



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN EL ECOSISTEMA
PÁRAMO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO TAHUANDO

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

AUTORES:

Guamán Caballero Bryan Ismael

Rodas Velarde Diego Sebastián

DIRECTOR:

Ing. Gabriel Jácome MSc.

Ibarra - Ecuador

2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN No. 001-073-CEAACES-2013-13

Ibarra-Ecuador

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES**

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ibarra, 27 de octubre del 2022

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: "EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN EL ECOSISTEMA PÁRAMO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TAHUANDO", de autoría del señor Guarnán Caballero Bryan Ismael y el señor Rodas Velarde Diego Sebastián estudiantes de la Carrera de INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES el tribunal tutor CERTIFICAMOS que los autores han procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

MSc. Gabriel Jácome
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

MSc. Jorge Ramírez
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

MSc. Óscar Rosales
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TRITULACIÓN

Misión Institucional:

Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEA/ACRS-2013-13
Barro-Ecuador

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CEDULA :	100398668-2
NOMBRES Y APELLIDOS:	Bryan Ismael Guamán Caballero
DIRECCION:	Calle Inés Hernández y Río Intag, Ibarra
EMAIL:	ismaell90713@gmail.com
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	0983322483

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN EL ECOSISTEMA PÁRAMO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TAHUANDO
AUTORES:	Guamán Caballero Bryan Ismael Rodas Velarde Diego Sebastián
FECHA:	27 de octubre del 2022

SOLO PARA TRABAJO DE TITULACION		
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO	<input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Recursos Naturales Renovables	
DIRECTOR:	Ing. Gabriel Jácome MSc.	

MISIÓN INSTITUCIONAL: Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CRAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CEDULA :	100375116-9
NOMBRES Y APELLIDOS:	Diego Sebastián Rodas Velarde
DIRECCION:	Av. Mariano Acosta 26 – 200 , Ibarra
EMAIL:	srodas41@gmail.com
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	(06) 2 631 698 0986759705

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN EL ECOSISTEMA PARAMO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TAHUANDO
AUTORES:	Rodas Velarde Diego Sebastián Guamán Caballero Bryan Ismael
FECHA:	27 de octubre del 2023
SOLO PARA TRABAJO DE TITULACION	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	Ing. Gabriel Jácome MSc.

MISIÓN INSTITUCIONAL: Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.

2. Constancias

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y son titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumimos la responsabilidad sobre el contenido de esta y saldremos en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros

Ibarra, a los 27 días del mes de octubre del 2022

Los autores



.....
Guamán Caballero Bryan Ismael
C.I. 100398668-2



.....
Rodas Velarde Diego Sebastián
C.I. 100375116-9

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios por darnos la fuerza, valor y fortaleza para seguir adelante en este arduo camino llenando de aprendizaje y experiencia compartidas hacia la excelencia académica.

A nuestros padres y familiares quienes han aportado con sus valores, enseñanzas, principios para el cumplimiento de este sueño que hoy se plasma en la realidad, demostrando que un tropezón nunca es caído. Estamos muy orgullosos de ser sus hijos y esta felicidad la queremos compartir con ustedes.

Reconocemos el apoyo y la labor constante de cada uno de nuestros asesores Msc. Óscar Rosales; Msc. Jorge Ramírez y director MSc. Gabriel Jácome que han buscado la manera de sobrellevar sus conocimientos hasta lo más sublime en lo que refiere a la educación en representación de la Universidad Técnica del Norte y a la vez estipular que el sacrificio que cada uno de ustedes ponen en favor de la educación superior imbabureña a quienes expresamos nuestra infinita gratitud.

De manera especial agradecemos al MSc. Marcelo Ponce y la MSc. Elizabeth Velarde quienes han colaborado desde el principio con sus conocimientos y gestión técnica, además de la predisposición atendida, a quienes estaremos muy agradecidos para que esta investigación haya sido culminada con éxito.

No está por demás mencionar al personal docente de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, quienes, a lo largo de nuestro paso, hemos valorado el esfuerzo que cada uno de ustedes han aportado y hoy en día se ve reflejado los resultados. Infinitas gracias y tengan la plena seguridad que van en el camino correcto.

Y como agradecimiento infinito a la prestigiosa Universidad Técnica del Norte quienes han brindado los recursos necesarios para la formación profesional de los estudiantes creando “Ciencia y Tecnología al servicio del pueblo”.

¡Gracias infinitas!

Bryan Guamán y Sebastián Rodas

DEDICATORIA

En memoria de quien en vida fue la señora Elvira Cabrera Sanmartín.

Este trabajo se lo dedico especialmente a mi segunda madre Carmelina Cruz y mi segundo padre Miguel Velarde quienes desde muy chico me han inculcado los valores primordiales para la formación personal y profesional, demostrando siempre que no hay que desmayar en situaciones adversas, siempre hay una solución.

Por otra parte, dedico a mi madre Mónica Velarde que será siempre mi pilar fundamental y mi ejemplo por seguir, por ser una mujer valiente, aguerrida y sobre todo por ser la mejor madre del mundo.

Este triunfo también va dedicado a mi tía Elizabeth y Lorena Velarde que son las personas que más aprecio por tener siempre un consejo de apoyo y aliento para continuar cuando se presenta situaciones difíciles y de reprenderme cuando estoy muy equivocado. A mi tía Nancy Rodas que siempre he contado con un sabio consejo cuando lo necesito. Infinitas gracias a todas ustedes.

A mis amigos por toda la confianza que han depositado en mí a lo largo de los años. A Dennis, a Karla, a Ebelyn, al MSc. Marcelo Ponce que se ha convertido más que un amigo, es mi hermano, y a mi primo Santiago que han demostrado ser siempre leales y muy considerados; saben que tienen en mí una mano amiga cuando lo necesiten.

A todas las personas que me faltan mencionar, un sincero agradecimiento por ser parte de esta felicidad que hoy comparto con ustedes.

¡Éxitos y augurios a cada uno en sus vidas!

Sebastián Rodas

DEDICATORIA

Me encantaría dedicar el presente trabajo con todo el amor y cariño a los pilares fundamentales en mi formación profesional como lo es mi familia, en especial a mis padres Mariana y Miguel, ya que, son ellos quienes han estado en todo momento pendiente de mí, y con sus bendiciones a diario a lo largo de mi vida me han protegido y me llevan por el camino del bien. De igual forma a mis hermanos Alex, Gabriela, Joselyn y Anahí que con su ejemplo de formación me han incentivado a crecer profesionalmente.

De igual forma dedico con todo mi corazón este trabajo a mi compañera de vida, mi amiga, mi confidente, mi novia Leidy, porque ha sido mi soporte sobre la tierra, quien con su amor, cariño y ejemplo me ha llenado de orgullo e ilusión para poder culminar con éxito mi formación como profesional

Dedico también a toda esa gente que mira en mí, un ejemplo de superación a quienes de una u otra forma han estado allí cuando lo necesité en este camino largo de formación y les digo ¡Si lo sueñas lo lograrás!

Bryan Guamán

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido

RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Revisión de antecedentes.....	1
1.2. Problema de investigación y justificación.....	4
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Pregunta directriz	6
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	7
2.1. Marco teórico referencial	7
2.1.1. La cuenca hidrográfica y sus factores hidrometeorológicos	7
2.1.2. Disponibilidad hídrica de una cuenca hidrográfica.....	10
2.1.3. Oferta y demanda hídrica	10
2.1.3.1. Oferta hídrica	10
2.1.3.2. Demanda hídrica	11
2.1.4. Balance hídrico en una cuenca hidrográfica.....	11
2.1.4.1. Variables de un balance hídrico	12
2.1.5. Componente biofísico del páramo.....	14
2.1.5.1. Cambio de uso de suelo en el ecosistema páramo.....	17
2.1.6. Cambio del uso de suelo mediante imágenes satelitales	17
2.2. Marco legal.....	20
2.2.1. Constitución de la República del Ecuador	20
2.2.2. Tratados Internacionales.....	21
2.2.3. Código Orgánico del Ambiente (CODA).....	21
2.2.4. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)	22
2.2.5. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua 22	
2.2.6. Ordenanzas Municipales	23
CAPÍTULO III METODOLOGÍA	24

3.1.	Descripción del área de estudio.....	24
3.1. 2.	Hidrología.....	25
3.1.1.3.	Clima	25
3.1.1.4.	Taxonomía del suelo	27
3.1.1.5.	Uso potencial del suelo.....	28
3.1.1.6.	Uso de suelo y cobertura vegetal.....	29
3.1.1.7.	Zonas de vida según Holdridge	31
3.2.	Métodos	32
3.2.1.	Caracterización temporal del cambio de uso de suelo en el ecosistema páramo.	32
3.2.1.1.	Procesamiento de imágenes satelitales del uso del suelo	32
3.2.2.	Determinación de los factores hidrometeorológicos	34
3.2.2.1.	Precipitación y temperatura.....	34
3.2.2.2.	Evapotranspiración potencial	35
3.2.2.3.	Escurrimiento.....	36
3.2.2.3.1.	Vegetación:.....	36
3.2.2.3.2.	Pendiente del terreno:	36
3.2.2.3.3.	Cálculo del coeficiente de escurrimiento.....	37
3.2.2.3.4.	Cálculo del coeficiente de escurrimiento.....	37
3.2.2.4.	Infiltración	37
3.2.2.5.	Capacidad de retención de agua en el suelo	39
3.2.2.6.	Evapotranspiración real	40
3.2.2.7.	Caudal hídrico	41
3.2.2.8.	Balace hídrico.....	42
3.2.2.9.	Demanda hídrica.....	43
3.2.3.	Establecimiento de estrategias de conservación del recurso hídrico.....	43
3.2.3.1.	Identificación de los problemas que afectan el estado de conservación de los ecosistemas y el desarrollo productivo	43
3.2.3.2.	Diseño de las estrategias.....	44
3.3.	Materiales y equipos.....	45
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		46
4.1.	Análisis espaciotemporal del cambio de uso de suelo.....	46
4.2.	Factores hidrometeorológicos en el ecosistema páramo	50
4.2.1.	Precipitación	51
4.2.1.2.	Evapotranspiración potencial (ETP)	54
4.2.1.3.	Escurrimiento.....	56

4.2.1.3.1. Vegetación.....	56
4.2.1.3.2. Pendiente del terreno	56
4.2.1.3.3. Cálculo del coeficiente de escorrentía.....	57
4.2.1.3.4. Cálculo del escurrimiento superficial.....	58
4.2.1.4. Infiltración	60
4.2.1.4.1. Validación de la infiltración en la cobertura páramo	63
4.2.1.5. Capacidad de retención	65
4.2.1.6. Evapotranspiración real	67
4.2.2. Balance hídrico.....	69
4.2.2.3. Caudal.....	73
4.2.2.3.1. Perfil del área.....	73
4.2.2.3.2. Caudal aforado	74
4.3. Propuesta de estrategias de conservación del recurso hídrico en función del modelo hidrológico obtenido.....	75
4.3.1 Identificación de problemáticas.....	76
4.3.2 Matriz de Vester	76
4.3.3 Establecimiento de estrategias de conservación.....	78
4.3.3.1 Estrategia 1. Recuperación y conservación de suelos en áreas intervenidas.	78
4.3.3.2 Estrategia 2. Protección de remanentes de bosque y páramo en las parroquias de Angochagua y Zuleta.	81
4.3.3.3 Estrategia 3. Transición de agricultura y ganadería común a una sostenible.	83
4.3.3.4 Estrategia 4. Capacitación constante a las comunidades sobre la importancia del manejo y conservación del medio ambiente.....	85
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
5.1. Conclusiones	87
5.2. Recomendaciones	88
REFERENCIAS	89
ANEXOS	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resoluciones espaciales de las bandas de los sensores Landsat 5 y 7..	19
Tabla 2. Resoluciones espaciales de las bandas del sensor Landsat 8.	20
Tabla 3. Tipo de drenajes de los cuerpos de agua.	25
Tabla 4. Tipos de clima dentro de la cuenca alta del río Tahuando.	27
Tabla 5. Orden taxonómico del suelo en la cuenca alta del río Tahuando.	28
Tabla 6. Uso potencial del suelo de la cuenca alta del río Tahuando.	29
Tabla 7. Cobertura vegetal de la cuenca alta del río Tahuando.	30
Tabla 8. Zonas de vida de la cuenca alta del río Tahuando según Holdridge.	31
Tabla 9. Valorización del índice Kappa.	34
Tabla 10. Componentes del coeficiente de infiltración.	37
Tabla 11. Capacidad de retención de humedad en el suelo (mm/m).	39
Tabla 12. Esquema del programa a ejecutarse.	45
Tabla 13. Materiales y equipos.	45
Tabla 14. Cobertura vegetal existente en el periodo 2000 – 2020.	47
Tabla 15. Precipitación acumulada desde el 2000 – 2020 (mm/año).	51
Tabla 16. Evapotranspiración obtenida mediante fórmula de Thornthwaite (mm/año).	54
Tabla 17. Datos de escorrentía superficial (l/s) del período 2000 – 2020.	59
Tabla 18. Datos de infiltración (precipitación efectiva en mm/año).	61
Tabla 19. Resultados prueba de infiltración – cobertura páramo.	64
Tabla 20. Retención real de humedad en el suelo (mm/año).	65
Tabla 21. Evapotranspiración real (mm/año).	68
Tabla 22. Uso y caudales de las concesiones en la zona de estudio.	75
Tabla 23. Problemáticas existentes en la zona de estudio.	77
Tabla 24. Programa de conservación y recuperación de suelos en áreas intervenidas.	80
Tabla 25. Programa para la protección de remantes de bosque y páramo en las parroquias de Angochagua y Zuleta.	82
Tabla 26. Programa de transición de agricultura y ganadería común a una sostenible.	84

