas.



Anexo Z1. Interfaz Excel como herramienta para cálculos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	Time	T_max	T_min	T °C	Hr (%)	Vel_V (m/s)	Rs (W/m2)	Pb (hPa)	z (msnm)	u2 (m/s)	Δ (kPa/°C)	P (kPa)	Y (kPa/°C)	eT (kPa)	ea (kPa)	es
2	1/1/2021 0:15	16.80333333	16.76333333	16.79	99.14333333	0.3	0	843.0533333	1576	0.22438532	0.12136837	84.30533333	0.05606305	1.91209162	1.89571137	0.0
3	1/1/2021 0:30	16.73333333	16.67	16.73333333	99.13666667	0.7	0	842.89	1576	0.52356575	0.12098645	84.289	0.05605219	1.90522462	1.88877618	0.0
4	1/1/2021 0:45	16.66	16.61333333	16.66	99.21666667	1.26666667	0	842.6433333	1576	0.9474047	0.12049371	84.26433333	0.05603578	1.89636999	1.88151509	0.0
5	1/1/2021 1:00	16.55666667	16.45	16.55666667	99.20666667	1.63333333	0	842.3866667	1576	1.22165342	0.1198023	84.23866667	0.05601871	1.88935421	1.86900817	0.0
6	1/1/2021 1:15	16.40333333	16.31666667	16.40333333	99.21333333	2.36666667	0	842.11	1576	1.77015088	0.11878253	84.211	0.05600032	1.86566203	1.85095849	0.0
7	1/1/2021 1:30	16.29666667	16.26	16.29666667	99.30333333	2.46666667	0	841.9866667	1576	1.84494599	0.11807748	84.19866667	0.05599211	1.853029	1.84011957	0.0
8	1/1/2021 1:45	16.22666667	16.13	16.22666667	99.37666667	2.66666667	0	841.8766667	1576	1.9945362	0.11761673	84.18766667	0.0559848	1.84477937	1.83328025	0.0
9	1/1/2021 2:00	16.08333333	16.01333333	16.08333333	99.36333333	3.53333333	0	841.7633333	1576	2.64276047	0.11667804	84.17633333	0.05597726	1.82798762	1.81634943	0.0
10	1/1/2021 2:15	15.99666667	15.97666667	15.99666667	99.32	3.56666667	0	841.7333333	1576	2.66769217	0.11611355	84.17333333	0.05597527	1.81789958	1.80553787	0.0
11	1/1/2021 2:30	15.98	15.91666667	15.97333333	99.31666667	3.23333333	0	841.6966667	1576	2.41837514	0.11596197	84.16966667	0.05597283	1.81519192	1.80278811	0.0
12	1/1/2021 2:45	15.88666667	15.74666667	15.88333333	99.20333333	3.63333333	0	841.63	1576	2.71755557	0.11537887	84.163	0.0559684	1.80478117	1.79040308	0.0
13	1/1/2021 3:00	15.66666667	15.55	15.66666667	98.98333333	3.8	0	841.5066667	1576	2.84221409	0.11398532	84.15066667	0.05596019	1.77993261	1.76183662	0.0
14	1/1/2021 3:15	15.49666667	15.38666667	15.49666667	98.88666667	3.6	0	841.3133333	1576	2.69262387	0.11290195	84.13133333	0.05594734	1.76064651	1.74104464	0.0
15	1/1/2021 3:30	15.32	15.18	15.32	98.61333333	3.06666667	0	841.2833333	1576	2.29371663	0.11178537	84.12833333	0.05594534	1.74079844	1.71665937	0.0
16	1/1/2021 3:45	15.11333333	15	15.11333333	98.79	2.9	0	841.3466667	1576	2.16905812	0.11049111	84.13466667	0.05594955	1.71782913	1.6970434	0.0
17	1/1/2021 4:00	14.95	14.88	14.95	98.83666667	3.9	0	841.3633333	1576	2.91700919	0.10947725	84.13633333	0.05595066	1.69986441	1.68008932	0.0
18	1/1/2021 4:15	14.86333333	14.81333333	14.86333333	98.96333333	3.9	0	841.3666667	1576	2.91700919	0.1089425	84.13366667	0.05594889	1.69039917	1.67287537	0.0
19	1/1/2021 4:30	14.79333333	14.74333333	14.79	98.66666667	2.86666667	0	841.2666667	1576	2.14412642	0.10849176	84.12666667	0.05594423	1.68242626	1.65999391	0.0
20	1/1/2021 4:45	14.85	14.68333333	14.77	98.20666667	2.66666667	0	841.3333333	1576	1.9945362	0.10836911	84.13333333	0.05594867	1.68025756	1.65012494	0.0
21	1/1/2021 5:00	14.67666667	14.58666667	14.67666667	98.17666667	2.96666667	0	841.7	1576	2.21892152	0.10779827	84.17	0.05597305	1.67016935	1.63971659	0.0
22	1/1/2021 5:15	14.62666667	14.59	14.59	98.53333333	3.6	0	842.1033333	1576	2.69262387	0.10727051	84.21033333	0.05599987	1.66084933	1.6364902	0.0
23	1/1/2021 5:30	14.63666667	14.63	14.63333333	98.33333333	3.1	0	842.51	1576	2.31864833	0.10753412	84.251	0.05602691	1.66550362	1.63774523	0.0
24	1/1/2021 5:45	14.66666667	14.63666667	14.63666667	98.63	3.46666667	0	842.7066667	1576	2.59289706	0.10755442	84.27066667	0.05603999	1.66586212	1.6430398	0.0
25	1/1/2021 6:00	14.72	14.68	14.69	98.41666667	3.83333333	0.33333333	842.7633333	1576	2.86714579	0.10787967	84.27633333	0.05604376	1.67160726	1.64514015	0.0
26	1/1/2021 6:15	14.73333333	14.69	14.69333333	98.07333333	3.23333333	5.33333333	842.97	1576	2.41837514	0.10790002	84.297	0.0560575	1.67196691	1.63975368	0.0
27	1/1/2021 6:45	14.76	14.71	14.72333333	97.7	2.2	20.66666667	843.1466667	1576	1.64549237	0.10808337	84.31466667	0.05606925	1.67520679	1.63667204	0.0