Tabla 27. Programa para la capacitación constante a las comunidades sobre la importancia del manejo y conservación del medio ambiente. 86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distinción de sectores de una cuenca hidrográfica.....	8
Figura 2. Entradas, salidas y cambios en el almacenamiento de una cuenca hidrográfica.	9
Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio.....	24
Figura 4. Climograma de la parroquia de Angochagua	26
Figura 5. Infiltrómetro de doble anillo.....	39
Figura 6. Aforo de caudal con el molinete electromagnético MF Pro.....	41
Figura 7. Punto de monitoreo del río Tahuando (cota 2360 msnm).	42
Figura 8. Ganancias y pérdidas de las coberturas vegetales existentes.	48
Figura 9. Cobertura vegetal existente en la cuenca alta del río Tahuando desde 2000 – 2020.....	50
Figura 10. Precipitación media anual del período 2000 – 2020.	53
Figura 11. Validación de los datos de precipitación.	54
Figura 12. Evapotranspiración potencial del área de estudio.....	55
Figura 13. Pendientes de la zona de estudio.	57
Figura 14. Coeficiente de escorrentía del ecosistema páramo.	58
Figura 15. Escorrentía superficial del ecosistema páramo.....	60
Figura 16. Infiltración existente en la zona de estudio.	63
Figura 17. Velocidad de infiltración en la cobertura páramo. A) Época seca B) Época lluviosa	64
Figura 18. Capacidad potencial de retención del agua en el suelo.	66
Figura 19. Retención del agua en el suelo.	67
Figura 20. Evapotranspiración real de la zona de estudio.....	69
Figura 21. Balance hídrico en el año 2000.....	70
Figura 22. Balance hídrico en el año 2015.....	71
Figura 23. Balance hídrico en el 2020	72
Figura 24. Perfil y velocidad del lecho del río Tahuando.....	73
Figura 25. Categorización de las problemáticas	78

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Mapa de la ubicación del ecosistema páramo en la cuenca alta del río Tahuando.....	103
Anexo 2. Mapa hidrológico de la cuenca alta del río Tahuando	104
Anexo 3. Mapa taxonómico del suelo de la cuenca alta del río Tahuando.....	105
Anexo 4. Mapa de uso potencial del suelo de la cuenca alta del río Tahuando..	106
Anexo 5. Mapa de coberturas de la cuenca alta del río Tahuando	107
Anexo 6. Mapa de zonas de vida de la cuenca alta del río Tahuando	108
Anexo 7. Precipitaciones en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando.....	109
Anexo 8. Evapotranspiración potencial en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando	110
Anexo 9. Escorrentía en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando	111
Anexo 10. Precipitación efectiva (infiltración) en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando.....	112
Anexo 11. Retención de agua en el suelo en la cobertura de páramo en la cuenca alta del río Tahuando.....	113
Anexo 12. Evapotranspiración real en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando	114
Anexo 13. Aforo de caudal con el molinete MF Pro	115
Anexo 14. Toma de datos de caudal en época seca y lluviosa	115
Anexo 15. Socialización de las problemáticas con el personal técnico y los comuneros de Angochagua	116
Anexo 16. Balance hídrico en el ecosistema páramo año 2000.....	117
Anexo 17. Balance hídrico en el ecosistema páramo en el año 2015	118
Anexo 18. Balance hídrico en el ecosistema páramo en el año 2020.....	119

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN EL ECOSISTEMA PÁRAMO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO TAHUANDO

Guamán Caballero Bryan Ismael

Rodas Velarde Diego Sebastián

RESUMEN

Los páramos son ecosistemas primordiales para el abastecimiento y almacenamiento del recurso hídrico por tal razón presenta una mayor susceptibilidad a cualquier alteración en su estructura y composición del paisaje, a causa del avance de la frontera agrícola, la intensificación del pastoreo vacuno e inclusive el incremento en la tasa de deforestación. El presente estudio determinó y cuantificó la distribución del agua en función de la cobertura páramo a través del análisis de todos los factores influyentes en un balance hídrico, con el uso de herramientas SIG, a su vez se realizó un análisis al cambio de cobertura vegetal para los períodos comprendidos entre los años 2000-2015-2020. Se determinó que el aumento de los cultivos y pastos causó un decrecimiento en el área de vegetación arbustiva, pasando de 4459.85 ha (23.79%), en el 2000, a 1796.12 ha (9.58%) en 2020. En la determinación del balance hídrico se calculó el caudal para época seca (400 l/s) y lluviosa (690 l/s), evidenciando un déficit de agua a nivel de cuenca hidrográfica debido a los distintos usos identificados (principalmente uso doméstico y riego), mientras que en el ecosistema páramo se registró un superávit considerable en función del caudal promedio (1687 l/s) obteniendo un caudal para la época seca 1753 l/s y 1809 l/s para la época lluviosa, debido a que presentó valores más altos referente a la infiltración lo que indica que este ecosistema influye en la recarga de acuíferos y abastecimiento de agua, por consiguiente se diseñaron estrategias establecidas en función del modelo hidrológico con una tendencia hacia el manejo, cuidado y preservación del área de estudio. Se concluyó que, a pesar de los cambios de cobertura vegetal existentes, el páramo no presentó alteraciones en el aporte de caudal en los afluentes que conforman el río Tahuando, manteniendo su papel de abastecimiento y recarga de acuíferos.

Palabras clave: Ecosistema, Acuíferos, Factores hidrometeorológicos, Caudal, Escorrentía, Infiltración.

ABSTRACT

The moorlands are essential ecosystems for the supply and storage of water resources, and for this reason they are more susceptible to any alteration in their structure and landscape composition. Due to the advance of the agricultural frontier, the intensification of cattle grazing and even the increase in the rate of deforestation. The present study determined and quantified the distribution of water according to the paramo coverage through the analysis of all the influential factors in a water balance, with the application of GIS tools, as well as an analysis of the change in vegetation cover for the periods between 2000-2015-2020. Among the results, it was established that the increase in crop and pasture cover caused a decrease in shrub vegetation, from 4459.85 ha (23.79%) in 2000 to 1796.12 ha (9.58%) in 2020. To determine the water balance, the flow was calculated for the dry season (400 l/s) and rainy season (690 l/s), showing a water deficit at the watershed level due to the different uses identified (mainly domestic use and irrigation), while in the paramo ecosystem there was a considerable surplus in terms of the average flow (1687 l/s), obtaining a flow for the dry season of 1753 l/s and 1809 l/s for the rainy season, due to the fact that it presented higher values in terms of infiltration, which indicates that this ecosystem influences the recharge of aquifers and water supply, therefore strategies were designed based on the hydrological model with a tendency towards the management, care, and preservation of the study area. It was concluded that, despite the changes in the existing vegetation cover, the paramo didn't present alterations in the flow contribution in the tributaries that make up the Tahuando river, maintaining its role of supplying and recharging aquifers.

Key words: Ecosystem, Aquifers, Hydro-meteorological factors, Flow, Runoff, Infiltration.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Revisión de antecedentes

El desarrollo de la humanidad ha dependido de la disponibilidad de los recursos hídricos, sin embargo, el uso desmedido y una deficiente distribución ha causado un notable deterioro del agua (Camacho-Ponce, 2020). Durante varios años se ha gestionado el agua con el fin de garantizar el suministro de servicios claves para el bienestar de la sociedad, pero la presión humana sobre el recurso hídrico ha venido alterando sustancialmente su ciclo natural, agravando su disponibilidad y limitando la capacidad de los ecosistemas (Villaruel-Montano, 2021).

Las interferencias antrópicas fundamentalmente se basan en el cambio de uso del suelo provocada por la tala indiscriminada, expansión de la frontera agrícola, contaminación de cuerpos de agua, aumento de asentamientos poblacionales en zonas de recarga hídrica, entre otros (Santillán-Gutiérrez *et al.*, 2013). Para tener un manejo adecuado del recurso hídrico, se debe considerar a una rama de las ciencias de la Tierra como es la hidrología, cuyas aplicaciones prácticas se encuentran en labores tales como el diseño, operación de estructuras hidráulicas, abastecimiento de agua, tratamiento y disposición de aguas residuales, irrigación, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones, navegación, erosión, control de sedimentos (Joret, 2008), cuyo rol se basa en el análisis de los problemas relacionados con estas labores y promover una guía para el planteamiento y manejo eficiente del agua.

La disponibilidad del recurso hídrico está relacionada con los procesos naturales que se originan en las cuencas hidrográficas, a través de la interacción entre fenómenos naturales de precipitación y evaporación que se presentan a corto y largo plazo en conjunto con las características del suelo, la vegetación y los cambios climáticos y meteorológicos, evidenciando la importancia para el

abastecimiento de agua en los cauces incluso en épocas secas (Villacis-Quiñonez, 2014). Con el transcurso del tiempo se ha evidenciado cambios profundos en el balance hídrico, el ciclo del carbono y los ecosistemas de la tierra, siendo estas alteraciones provocadas por los cambios simultáneos y rápidos a nivel global, por la temperatura de la superficie de la tierra, precipitaciones y cambios en la cobertura del suelo (Poma-Copa y Usca-Tiuquina, 2020).

A partir de la determinación de un balance hídrico es posible realizar una evaluación cuantitativa de los recursos hídricos, en este caso de una cuenca hidrográfica, relacionándola con las modificaciones ocasionadas por las actividades del hombre, entonces, se obtiene una comparativa de recursos específicos de agua en un sistema, en diferentes períodos de tiempo, y el establecimiento del grado de influencia en variaciones del régimen natural (Martínez *et al.*, 2021). Razón por la que los estudios hidrológicos a nivel de cuencas hidrográficas, son considerados como una unidad territorial más aceptada para la gestión integrada de los recursos hídricos (Torres-Romero y Proaño-Santos, 2018).

La mayoría de las cuencas hidrográficas del Ecuador no tienen un manejo adecuado (Vásquez *et al.*, 2016), ya que existe generalmente una mala planificación, ausencia de políticas, desinterés de la población en general, acompañado del inevitable aumento demográfico y la explotación de los recursos hídricos para la satisfacción de las necesidades de la población se genera que el ciclo hidrológico se vea afectado, porque según Torres-Romero y Proaño-Santos (2018) estiman que todos los procesos productivos que se realiza en la cuenca ocasionan una disminución de los caudales llegando incluso a valores por debajo del caudal ecológico, el cual es vital para todas las formas de vida presentes en la cuenca.