Anexo Z2. Interfaz Colab como herramienta para cálculos.

```
[ ] import keras
from keras import layers
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.metrics import mean_absolute_error

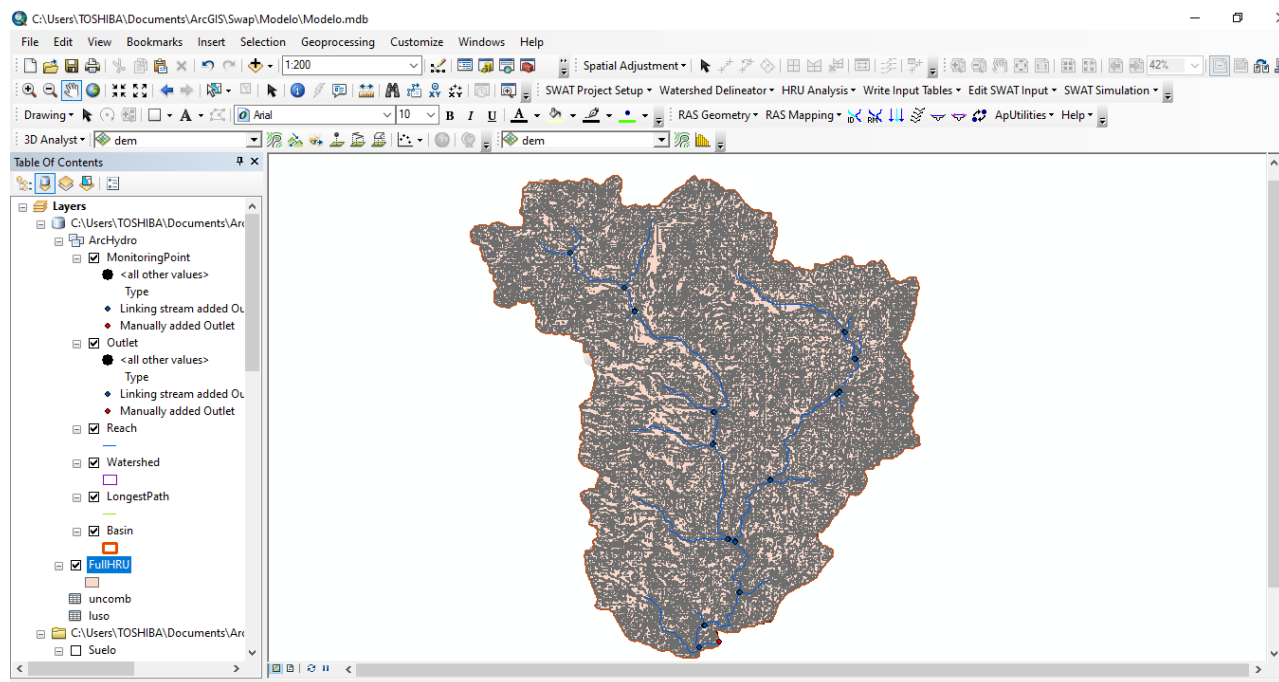
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

Mounted at /content/drive

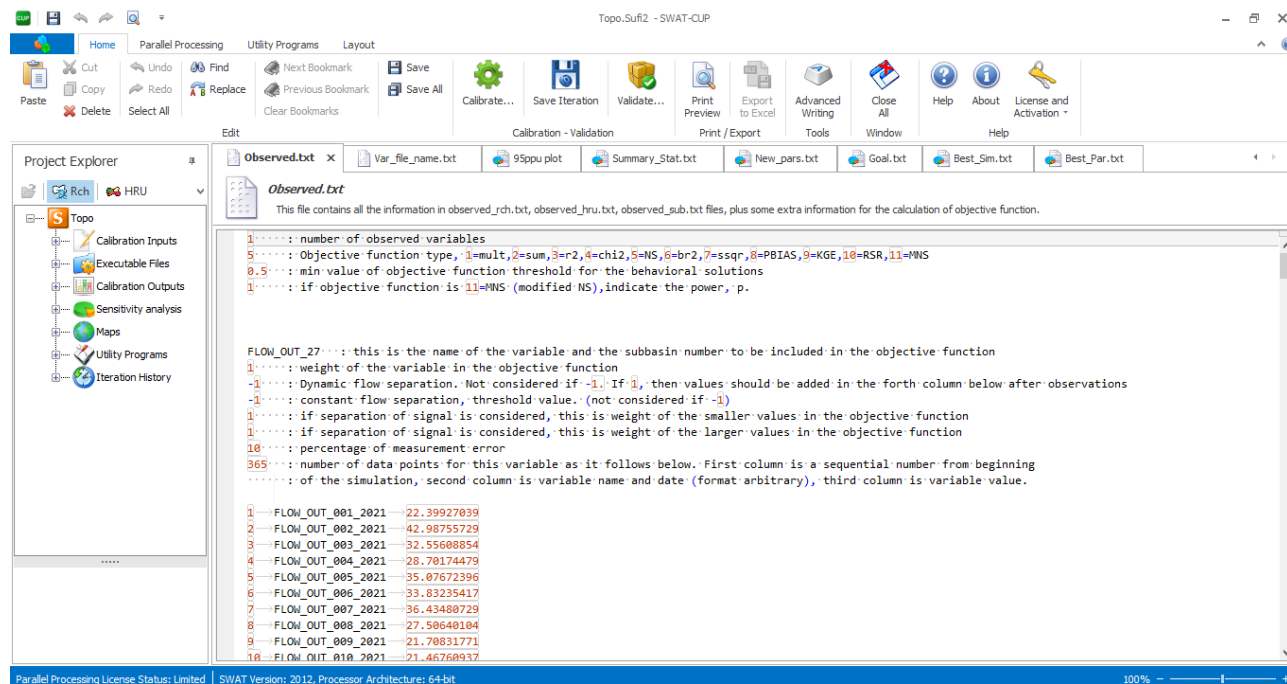
[ ] dataset = pd.read_csv("/content/drive/MyDrive/erick2/erick/Sim.csv", sep=',',
# usecols=["TS", "rainAWS", "tempAWS", "humtAWS", "CUUP_A", "cuup.T_Avg.", "TUUP_A", "tuup.T_Avg."],
parse_dates=["Time"], dayfirst=True, index_col=["Time"])

dataset = dataset.dropna()
```