En el estudio desarrollado por Ruiz-Reyes (2016) se evidencia la afectación del recurso hídrico por los impactos del cambio climático global y la dinámica entre la oferta y la demanda hídrica, así como las implicaciones que tiene los eventos de máximas crecidas de los ríos en épocas de alta precipitación y baja temperatura, del

mismo modo con los eventos extremos de sequía en épocas de baja precipitación y alta temperatura, generando alta presión sobre el abastecimiento del líquido vital.

Los procesos del ciclo hidrológico, cambios en la morfología, extensión, calidad e inventario hídrico son herramientas para determinar las características de las fuentes hídricas y así buscar el correcto uso y control del agua con el fin de satisfacer las necesidades del ser humano (Torres-Romero y Proaño-Santos, 2018), estos estudios pueden ser realizados a través de modelos hidrológicos, representando de forma simplificada los sistemas hidrológicos reales, los cuales contribuyen a identificar las respuestas a eventos naturales o de origen antrópico. El modelamiento hidrológico contribuye a comprender la simulación de procesos hídricos a través de enfoques conceptuales y matemáticos ya establecidos (Falcones-Rodríguez *et al.*, 2021), es decir que se relaciona parámetros físicos, geológicos, climáticos, hidrometeorológicos con las características del suelo como lo son el tipo de cobertura vegetal, de suelo, etc.

En estudios de modelamiento hidrológico el Centro de Ingeniería Hidrológica (CIH) de los Estados Unidos ha diseñado un software denominado Sistema de Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS), en donde se emplea diversas metodologías de cálculo para la simulación de sistemas hidrológicos, simulando hidrogramas de una cuenca o de varias subcuencas mediante eventos extremos de tormentas, de igual forma se puede utilizar métodos de cálculo basados en hidrogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y la conversión en escorrentía directa (Estrada, 2021).

En su estudio Ipiates-Arroyo (2022) menciona que en el Ecuador se cuenta con información base sobre los fenómenos hidrometeorológicos permitiendo comprender la variación climática, sin embargo, esta información es demasiada abstracta debido a la falta de integración de variables propias de los sistemas hídricos y la dinámica de sus cauces, así como también las condiciones de suelo y vegetación (Falcones *et al.*, 2021). Esta variabilidad climática presenta cambios sobre el comportamiento temporal y espacial de los parámetros

hidrometeorológicos debido a los impactos en el cambio climático, que se relaciona con eventos de épocas secas más marcadas y la falta de disponibilidad de agua para solventar las necesidades naturales y antrópicas de las cuencas hidrográficas (Murillo-Quijada, 2022).

1.2. Problema de investigación y justificación

El recurso hídrico se encuentra bajo presión creciente e inclusive aún existe un sin número de personas que carecen de un suministro de agua adecuado para satisfacer sus necesidades básicas por diversas razones, que van desde una distribución natural irregular, a causas antropogénicas (Castro *et al.*, 2004). Es necesario tener en cuenta que al momento en que la sociedad contamina el agua o modifica la morfología de los cursos de agua, está modificando la cantidad y calidad del agua en los ecosistemas, comprometiendo el bienestar ambiental, social y económico (Vargas y Téllez, 2019).

Los ecosistemas de altura son los mayores proveedores de agua, pero a pesar de la importancia mencionada, no existen los suficientes datos cuantificados en lo referente a la disponibilidad del recurso o balances hídricos en cuencas andinas (Enríquez-Ruíz, 2018) y en la presente área de estudio no es la excepción. Si a esta carencia se unifica la presencia de zonas pobladas con un número significativo de pobladores distribuidas en las parroquias de Angochagua y La Esperanza en donde se realizan actividades agrícolas, agropecuarias, ganaderas, entre otras, se incrementa los impactos negativos para el recurso hídrico de la microcuenca del río Tahuando, porque en el desarrollo de las actividades antes mencionadas no se considera las épocas de sequía en donde el caudal hidrológico disminuye (IpiALES-Arroyo, 2022).

A propósito, en el Ecuador hasta el 2019, existieron 1 309 764.20 hectáreas de ecosistema páramo (Morocho y Chunchu, 2019) representando un 5% del territorio nacional, el ecosistema antedicho es más susceptible a las alteraciones en su estructura y composición del paisaje es por ello que se considera importante

mencionar que el decrecimiento anual es del 16.85%, es decir que se pierde 377.79 ha/año a causa de las diversas presiones antrópicas a las está sujeto.

La toma de decisiones para realizar un manejo o conservación del agua deben enfocarse bajo un conocimiento previo de las funciones y servicios que dicho ecosistema brinda, viéndolo como un recurso indispensable para el aprovechamiento de las generaciones futuras (Buytaert, 2017). Por esta razón, es necesario cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico en la zona de estudio por medio de la implementación del balance hídrico, porque de este modo al observar el comportamiento de los procesos hidrológicos, sus componentes como evaporación, transpiración, escurrimiento, entre otros en conjunto con los cambios negativos que existen en la microcuenca, permite determinar el grado de afectación, su dinámica y fundamentalmente predecir las tendencias de cambio (Paz, 2019).

La presente investigación permitirá a los representantes de los GADs Parroquiales Rurales tanto de Angochagua como de La Esperanza, cuantificar la disponibilidad hídrica a la que está sujeta el páramo de la cuenca alta del río Tahuando a través del balance hídrico tomando en cuenta sus factores hidrometeorológicos y cartográficos, con el objetivo de mantener la dinámica de las actividades antrópicas del sector, generando una gestión adecuada del líquido vital y así contribuir a la toma de decisiones y planificaciones a corto, mediano y largo plazo. El trabajo realizado sirve como línea base para la elaboración de estrategias y políticas de gestión integral del recurso hídrico determinados en el Plan de Creación de Oportunidades del 2021, específicamente en su objetivo 13, cuya finalidad es distribuir de forma equitativa el agua a todo el territorio nacional con énfasis en la protección, recuperación y conservación de ecosistemas asociados a unidades hidrográficas (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar el balance hídrico en el ecosistema páramo de la cuenca alta del río Tahuando mediante un modelo hidrológico y cartográfico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar temporalmente el cambio de uso de suelo en el ecosistema páramo de la cuenca alta del río Tahuando.
- Determinar los factores hidrometeorológicos en el ecosistema páramo del área de estudio para la obtención del balance hidrológico.
- Proponer estrategias de conservación del recurso hídrico en función del modelo hidrológico obtenido.

1.4. Pregunta directriz

¿Cómo contribuirá la determinación del balance hídrico a una adecuada propuesta de conservación del recurso agua en el ecosistema páramo de la cuenca alta del río Tahuando?

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Marco teórico referencial

2.1.1. La cuenca hidrográfica y sus factores hidrometeorológicos

Para Castillo (2015) la cuenca hidrográfica es un territorio que delimita y drena el curso de un cuerpo de agua incluyendo ecosistemas terrestres como selvas, bosques, pastizales y ecosistemas acuáticos ya sea un riachuelo, ríos, arroyos o lagos cercanos en función del lugar donde se colecta el agua que desemboca hacia un mismo cauce. Además, considera que las condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales a las que las cuencas hidrográficas son importantes considerar como unidades de planificación (Araque-Arellano *et al.*, 2019).

En la cuenca hidrográfica, se distinguen tres sectores estratégicos como se visualiza en la Figura 1 en la que se evidencia una predominancia de socavación y un elevado grado de erosión en la parte alta, mientras que en la parte media existe un equilibrio entre el material sólido que llega y sale por la corriente, y en la parte baja se visualiza el discurrimiento el río principal y sus afluentes sobre relieve planos donde el material se deposita tal como manifiesta Arteaga-Gutiérrez (2020). Los tres sectores característicos de la cuenca hidrográfica radican en función a los rasgos topográficos del territorio y este último puede influenciar en los procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos (Llerena, 2003). Se reconoce que la cantidad y disponibilidad del agua se debe a factores influyentes como el relieve, clima y acciones antrópicas, donde se debe hacer énfasis en los estudios posteriores para verificar el comportamiento hídrico en funciones de dichos factores a través de un tiempo determinado.



Figura 1. Distinción de sectores de una cuenca hidrográfica.

Como menciona Johansen *et al.* (2019) las cuencas hidrográficas cubren un área específica territorial, donde el agua lluvia y el deshielo de los glaciares son puntos principales para la captación de agua y retención de esta según su función. Para Cominelli (2019) los ingresos de agua a una cuenca hidrográfica pueden darse de diversas formas:

- Precipitaciones como puede ser la lluvia, granizo, nieve y condensaciones.
- Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas con límites colindantes puesto que, en ciertos casos, los límites de acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de la divisoria de aguas que separan a las cuencas hidrográficas.
- Transvase de agua a partir de otras cuencas hidrográficas que pueden estar asociadas a:
 - Descargas de centrales hidroeléctricas pues sustentan en la captación del agua en otra cuenca diferente, por lo regular esta situación es frecuentemente realizada en zonas con valles en paralelo, construyendo así presas que están unidas por medio de canales o túneles que servirán para el funcionamiento de una única central hidroeléctrica.
 - Descargas de aguas servidas de la urbe las cuales se captan el agua para consumo humano e industrial fuera de la cuenca, pues se ha

hecho más frecuente por la expansión territorial influenciando así en la calidad de agua.

Además, Cominelli (2019) en su publicación determina que las salidas de agua al igual que las entradas pueden darse de diversas maneras:

- Evapotranspiración a partir de bosques y áreas cultivadas
- Evaporación desde cuerpos de agua (ríos, lagos, estanques, pantanos, etc.)
- Infiltraciones profundas destinadas a la alimentación de acuíferos
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas
- Destinado concretamente para consumo humano e industrial
- Salida de la cuenca hacia un receptor o al mar

Bajo este marco conceptual, el autor se refiere al establecimiento del balance hídrico como un problema muy complejo en el cual menciona una considerable cantidad de mediciones en campo y la separación entre el balance de aguas superficiales y subterráneas. Además, detalla que el modelo que se quiera aplicar permitirá identificar el nivel de erosión de una zona específica en función de las variaciones existentes como detalla Bustamante-Quintero (2016) en la Figura 2.



Figura 2. Entradas, salidas y cambios en el almacenamiento de una cuenca hidrográfica.

2.1.2. Disponibilidad hídrica de una cuenca hidrográfica

La disponibilidad hídrica se considera una unidad en la determinación la cantidad de agua disponible para el uso y el consumo en la cuenca hidrográfica. De acuerdo con Amador-García *et al.* (2011) la disponibilidad de agua surge como resultado del establecimiento de la escurrimiento natural de una unidad hidrográfica, de las concesiones que están destinadas para uso antrópico y finalmente de las demandas que exige el mismo ambiente o territorio.

De acuerdo con la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), citado por Cabrera *et al.* (2012), el Ecuador es uno de los países que posee mayor disponibilidad hídrica que bordea aproximadamente los 20 700 m³/habitante/año, sin embargo, el 80% de la disponibilidad hídrica se dirige a la vertiente amazónica donde la distribución poblacional es menor.

2.1.3. Oferta y demanda hídrica

2.1.3.1. Oferta hídrica

La oferta hídrica corresponde al volumen precipitado sobre la cuenca y cumplido con la evapotranspiración en infiltración del sistema suelo-cobertura vegetal, satisfaciendo de esa manera a la demanda que se genera por las actividades socioeconómicas del hombre (Aponte-Pérez y Galeano-Franco, 2017). Además, se utiliza para la planificación y gestión integrada, debido a que es una herramienta para la determinación del estrés hídrico y en los índices que se utilizan para estimar la satisfacción del recurso hídrico en un sector de uso determinado (Bueno-Pérez *et al.*, 2019). Las variables que se consideran para la determinación de la oferta hídrica corresponden a la precipitación, temperatura, evapotranspiración real y el escurrimiento.

2.1.3.2. Demanda hídrica

La demanda hídrica según García *et al.* (2012) requiere de un abastecimiento de agua para los distintos usos (industrial, agropecuario) que se los considera críticos por su alto consumo de agua. En estudios realizados en el país sobre la demanda hídrica los cálculos se realizan con base en las captaciones de agua existentes que representan los usos de agua y los flujos de retorno asociados a cada uso de agua (González *et al.*, 2010). El caudal de retorno es la parte del consumo que vuelve a la red hidrográfica de la cuenca de manera directa o indirecta. En otras palabras, es el caudal que no se consume de manera real y que tampoco se evapora o transpira (Díaz-Bustos, 2017). En la cuantificación de la demanda se deben integrar la mayor parte de las actividades que requieren del recurso hídrico, para poder modelar el comportamiento y su distribución en el tiempo, además de la planificación de su uso sostenible (García *et al.*, 2012).

$$DT = DUD + DUI + DUS + DUA + DUP \quad (1)$$

Donde:

DT : Demanda total de agua (l/s)

DUD: Demanda de agua para uso doméstico. (l/s)

DUI : Demanda de agua para uso industrial. (l/s)

DUS : Demanda de agua para el sector servicios. (l/s)

DUA : Demanda de agua para uso agrícola. (l/s)

DUP : Demanda de agua para uso pecuario. (l/s)

2.1.4. Balance hídrico en una cuenca hidrográfica

El balance hidrológico se define como el equilibrio de los recursos hídricos que ingresan y salen de un sistema lacustre, en una función de un intervalo de tiempo determinado (Santillán-Gutiérrez *et al.*, 2013). Otros autores lo definen como la disponibilidad hídrica existente en un territorio y período de tiempo; permitiendo realizar mediante una comparación entre los aportes y las pérdidas de agua del territorio y el tiempo existente (Duque-Sarango *et al.*, 2019). Se tienen en

cuenta también factores adicionales como la naturaleza del territorio y las interacciones sobre las reservas hídricas.

La ecuación del balance hídrico es considerada la ley más importante en hidrología, y aunque su expresión es muy simple, sin embargo, la cuantificación de sus términos es medianamente complicada debido a la inexactitud de medidas directas, las variaciones de la evapotranspiración, las pérdidas profundas y la cantidad de agua que es almacenada en cada cuenca. De manera general la ecuación global del balance hídrico se visualiza a continuación:

$$Z_m + Z_s = X_m + X_s \quad (2)$$

En donde Z_m (mm) y Z_s (mm) corresponden a los valores de la evaporación en los mares y en la superficie, mientras que X_m (mm) y X_s (mm) representan la precipitación en los mares y en la superficie.

A partir de esta ecuación se determinan variaciones para la obtención del balance hidrológico en diferentes zonas como se desarrolla en la superficie.

$$X_s = Z_s + Y_c \quad (3)$$

En donde X_s (mm) corresponde al valor de la precipitación en la superficie, Z_s (mm) es la evaporación en la superficie y Y_c (mm) se la denomina la escorrentía superficial. Se puede afirmar que esta ecuación consiste en una cuantificación de las entradas y salidas de agua y que la diferencia entre los ingresos y los egresos dan origen a la escorrentía superficial (Toro-Guerrero *et al.*, 2014).

2.1.4.1. Variables de un balance hídrico

➤ Precipitación

La precipitación varía tanto espacial como temporalmente en una cuenca, se lo puede considerar como el agua que cae en una zona determinada, y puede

presentarse en forma de neblina, lluvia, nieve, etc. Los instrumentos comunes para medir el agua dentro de las estaciones meteorológicas son los pluviómetros y por tanto es uno de los datos indispensables para el balance hídrico con mayor frecuencia se encuentra disponible (López-Miñano, 2008).

➤ ***Evapotranspiración***

La evapotranspiración es absorbida por la cobertura vegetal (López-Miñano, 2008), misma que se evapora para ser retirada de la superficie que depende principalmente del grado de energía lumínica en función de la temperatura del aire (Astinza *et al.*, 2007). Para el cálculo de esta variable se utiliza la fórmula empleada por Thornthwaite (1948).

➤ ***Infiltración***

En una primera etapa satisface la deficiencia de humedad del suelo en una zona cercana a la superficie, y posteriormente superado cierto nivel de humedad, pasa a formar parte del agua subterránea, saturando los espacios vacíos (Schosinsky y Losilla, 2000).

La tasa a la cual se infiltra el agua de lluvia en el suelo está influenciada por varios factores como la abundancia, la estabilidad y tamaño de los poros en la superficie, relacionadas al tipo de suelo; las actividades antropológicas que se realicen y la presencia o ausencia de materia orgánica en el suelo (Yuste *et al.*, 2017). La infiltración, como un componente del ciclo hidrológico, está relacionada con el escurrimiento superficial, con la recarga de los acuíferos y la vulnerabilidad del recurso a la contaminación (Landini *et al.*, 2007).

Para establecer el cálculo de la infiltración en el suelo mensualmente se utiliza la siguiente ecuación empleada por Schonsinky (2006) en su estudio:

$$P_i = (C_i) * (P - R_{et}) \quad (4)$$

Donde:

P_i : Precipitación que infiltra mensualmente al suelo (mm/mes)

C_i : Coeficiente de infiltración (adimensional)

P : Precipitación mensual en (mm/mes)

R_{et} : Retención de lluvia mensual por el suelo (mm/mes)

➤ **Escorrentía**

Para Peña *et al.* (2016) la escorrentía contribuye en el aumento del caudal que es alimentado tanto por el exceso de precipitaciones como por las aguas subterráneas y subsuperficiales. De igual manera, como estipula Lazo-Pillaga (2014) en su estudio, la escorrentía está ligada a la cobertura del suelo puesto que al tener un suelo cubierto de vegetación arbustiva, tiene un escurrimiento, una infiltración y una evapotranspiración relativamente baja, mientras que Landini *et al.* (2007) en su estudio menciona que en el caso de una zona urbana donde la evapotranspiración es mínima y la infiltración prácticamente nula, se evidencia importantes escurrimientos muy irregulares y crecidas bruscas.

2.1.5. Componente biofísico del páramo

Los páramos se han considerado como uno de los ecosistemas más estratégicos y a la vez uno de los más vulnerables del norte de Sudamérica y en el Neotrópico. Aquí se contraponen altos grados de biodiversidad y endemismo de especies con los factores que amenazan estos ecosistemas siendo entre los más importantes el cambio climático y la expansión de las fronteras agrícolas y ganaderas estas últimas son impulsadas por el nivel poblacional (Morales-Betancourt y Estévez-Varón, 2006). A pesar de la escasa información documentada sobre los efectos de los incendios y el pastoreo en los páramos, han demostrado que la recuperación de la vegetación paramuna y sus especies comprende un proceso muy lento debido a la alteración de su estructura y composición de las comunidades bióticas (Schmidt-Mumm y Vargas-Ríos, 2012).

De acuerdo con sus posiciones geográficas, la topografía y su altitud ha permitido encontrarse en un rango de 3000 y 4000 msnm, presentando además temperaturas que oscilan entre los 7 a 12 °C (Ortiz *et al.*, 2005), variables que han influenciado en el clima, mismo que hace que los páramos sean sumideros más importantes de carbono, almacenando seis veces más que los bosques tropicales, además estos ecosistemas ayudan a regular el clima que en caso de no hacerlo devuelven CO₂ a la atmosfera (Morocho y Chunchu, 2019).

La topografía del páramo parte de la actividad glacial como establece Buytaert *et al.* (2008) que son visibles notablemente en los valles del páramo. Para Crespo *et al.* (2014) menciona que la topografía paramuna es accidentada variando desde valles profundos y empinados hasta llanuras casi planas.

Estudios realizados por Tonneijck *et al.* (2010) en páramos del norte de Ecuador, encontró reservas de carbono orgánico. Sin embargo, los cambios de uso del suelo o la conversión de tierras agrícolas se podría producir una pérdida de carbono de los horizontes ectorgánicos (Takahashi *et al.*, 2006).

Se menciona que los suelos paramunos se dividen en dos partes:

- ***Centro y norte del país:*** Los suelos están formados por cenizas volcánicas con una diferenciación de horizontes pobres en el que se evidencia pH muy bajo como son andisoles (Jácome *et al.*, 2020), además, Llambí (2012) menciona que estos suelos son mantenedores primarios del servicio ambiental como es la captación y la distribución de agua hacia tierras bajas, actuando además, como un sumidero de carbono por retener hasta un 50% de materia orgánica, proceso que influye en la disminución de los efectos de la acumulación atmosférica de gases de efecto invernadero como es el dióxido de carbono (Burbano-Orjuela, 2018).
- ***Sur del país:*** Las capas finas de cenizas volcánicas han sido removidas por erosión y afloramiento de suelo volcánico cubriendo capas inferiores de

cenizas antiguas previamente meteorizadas como son los inceptisoles, tropepts y orthents (Poulenard *et al.*, 2001; Carrillo-Rojas *et al.*, 2019).

La intervención humana influye en los efectos del cambio climático específicamente en la distribución de temperatura y precipitación, variables que han repercutido directamente a la presencia de cambios radicales en el ciclo hidrológico y en la redistribución temporal-espacial del recurso hídrico (Muñoz-Arboleda, 2015).

Para Uvidia-Zambrano (2020) los páramos del Ecuador están sometidos a ser ecosistemas frágiles que están siendo amenazados por la erosión causada principalmente por los cambios de uso de suelo y la presencia de sistemas agrícolas, acciones que según Crespo *et al.* (2014) provocarían una deficiencia en la capacidad de retención y contenido total del agua disponible, además Mosquera Sabogal (2019) estipula unas afectaciones en las pérdidas por evapotranspiración y tiempo de movilización del recurso hídrico.

En el estudio realizado en los páramos del norte ecuatoriano por Poulenard *et al.* (2001) menciona que las causas principales del deterioro del ecosistema páramo es la quema y el pastero, lo cual ha provocado un aumento en la escorrentía y la erosión influyendo en la reducción de la conductividad hidráulica. Esto ha repercutido en la formación de agregados de suelos hidrofóbicos con un elevado nivel de repelencia al recurso hídrico (Jaramillo *et al.*, 2010).

Se sustenta además, en la investigación realizada por Podwojewski y Germain (2005) donde se visualiza que los suelos de origen volcánico poseen elevadas cantidades de Ca y Si que son consecuencia de las labranzas, lo que provoca que este tipo de ecosistema posea una alta escorrentía (Piccolo y Mbagwu, 1994). También se consideró importante mencionar que los cambios presentados en la intensidad y frecuencia de precipitaciones disminuiría la capacidad del páramo para almacenar y retener el carbono (Yuste *et al.*, 2017).

2.1.5.1. Cambio de uso de suelo en el ecosistema páramo

El ecosistema páramo está restringido a las cumbres de algunas regiones tropicales de Centro y Sudamérica, Asia, África y Oceanía cuyos límites son variados dependiendo de las condiciones propias de la región donde se localice. Sus límites pueden oscilar entre los 3000 y 4000 msnm de acuerdo con la precipitación, la humedad y la temperatura media anual local (Morales-Betancourt y Estévez-Varón, 2006). Además, concibe al ecosistema páramo como un sistema de isla que se encuentra geográficamente tanto por su historia geológica además de las actividades agropecuarias que han degradado los corredores naturales que unen algunas regiones paramunas.

El páramo alberga especies de plantas endémicas que están adaptadas a las condiciones fisicoquímicas y climáticas, como es la baja presión atmosférica, radiación ultravioleta intensa. En lo que respecta a la vegetación de acuerdo con las condiciones altitudinales pueden poseer pajonales, rosetas, arbustos pequeños y musgos (Enríquez-Ruiz, 2018).

En el Ecuador, el páramo es un ecosistema florístico y diverso (Beltrán *et al.*, 2009) que comprende el 5% del territorio nacional, con una altitud promedio de 3300 msnm (Carrillo *et al.*, 2019) de este porcentaje menos del 40% está protegida (Cuesta y De Bievre, 2008).