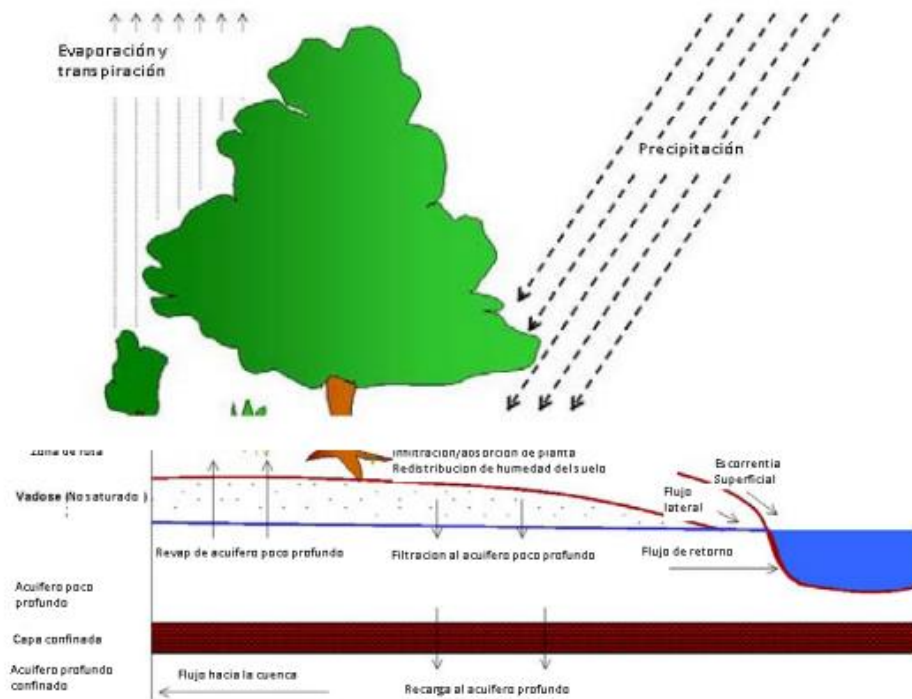
Anexo Z3. Interfaz Arc-Swat como herramienta para el análisis de cuencas hidrográficas.



Anexo Z4. Interfaz Swat-Cup como herramienta para calibración del modelo Swat



Anexo Z5. Representación esquemática del ciclo hidrológico en SWAT (Neitsch et al., 2005)



Anexo Z6. Ilustración de los tipos de acuíferos (Documentación SWAT)