2.1.6. Cambio del uso de suelo mediante imágenes satelitales

La teledetección es una técnica de recopilación de información de la superficie terrestre basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre (Botana y Fernández, 2019). Se han realizado estudios referentes al cambio de uso de suelo, considerando de gran importancia la influencia de los SIG y las imágenes satelitales constituyéndose como una herramienta importante para determinar los cambios

producidos a lo largo del tiempo dentro de un área geográfica determinada (Bravo, 2000; Aguirre *et al.*, 2013).

Es así como Gordillo-Ruiz y Castillo-Santiago (2017) en su estudio percibe al procesamiento de las imágenes obtenidas del USGS <https://earthexplorer.usgs.gov/> para posteriormente realizar una corrección geométrica referenciadas a coordenadas UTM. Adicional al proceso, se determina los tipos de cobertura existente en el área de estudio con la ayuda de imágenes satelitales a diferentes escalas de trabajo evidenciándose también, las combinaciones de bandas a fin de visualizar los comportamientos espectrales de las imágenes. Finalmente, para verificar la magnitud y dirección de los cambios, se realiza una aplicación de las herramientas del SIG con las funciones de este, las cuales muestran cuantitativamente las transformaciones ocurridas en el tiempo (Bravo, 2000; Tovar *et al.*, 2014).

2.1.6.1. Sensores Landsat

La misión estadounidense LANDSAT está desarrollado por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) <https://earthexplorer.usgs.gov/>, es un conjunto de satélites en constelaciones que monitorean los recursos terrestres con fines de monitoreo de la cobertura vegetal de la Tierra. Para Rodríguez y González (2010) han sido utilizado en lo que refiere a la teledetección de parámetros medio ambientales (agrícolas, forestales, hidrológicas, usos de suelo, etc.).

En la constelación Landsat se encuentran activos los sensores Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9 los cuales poseen 7 u 8 bandas espectrales que están sujetas al monitoreo de vegetación, geología y recursos naturales (Tabla 1), sin embargo, cabe recalcar que el último de la serie es el Landsat 9, puesto en órbita el 27 de septiembre del 2021. Al combinar las bandas existentes se obtiene una gama de imágenes de falso color que sirven notablemente para su posterior aplicación e interpretación (Rodríguez y González, 2010).

Tabla 1. Resoluciones espaciales de las bandas de los sensores Landsat 5 y 7.

Banda número	Rango espectral (μ)	Zona del espectro	Resolución en el terreno (m)
1	0.45 – 0.515 μ	Visible – azul	30
2	0.525 – 0.60 μ	Visible – verde	30
3	0.63 – 0.69 μ	Visible - rojo	30
4	0.75 – 0.90 μ	Infrarrojo Próximo (visible)	30
5	1.55 – 1.75 μ	Infrarrojo Lejano	30
6	10.40 – 12.5 μ	Térmico Lejano	60
7	2.09 – 2.35 μ	Térmico Próximo	30
Pancromático	0.52 – 0.90 μ	Prácticamente todo el visible	15

Fuente: (Rodríguez y González, 2010)

El satélite Landsat 8 es enviado a una expedición el 11 de febrero del 2013 donde su objetivo se basa en el establecimiento de información para actividades que se relacionen con la agricultura en materia ambiental.

Dicho satélite posee dos sensores importantes los cuales se detallan a continuación:

- **Sensor operacional de tierra (OLI):** Esta compuesta de 9 bandas espectrales ofreciendo imágenes de resolución espacial que varía entre los 15 m (banda pancromática) y 30m (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9) proporcionando imágenes satelitales de calidad que servirán para diferenciar los usos que existen en la tierra (Rodríguez y González, 2010).
- **Sensor Infrarrojos Térmico (TIRS):** Se compone de dos bandas espectrales que se convierten en herramientas importantes para cuantificar la temperatura superficial de la Tierra (Rodríguez y González, 2010).

En la Tabla 2 se visualiza las características anteriormente mencionadas.

Tabla 2. Resoluciones espaciales de las bandas del sensor Landsat 8.

Banda	Sensor	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica
1.- Ultra azul (costero/aerosol)	OLI	0.43 – 0.45	30	16 bits
2.- Azul	OLI	0.45 – 0.51	30	16 bits
3.- Verde	OLI	0.53 – 0.59	30	16 bits
4.- Rojo	OLI	0.64 – 0.67	30	16 bits
5.- Infrarrojo Cercano (NIR)	OLI	0.85 – 0.88	30	16 bits
6.- Onda corta Infrarroja (SWIR) 1	OLI	1.57 – 1.65	30	16 bits
7.- Onda corta Infrarroja (SWIR) 2	OLI	2.11 – 2.29	30	16 bits
8.- Pancromática	OLI	0.52 – 0.90	15	16 bits
9.-Cirrus	OLI	1.36 – 1.38	30	16 bits
10.- Infrarrojo térmico 1	TIRS	10.60 – 11.19	100 * (30)	16 bits
11.- Infrarrojo térmico 2	TIRS	11.50 – 12.51	100 * (30)	16 bits

Fuente: (Rodríguez y González, 2010)

2.2. Marco legal

El presente estudio se desarrolló de acuerdo con la jerarquía en la pirámide de Kelsen, tomando en consideración a la Constitución de la República del Ecuador como referente principal de la legislación ecuatoriana seguidas de las normativas legales vigentes que presenten relación en cuanto al tema sobre la evaluación del balance hídrico en el ecosistema páramo de la cuenca del río Tahuando.

2.2.1. Constitución de la República del Ecuador

El artículo 12 de la Constitución de la República del Ecuador se refiere al cuidado y conservación de los recursos naturales con la finalidad de brindar a las futuras generaciones la capacidad de satisfacer sus necesidades especialmente en un recurso tan indispensable como es el agua, donde se ve reflejada la importancia

del derecho y la accesibilidad del humano, mismo que es fundamental e irrenunciable. Además se cita el Artículo 71 referente a que la naturaleza es un ente de derecho y debe ser respetada en su presencia y dinamismo, de igual forma es necesario tomar en consideración el Artículo 73 en el que se afirma que el Estado es quien implementará medidas precautelatorias en actividades en las que se pueda ver comprometido la estabilidad en los ecosistemas, o en procesos naturales en los que se incluyen indudablemente el agua, así como también el estado es quién garantizará la conservación y cuidado de los ecosistemas que son importantes para la producción, regulación y distribución del recurso hídrico como en concordancia con en el Artículo 411. Por otro lado, se menciona el Artículo 406 donde trata sobre la normalización, cuidado, manejo y uso sustentable de los páramos, como fuentes principales de la captación de agua (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

2.2.2. Tratados Internacionales

El principal tratado internacional que se encuentra en vigor en el Ecuador en cuanto al cuidado del recurso hídrico es el Convención Ramsar (2008) siendo su principal objetivo la conservación y el uso racional de los humedales los cuales sirven tanto para albergar gran biodiversidad y de igual forma como captadores de agua, esto se logra a través de la acción en cada ámbito nacional y mediante la cooperación internacional con el fin de conseguir un desarrollo sustentable a nivel mundial.

2.2.3. Código Orgánico del Ambiente (CODA)

De acuerdo con el Código Orgánico del Ambiente (2017), en el artículo 191 se establece la importancia de realizar estudios referentes a la calidad y cantidad de agua disponible cumpliendo con normas reglamentarias y técnicas que se encuentren dentro del marco de la ley.

Por otro lado, dentro del Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (2019) en su artículo 141 menciona que es necesario implementar zonas o áreas de

protección hídrica con el fin de que entren en un proceso de conservación, manejo y uso sostenible del recurso hídrico. Esto se sustenta con la unificada Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales que se encuentra dentro del COA siendo el artículo 6 en los literales b y c referente a la consideración de vegetación y bosque protector hacia las formaciones vegetales, natural o cultivadas que permitan controlar los fenómenos pluviales torrenciales o a su vez la preservación de cuencas hidrográficas especialmente en zonas de poca precipitación pluvial y que pueden a su vez ocupar cejas de montaña, corrientes o depósitos de agua.

2.2.4. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)

Según el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (2018), establece en sus Artículos 55 y 132 que los GADs tienen como objeto los Planes de Ordenamiento Territorial y la gestión de las cuencas hidrográficas las cuales podrán ser articuladas en los planes parroquiales, cantonal, provincial, regional y nacional a fin de regular la gestión del suelo urbano y rural a fin de garantizar el cuidado de la biodiversidad. Además, dichas entidades están en la potestad de formular ordenanzas para la delimitación, regulación, autorización y control de los sistemas hídricos, tomando muy en cuenta la prohibición en lo que respecta a la privatización del agua.

2.2.5. Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

De igual forma, se concuerda con el artículo 4 que el recurso hídrico es de dominio público siendo inalienable e imprescriptible, además se sustenta en el establecimiento de zonas de protección hídrica en los ecosistemas asociados (Artículo 13) en caso de que exista un cambio de uso de suelo que pueda afectar la cantidad, calidad y el equilibrio de los ecosistemas en zona de protección hídrica que sirvan de abastecimiento para consumo humano y de riego (Artículo 14). Además, se considera importante la creación de juntas administradoras del recurso hídrico en la zona rural en caso de que el GAD no preste el servicio de agua como

se estipula en el Artículo 46 (Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua, 2014).

2.2.6. Ordenanzas Municipales

La “Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Ibarra 2015-2023” y la ordenanza que reglamenta el uso y ocupación del suelo (Registro oficial EDIC. ESPE. -851/2017-01-24), establece las directrices para el manejo de la microcuenca del río Tahuando con la participación ciudadana que son la protección, la ecológica y la recreatividad bajo el escenario un área declarada como patrimonial tal como se detalla en el Artículo 297 (GAD Ibarra, 2020).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Descripción del área de estudio

La cuenca alta del río Tahuando se encuentra ubicada geográficamente en los cantones de Ibarra y Cayambe de las provincias de Imbabura y Pichincha respectivamente. De acuerdo con la demarcación hidrográfica nacional, el área de estudio pertenece a la cuenca hidrográfica del río Mira (Jácome *et al.*, 2018), misma que se sitúa entre los 2360 msnm hasta los 4600 msnm, además comprende una extensión de 187.49 km² donde se localizan las parroquias rurales de La Esperanza y Angochagua y sus comunidades como: Rumipamba, Chirihuasi, El Abra, La Magdalena, La Rinconada, El Chilco, Zuleta y Cochás (Andrade-Figueroa, 2020).

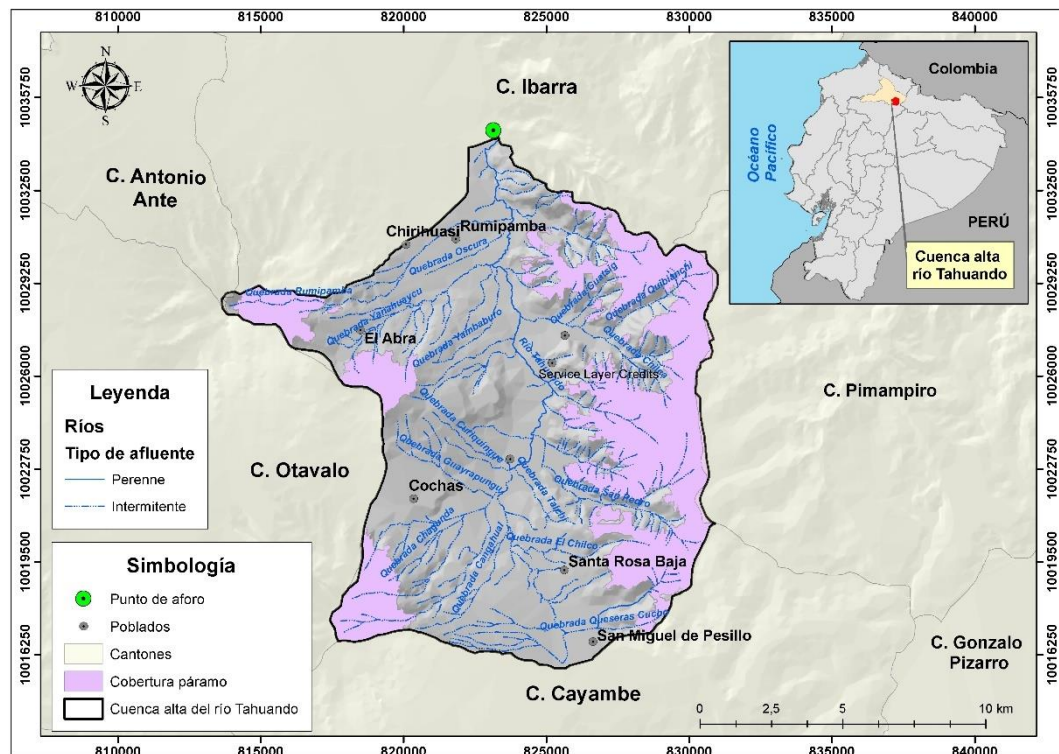


Figura 3. Ubicación geográfica del área de estudio.

Para la delimitación de la cuenca alta del río Tahuando se utilizaron las cartas topográficas en formato digital de Ibarra y Cayambe del año 1985, mismas

que se obtuvieron del Geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM) <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/> a una escala de 1:50.000. Además, contienen información vectorial (capas) que se utilizaron en el desarrollo del área de estudio como fueron poblados, ríos, curvas de nivel, definiendo el punto de cierre en las coordenadas UTM X= 823 528.67; Y=10 029 705.92, toda la información se la procesó en el software ArcGIS v10.8.

3.1. 2. Hidrología

En el área de estudio se presentan afluentes (ríos, quebradas) situadas en las comunidades de Angochagua, La Magdalena, El Chilco y Zuleta (Anexo 1), mismos en lo que se originan los drenajes cuyos caudales puntuales aportan al río Tahuando como se muestra en la Tabla 3. Además, GAD Angochagua (2015) detalla que dentro de la comunidad del mismo nombre se encuentra la vertiente hídrica de Guaraczapas la cual presenta un caudal medio de 158 l/s que se convierte en un abastecedor de agua para consumo humano hacia la zona urbana de Ibarra.

Tabla 3. Tipo de drenajes de los cuerpos de agua.

Nombre	Tipo de drenaje	Comunidad	Caudal (l/s)
Quebrada El Chilco	Intermitente	Angochagua	1.50
Pucango	Intermitente	Angochagua	3.00
Ingatola	Intermitente	Angochagua	1.00
Santa Martha 1	Intermitente	Angochagua	4.00
Santa Martha 2	Intermitente	La Magdalena	2.00
Chupacorral	Intermitente	El Chilco	1.50
Quebrada Arrayán Cuchu	Perenne	Zuleta - Pesillo	----

Fuente: (Andrade-Figueroa, 2020)

3.1.1.3. Clima

Los afluentes existentes en el área son originarios por la escorrentía superficial producto de las precipitaciones que oscilan entre los 750-2000 mm/año siendo los meses de febrero a mayo donde mayor precipitación existe mientras que los meses de octubre a enero presentan menor precipitación, además presenta una temperatura anual que oscila entre los 6 a 12 °C donde es evidente la frecuencia de

neblina (GAD Angochagua, 2015), sin embargo, la Figura 4 muestra la variabilidad que existe en el área de estudio en un período de diez años, evidenciándose cambios repentinos como se nota en el mes de junio (mes correspondiente a época seca) con 93 mm, tal como detalla Aladin (2020), existe un considerable aumento de precipitaciones catalogándolo como un mes relativamente húmedo, esto se debe a las corrientes como El Niño y La Niña en los que Hidalgo-Proaño (2017) menciona en su estudio que para eventos cálidos El Niño disminuye las precipitaciones, sin embargo, ante un fenómeno adverso y fuerte su patrón de comportamiento puede aumentar notablemente, por otra parte, se evidencia que La Niña aumenta las precipitaciones. Se resalta la repercusión del calentamiento global en los aumentos de temperatura, en donde se evidencia que el área de estudio posee una media de 16.8 °C, esto se complementa con lo detallado por Cáceres *et al.* (1998) donde la temperatura media para la zona rural de altura presentó un incremento de 1.5 °C.

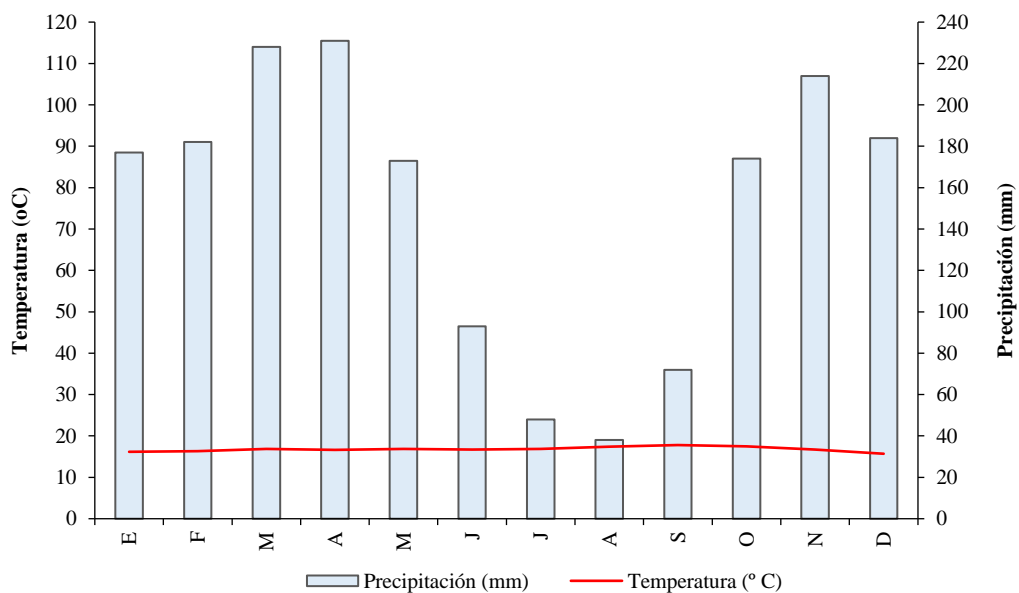


Figura 4. Climograma de la parroquia de Angochagua

De acuerdo con Hidalgo-Proaño (2017) las precipitaciones para la región interandina presentan una distribución bimodal donde existen dos períodos lluviosos dividiendo los meses de marzo - abril (primer período) y octubre -

noviembre (segundo período), mientras que los meses de julio – agosto (primer período) y el mes de enero (segundo período) presenten pocas precipitaciones.

Igualmente se encuentran dos tipos de climas como son el Ecuatorial mesotérmico semi- húmedo y el Ecuatorial de alta montaña, este último posee una mayor superficie territorial dentro del área de estudio tal como muestra la Tabla 4.

Tabla 4. Tipos de clima dentro de la cuenca alta del río Tahuando.

Símbolo	Descripción	Área (ha)	Porcentaje (%)
Ch	Ecuatorial mesotérmico semi-húmedo	5954.99	37.76
Pf	Ecuatorial de alta montaña	12 794.92	68.24
Total		18 749.91	100.00

Fuente: (SNI, 2012)

3.1.1.4. Taxonomía del suelo

Los órdenes de suelos según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (<https://www.usda.gov/>) juntamente con los Servicios de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) (<https://www.nrcs.usda.gov/>) que se encontraron en el área de estudio fueron: Entisoles, Inceptisoles y Mollisoles (Anexo 2).

Como muestra la Tabla 5, el orden Mollisol comprende un total de 13 901.37 hectáreas que representan 74.15% del área total, este tipo de suelo es característico en los ecosistemas de pastizales al poseer un horizonte a nivel superficial muy fértil y oscuro, mismo que es resultado del alto contenido de materia orgánica emitida por las raíces de las plantas (Chinchilla *et al.*, 2011).

Tabla 5. Orden taxonómico del suelo en la cuenca alta del río Tahuando.

Orden	Suborden	Área (ha)	Porcentaje (%)
Entisol	Orthent	800.92	4.27
Inceptisol	Andept	3333.91	17.78
Inceptisol	Tropept	713.57	3.81
Mollisol	Udoll	8129.07	43.36
Mollisol	Ustoll	5772.30	30.79
Total		18 749.91	100.00

Fuente: (SNI, 2012)

El orden Inceptisol cubre un total de 4047.48 hectáreas que representa el 21.59% de la superficie de estudio, este tipo de suelos se caracterizan por su difícil recuperación en procesos de erosión avanzados y un alto grado de meteorización debido a la pérdida de cobertura vegetal (Chinchilla *et al.*, 2011). En cuanto al orden Entisol abarca un total de 800.92 hectáreas que representa el 4.27% del área total de estudio, este tipo de suelo se define como un suelo que no muestra ningún desarrollo de perfiles y que generalmente están compuestos por su material parental regolítico inalterado.

3.1.1.5. Uso potencial del suelo

Se ha determinado las condiciones aptas del suelo para el desarrollo de cultivos específicos, el mapa de uso potencial del suelo (Anexo 3), identifica las clases agroecológicas que son propuestas por el USDA y el FCC que se encuentran en la cuenca alta del río Tahuando. La Tabla 6 muestra sus áreas de cobertura juntamente con una breve descripción de cada clase correspondiente.

Tabla 6. Uso potencial del suelo de la cuenca alta del río Tahuando.

Clase	Descripción	Área (ha)	Porcentaje %
I	Tierras sin limitaciones	540.27	2.88
II	Tierras con ligeras limitaciones o con moderadas prácticas de conservación	1779.94	9.49
III	Tierras apropiadas para cultivos permanentes, con prácticas especiales de conservación	134.38	0.72
IV	Tierras con severas limitaciones, cultivables con métodos intensivos de manejo.	2727.53	14.55
V	Tierras no cultivables con severas limitaciones de humedad, aptas para cultivos herbáceos (pastos, heno)	3694.24	19.70
VII	Tierras no cultivables, aptas para fines forestales	3219.59	17.17
VIII	Tierras aptas para la conservación de vida silvestre	6571.88	35.05
Roca	Roca	79.93	0.43
Urbano	Urbano	2.01	0.01
Total		18 749.91	100 .00

Fuente: (SNI, 2012)

Las tierras no cultivables que son aptas para la conservación de vida silvestre, las tierras que son aptas para fines forestales y las que son tierras no cultivables con severas limitaciones de humedad pero que son aptas para cultivos herbáceos reúnen un valor total de 6571.88 ha, 3219.59 ha y 3694.24 ha de la superficie de estudio respectivamente, poseen el más alto porcentaje en comparación con las tierras que presentan ligeras limitaciones y/o prácticas moderadas de conservación, que se encuentran presentes con 5182.12 ha.

3.1.1.6. Uso de suelo y cobertura vegetal

Dentro de la cuenca alta del río Tahuando, se evidenció principalmente la existencia de cultivos de ciclo corto como fréjol (*Phaseolus vulgaris*), maíz (*Zea mays*), cereales como trigo (*Triticum*), cebada (*Hordeum vulgare*) y pastizales cultivados (*Cynodon dactylon*), kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), sin embargo; existió en menor proporción la vegetación arbustiva y páramo. Además, se evidencia que las áreas erosionadas no han ocupado una superficie significativa ya que presenta apenas un 0.25% del área total, misma que se representa en la zona urbana de Pesillo y ciertas zonas erosionadas en el volcán Imbabura (Anexo 4).

Los poblados existentes dentro de la zona de estudio basan su interés en la preservación de ecosistemas de alta montaña como son los bosques y los páramos además de salvaguardar los espacios destinados a reforestación, no obstante, se menciona que la agricultura y ganadería se establecen como factores que intervienen en las actividades económicas, productivas y ambientales de la zona (GAD Angochagua, 2015).

Guerra-Amán (2019) considera importante el contar con una extensión territorial de ecosistemas de páramo y bosque nativo que permita generar convenios con organizaciones ambientales con proyectos de reforestación y preservación de ecosistemas altoandinos anhelando recibir el gozo de beneficios y/o recursos de acuerdo con el desarrollo de las actividades productivas sean administrados por los cabildos correspondientes. Se detalla a continuación las áreas correspondientes a cada uso de suelo y cobertura vegetal (Tabla 7).

Tabla 7. Cobertura vegetal de la cuenca alta del río Tahuando.

Simbología	Descripción	Área(ha)	Porcentaje (%)
Bn	Bosque nativo	1890.22	10.08
Ta	Tierra agropecuaria	10 157.09	54.17
Ca	Cuerpos de agua	18.72	0.10
Ae	Área sin cobertura vegetal	46.22	0.25
U	Área poblada	143.27	0.76
Pf	Plantación forestal	664.57	3.54
Pr	Páramo	5421.70	28.92
Va	Vegetación arbustiva	408.12	2.18
Total		18 749.91	100.00

Fuente: (SNI, 2012)

De acuerdo a los datos generados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP, 2018) se visualiza la predominancia de área intervenida en un 54.17%, misma que se distribuye por toda la cuenca alta del río Tahuando; por consiguiente, la cobertura de páramo cubre en 28.92% se sitúan en la parte alta de los poblados La Rinconada, Angochagua, El Abra, Zuleta y Cochas,

seguidamente de un 2.18% referente a la vegetación arbustiva localizada en los alrededores del río Tahuando y sus afluentes, finalmente se detalla que en la parte media de la cuenca existe un área erosionada en un 0.25% de la superficie total del área de estudio.

3.1.1.7. Zonas de vida según Holdridge

De acuerdo con el área de influencia de la cuenca alta del río Tahuando, comprende 12 zonas de vida (Anexo 5), donde observa una mayor superficie de Bosque Muy Húmedo Montano (bmhM) y en menor proporción el Bosque Húmedo Montano Bajo – Asociación Edáfica Húmeda (bhMB – AEH) y la zona Alpina, misma que se visualiza en la Tabla 8.

Tabla 8. Zonas de vida de la cuenca alta del río Tahuando según Holdridge.

Simbología	Descripción	Área (ha)	Porcentaje %
Alpino	Alpino	9.75	0.05
bhM	Bosque Húmedo Montano	3576.09	19.07
bhM-bsMB	Bosque Húmedo Montano - Bosque Muy Húmedo	3631.93	19.37
bhMB	Bosque Húmedo Montano Bajo	3717.19	19.83
bhMB-AEH	Bosque Húmedo Montano Bajo - Asociación Edáfica Húmeda	68.36	0.36
bhMB-bmhM	Bosque Húmedo Montano Bajo - Bosque Muy Húmedo Montano	1970.63	10.51
bhMB-bsMB	Bosque Húmedo Montano Bajo - Bosque Seco Montano Bajo	90.12	0.48
bmhM	Bosque Muy Húmedo Montano	5262.71	28.07
bmhM-ppSA	Bosque Muy Húmedo Montano - Bosque Pluvial Subalpino	167.93	0.90
bsMB	Bosque Seco Montano Bajo	80.94	0.43
bsMB-bhM-AES	Bosque Seco Montano Bajo - Bosque Húmedo Montano - Asociación Edáfica Seca	75.19	0.40
ppSA	Bosque Pluvial Subalpino	98.95	0.53
Total		18 749.91	100.00

Fuente: (SNI, 2012)

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterización temporal del cambio de uso de suelo en el ecosistema páramo.

Se determinó la importancia de los SIG para identificar los cambios de la cobertura vegetal dentro del área de estudio presente en los años 2000, 2015 y 2020, comprendiendo si existe un patrón de cambio tendencial hacia una conservación y protección o por el contrario a un deterioro de los ecosistemas, los mismos que permitieron detallar estrategias para su correcto manejo y gestión de los recursos naturales.

3.2.1.1. Procesamiento de imágenes satelitales del uso del suelo

El primer objetivo respondió a la realización de cartografía temática del área de estudio mediante el procesamiento de imágenes satelitales descargadas de la plataforma que otorga el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de los sensores Landsat 5, 7 y 8 para los años 2000, 2015 y 2020 respectivamente, mismas que presentaron una resolución de 30x 30m (píxel). Posteriormente se realizó una corrección atmosférica de las imágenes satelitales a través del software ENVI ® juntamente con el modelo digital de elevación (DEM) que permitieron ser homogenizados como archivos raster a fin de no inferir en la variación de los resultados cartográficos que se obtuvieron. Como Tucker (1979) detalla en su estudio del empleo de combinación de bandas espectrales, se combinó las bandas 4, 3, 2 para los sensores Landsat 5 – 7 y para el sensor Landsat 8 las bandas 5, 4, 3 identificando el tipo de cobertura vegetal que comprende el área de estudio.

La escala de trabajo, procesamiento y análisis de las bandas espectrales se trabajó a una escala de 1:50.000, de tal manera que se evidencien los cambios en la cobertura vegetal. Adicionalmente se incluyó a la geocodificación para obtener y alinear la información acorde a una grilla de coordenadas de la cuenca.

Para la creación de las áreas de entrenamiento, a fin de determinar el tipo de cobertura vegetal presente en el área de estudio, se establecieron doce polígonos por cada cobertura vegetal en formato shapefile los cuales se dibujaron en función del tipo de cobertura vegetal presentada en la imagen satelital. Para la validación de la información se realizaron salidas de campo verificando las coberturas vegetales y usos o coberturas a en concordancia a lo determinado en el SIG.

Complementariamente se utilizó el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cuantificar y cualificar el desarrollo de la vegetación a través de la cuantificación de radiación de las bandas espectrales electromagnéticas que la vegetación puede reflejar (Serrano *et al.*, 2005).

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (5)$$

Finalmente, en lo referente al análisis multitemporal de las coberturas vegetales de las imágenes satelitales; la información se la validó a través del factor de concordancia “Índice Kappa” mismo que López-Santos *et al.* (2017) indica que dicho índice expresa el porcentaje de coincidencia de factores observados con un referente a que represente a un valor real. Dicho coeficiente varía entre -1 a +1, por lo que se estima que a mayor valor cercano a la unidad (+1) existirá un mayor grado de concordancia entre los valores observados y viceversa (Cerde y Villarroel, 2008).

$$k = \frac{\Sigma(\text{concordancias observadas}) - \Sigma(\text{concordancias atribuibles al azar})}{(\text{total de observaciones}) - \Sigma(\text{concordancias atribuibles al azar})} \quad (6)$$

En la presente investigación, se consideró una validación real cuando los resultados obtenidos de las imágenes satelitales presentaban un $k \geq 0.80$ considerando “casi perfecta”. Tal como detalla la Tabla 9.

Tabla 9. Valorización del índice Kappa.

Fuerza de Concordancia	Valor de k
Pobre	0.00
Leve	0.01- 0.20
Débil	0.21 – 0.40
Aceptable	0.41 – 0.60
Considerable	0.61 – 0.80
Casi perfecta	0.81 – 1.00

Fuente: (Landis y Koch, 1997)

Bajo este marco metodológico se evidenció las ganancias y pérdidas de los diferentes tipos de cobertura vegetal dentro de la cuenca alta del río Tahuando identificando las zonas para manejo del agua en función de las variables climáticas existentes dentro del balance hidrológico (Jácome *et al.*, 2018).

3.2.2. Determinación de los factores hidrometeorológicos

3.2.2.1. Precipitación y temperatura

La base de datos se obtuvo con información meteorológica descargada de la plataforma Google Earth Engine (GEE por sus siglas en inglés) <https://earthengine.google.com/> a través del software TerraClimate a una resolución de 4 km el valor del píxel de los años 2000, 2015 y 2020 de las variables temperatura media y precipitación acumulada, las cuales se obtuvieron en archivos raster para posteriormente graficar un perfil que abarquen los píxeles que comprende la cuenca hidrográfica y el ecosistema páramo.

Para las variables empleadas se resampleó las dimensiones de los píxeles iniciales de 4 km a una resolución de 30 x 30 m para estandarizar la resolución espacial con las imágenes Landsat, posteriormente, se extrajo los datos de precipitación y temperatura en función de la cuenca hidrográfica y del ecosistema páramo. Consecutivamente se realizó un promedio de los valores anuales de las variables mencionadas anteriormente con la calculadora raster del software ArcGIS v10.8 para obtener un valor anual dentro del período de estudio. El resultado

metodológico se basó en la cuantificación de las variables de la interpolación de los datos con la herramienta *Kriging* que ofrece una estimación lineal acorde a la realidad (Castellanos *et al.*, 2020) evaluando el comportamiento de las variables dentro del área de estudio.

Para la validación de los datos se compararon los datos obtenidos con los datos proporcionados por la estación meteorológica de Otavalo (M0105) a través de gráficas para representar la tendencia de los datos calculados con los de la estación meteorológica, posteriormente se eliminaron datos atípicos de las variables de temperatura y precipitación para realizar la calibración de los datos a través de un análisis de regresión, metodología empleada por Cabrera (2012), los mismos que dieron un ajuste de los datos satelitales acorde al comportamiento de las variables dentro del área de estudio.

3.2.2.2. Evapotranspiración potencial

Para la determinación de los datos de evapotranspiración potencial se utilizó la fórmula de Thorthwaite (1948), misma donde se empleó la variable de temperatura de los años 2000, 2015 y 2020, para conocer los resultados en nuestra área de estudio. Posteriormente con la herramienta *Extract multi values to points* se extrajeron los datos de los píxeles que abarca el ecosistema páramo dentro de la cuenca hidrográfica, consecutivamente, con la herramienta *Raster Calculator* se calcularon los componentes de la fórmula mencionada anteriormente cumpliendo así con los ítems presentados a continuación:

- a) Índice de calor mensual (i) a partir de la temperatura media mensual (t)

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

- b) Índice de calor anual (I) sumando los 12 valores de i:

$$I = \sum i$$

- c) ETP mensual “sin corregir”

$$ETP \text{ sin corregir} = 16 * \left(10 \frac{t}{I}\right)^a \quad (7)$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial (mm)

t: Temperatura media mensual, (°C)

I: Índice de calor anual, obteniendo en literal b

a: $675.10^{-9} * I^3 - 771.10^{-7} * I^2 + 1792.10^{-5} * I + 0.49239$

3.2.2.3. Escorrentía

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía se tomaron en consideración los factores como: uso de suelo, textura del suelo y pendientes obteniendo resultados de la vegetación, la velocidad de infiltración y pendiente del terreno.

3.2.2.3.1. Vegetación:

La vegetación existente se estableció conforme al Sistema Nacional de Información (SNI,2012), se reclasificó en 8 coberturas vegetales las mismas que fueron: bosques, pastos, cultivos, zona urbana, agua, vegetación arbustiva, páramo, áreas erosionadas. Para la determinación de la escorrentía se lo realizó en la cobertura páramo, la cual presentó una de las mayores extensiones territoriales dentro del área de estudio.

3.2.2.3.2. Pendiente del terreno:

Se calculó a través de las capas de curvas de nivel y se lo recortó en función del área de estudio. Seguidamente, se reclasificó en tres relieves principales siendo Plano (0 – 5%), Ondulado (5 – 10%) y Montañoso (10 – 30%) como se muestra en la Tabla 11 detalla por Prevert (1986), mismo que cita Ibáñez-Asencio *et al.* (2011) en su estudio en el que se consideró el tipo de cobertura vegetal y la textura del suelo asignando valores de acuerdo con los parámetros anteriormente mencionados.

Tabla 10. Componentes del coeficiente de infiltración.

Vegetación y Topografía	Textura del suelo		
	Franco Arenoso	Franco Limo Arcilloso	Arcilloso
Bosques			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.25	0.35	0.50
Montañoso	0.30	0.50	0.60
Pastos			
Plano	0.10	0.30	0.40
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Montañoso	0.22	0.42	0.60
Tierras cultivadas			
Plano	0.30	0.50	0.60
Ondulado	0.40	0.60	0.70
Montañoso	0.52	0.72	0.82

Fuente: (Prevert, 1986)

3.2.2.3.3. Cálculo del coeficiente de escorrentía

La base de datos se obtuvo a partir del cruce de las capas mencionadas con anterioridad a fin de encontrar el coeficiente de escorrentía presente en la zona de estudio (Torrigo, 2011).

3.2.2.3.4. Cálculo del coeficiente de escorrentía

La base de datos se obtuvo multiplicando las precipitaciones mensuales de cada año de estudio con el coeficiente de escorrentía en función del ecosistema páramo (Torrigo, 2011).

3.2.2.4. Infiltración

Para la determinación de los datos se utilizaron las variables de precipitación y el escurrimiento superficial (Torrigo, 2011) de los años de estudio en el ecosistema páramo, mismos que fueron calculados con la herramienta *Raster Calculator* aplicando la siguiente ecuación:

$$P(ef) = PP - Esc \quad (8)$$

Donde:

$P(ef)$: Infiltración (mm/año)

PP: Precipitación (mm/año)

Esc: Escorrentía (mm/año)

Para la validación de los datos de infiltración calculados, se compararon con los datos obtenidos en las salidas de campo a través de un infiltrómetro de doble anillo que se incrustó en el suelo paramuno y se lo llenó con cuidadosamente con agua (1.5 litros) los anillos central y exterior (Ibáñez-Asensio *et al.*, 2011). Para la toma de datos se lo realizó cada 5 minutos dentro de un lapso de 4 horas con la finalidad de calcular la velocidad de infiltración en cada cobertura vegetal anteriormente mencionada (Figura 5). Las salidas de campo se realizaron 2 veces por mes en las épocas seca (julio, agosto y septiembre) y lluviosa (octubre, noviembre y diciembre).

Los datos se calcularon a través de la fórmula de Horton (1941), como se detalla en la siguiente ecuación:

$$i = if + (ii - if)e^{(-\beta.t)} \quad (9)$$

Donde:

i_f: Velocidad de infiltración inicial (cm/h)

i_{ii}: Velocidad de infiltración a t= 0 (cm/h)

β: Constante empírica (depende de características de la cuenca)

t: Tiempo transcurrido desde saturación superficial del suelo (min)



Figura 5. Infiltrómetro de doble anillo.

3.2.2.5. Capacidad de retención de agua en el suelo

La determinación de la retención de agua en el ecosistema páramo se obtuvo a partir de los rangos que estipula ITC (1996) citado por Torrico (2011) en su estudio considerando las pendientes y textura del suelo que se sitúan en el área de estudio tal como se visualiza en la Tabla 11 para obtener la retención máxima existente en el ecosistema.

Tabla 11. Capacidad de retención de humedad en el suelo (mm/m).

Textura	Pedregosidad y gravas en %					
	0%	0 – 5%	5 – 15%	15- 40%	40 – 80%	>80%
Arcillo	140	130	120	90	50	10
Franco	170	160	140	110	40	20
Areno	90	80	70	60	30	10
Areno Francoso	110	100	90	70	40	10
Arcillo Arenoso	110	100	90	70	40	10
Arcillo Franco	150	140	130	100	55	10
Arenoso	----	----	-----	-----	-----	-----
Franco Arenoso	150	130	120	100	55	10
Arcillo Limoso	160	140	130	110	55	10

Arcillo Franco	170	150	140	110	65	20
Limoso	----	----	-----	-----	-----	-----
Franco Limoso	190	170	150	130	70	20
Franco arcilloso	150	130	120	100	55	10

Fuente: (ITC, 1996)

Obtenido el coeficiente de retención de agua, se calculó la capacidad máxima de retención en el suelo, multiplicando la profundidad efectiva presente en el área de estudio con el coeficiente de retención, considerando los niveles de pedregosidad y de textura del suelo (Torrico, 2011).

➤ Retención real de la humedad en el suelo

La base de datos se obtuvo a través de las variables de precipitación efectiva, capacidad potencial de retención y la evapotranspiración potencial calculados anteriormente. Además, se determinó potencialmente la capacidad de retención a fin de evaluar dentro del balance hídrico el mes inicial del cálculo.

$$S(a) = P(ef) + S(a)_{mes-1} - ETp \quad (10)$$

$$0 \leq S(a) \leq S(p)$$

Donde:

$S(a)$: Almacenamiento real (mm)

$P(ef)$: Precipitación efectiva (mm)

$S(a)_{mes-1}$: Almacenamiento real del mes anterior (mm/mes-1)

ETp : Evapotranspiración potencial (mm)

$S(p)$: Almacenamiento potencial (mm)

3.2.2.6. Evapotranspiración real

Se utilizó la fórmula aplicada por Torrico (2011) en su estudio, para conocer los resultados existentes que presentó el área de estudio. Se consideró el postulado de: “Evapotranspiración potencial es igual a la Evapotranspiración real ($ETp = ETa$), cuando exista suficiente agua por evaporar”, misma que se visualiza a continuación:

$$ETa = P(ef) + S(a)mes - 1 \quad (11)$$

Donde:

ETa: Evapotranspiración real (mm)

P (ef): Precipitación efectiva (mm)

S(a)mes - 1: Almacenamiento real del mes anterior (mm/mes-1)

3.2.2.7. Caudal hídrico

Se lo realizó a través de salidas de campo en los meses de época seca (julio, agosto, septiembre) y también en época lluviosa (octubre, noviembre y diciembre), mismas que se realizaron dos veces por mes. El punto de muestreo se localizó en la parte baja del río Tahuando específicamente en el sector de Santa Rosa del Tejar y sus coordenadas UTM fueron X= 823 528.67; Y=10 029 705.92.

La determinación de los datos se obtuvo a través del molinete electromagnético (OTT MF Pro), mismo que es un medidor de caudal en el que se encuentra un sensor magnético – inductivo que se utiliza para el cálculo de caudales en cauces descubiertos (m/s), donde se calculó la velocidad del agua (m/s) y su profundidad (m) del punto de aforo, tal como muestra la Figura 6.



Figura 6. Aforo de caudal con el molinete electromagnético MF Pro.

Como muestra la Figura 7, la metodología consistió en el establecimiento de puntos de aforo (13 en total) cada 50 cm a lo ancho del cauce del río Tahuando (6.5m), realizando tres repeticiones en cada punto a fin de obtener resultados más precisos de la variabilidad del desarrollo del sistema hidrológico en las épocas seca y lluviosa.



Figura 7. Punto de monitoreo del río Tahuando (cota 2360 msnm).

3.2.2.8. Balance hídrico

Para el cálculo del balance hídrico en la cuenca alta del río Tahuando se utilizó la metodología presentada por Torrico (2011) “Determinación del balance hídrico en cuencas y microcuencas” donde se realizó una base de datos con información meteorológica y vectorial para posteriormente interpolar las variables con la herramienta *Kriging* a fin de conocer el balance hídrico en el ecosistema páramo (Morejón-Miranda *et al.*, 2015).

Para el cálculo del balance hídrico se utilizó la siguiente ecuación.

$$P = ETa + D + R + \Delta S \quad (12)$$

Donde:

P : Precipitación (mm)

ETa : Evapotranspiración real (mm)

R : Esguerrimiento superficial (mm)

ΔS : Variación en la retención de almacenamiento de agua en el suelo (mm)

D: Drenaje (Infiltración profunda o percolación) (mm)

3.2.2.9. Demanda hídrica

Los datos se obtuvieron por medio del Banco Nacional de Autorizaciones, institución que cuantifica información detallada acerca de los caudales tanto para consumo de agua potable y para fines de riego. De acuerdo con la información prestada, se desarrollaron las estrategias correspondientes enfocadas a la conservación del recurso hídrico. Se resalta que la información otorgada comprendió valores de estudio del año 2020.

Para la validación de los datos se compararon los caudales generados en el software ArcGIS v10.8 con los datos obtenidos del BNA determinando si existió un déficit o superávit de agua a nivel tanto de ecosistema páramo como de cuenca hidrográfica.

3.2.3. Establecimiento de estrategias de conservación del recurso hídrico

Esta actividad fue desarrollada a través de la recopilación de información secundaria sobre las problemáticas existentes en el área de estudio, en conjunto con el modelo hidrológico y el análisis efectuado al cambio de cobertura vegetal en los períodos correspondientes de estudio. A continuación, se propusieron 4 estrategias para el manejo, protección y conservación de las vertientes hídricas, donde se plantearon los objetivos tanto generales como específicos incluyendo además el tipo de proyecto, los subproyectos a realizarse, presupuesto y las instituciones responsables (Carlosama-Angamarca y Granda -Dávila, 2022).

3.2.3.1. Identificación de los problemas que afectan el estado de conservación de los ecosistemas y el desarrollo productivo

La recopilación de información se obtuvo por medio de revisión bibliográfica del sector (PDOTs, SNI, base de datos, etc) relacionadas con el

cambio de cobertura vegetal, el uso de suelo y las variables climáticas que contemplan el balance hídrico (precipitación y temperatura).

Posteriormente se estableció una lluvia de ideas para identificar las problemáticas principales existentes dentro del área de estudio y aplicarlos a la matriz de Vester que se considera una herramienta de planificación estratégica que representa la situación actual en la que se encuentra la zona de estudio.

La matriz de Vester se enfoca en desarrollar una comparación de doble línea de acuerdo con el grado de influencia que presenta un problema sobre otro, los problemas identificados se encuentran establecidos en columnas y tienen codificaciones (P1, P2, P3 ...) a fin de relacionarlos con un rango para identificar el grado de influencia de la problemática frente a las demás encontradas siendo 0 (influencia nula), 1 (influencia débil), 2 (influencia media) y 3 (influencia fuerte) (Cely,1999). Con la determinación de los valores (sumatoria de activos y pasivos) se graficó en un diagrama de dispersión los problemas clasificándolos en: críticos, activos, pasivos e indiferente, con el fin de que las estrategias se cumplan en un corto a mediano tiempo (Camargo *et al.*,2020).

Adicionalmente se aplicó la metodología de mapas parlantes a los que Zamalloa (2017) los define como un instrumento técnico rural participativo que se rige a tres puntos principales como son la convocatoria y socialización, el dibujo del mapa y la verificación en campo, este instrumento trabaja en función de la identificación de problemas, la planificación de acciones y finalmente la evaluación de avances que permiten conocer como es la comunidad en el pasado, presente y su proyección a futuro.

3.2.3.2. Diseño de las estrategias

El diseño de las estrategias se basó en la elaboración de un plan de acción a partir de los datos obtenidos donde consta el establecimiento de un programa con su respectiva descripción y el planteamiento de objetivos (generales y específicos) para alcanzar los resultados previstos, a su vez el tipo de proyecto y las diferentes

actividades que se van a realizar, el presupuesto y los responsables de la ejecución de las estrategias (Tabla 12).

Tabla 12. Esquema del programa a ejecutarse.

Programa	Proyectos	Actividades	Verificadores	Responsable
Nombre del proyecto a ejecutarse	Nombre del proyecto	Establecimiento de actividades a realizar de acuerdo con el programa	Verificador 1,2,3 ...	Instituciones y/o Personas Naturales, Jurídicas
	Nombre del proyecto	Establecimiento de actividades a realizar de acuerdo con el programa	Verificador 1,2,3 ...	Instituciones y/o Personas Naturales, Jurídicas

3.3. Materiales y equipos

El listado de los materiales y equipos que se utilizaron se clasifican en fase de campo y fase de oficina tal como se detalla en la Tabla 13.

Tabla 13. Materiales y equipos.

	Materiales	Equipos	Software
Fase de oficina	Laptops Asus	-	Microsoft Excel
	Imágenes Satelitales Landsat	-	ArcGIS v10.8 ENVI ® 5.3
Fase de campo	Libreta de campo	Vehículo	-
	Cronómetro	Cámara digital	-
	Regleta graduada	GPS	-
	Flexómetro	Molinete electromagnético	-
	Infiltrómetro	MF pro	-

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se obtuvieron en base a los objetivos propuestos en la investigación, analizando y comparando los resultados obtenidos en otras investigaciones a fin de validar el modelo hidrológico.

4.1. Análisis espaciotemporal del cambio de uso de suelo

Los tipos de coberturas vegetales existentes en la cuenca alta del río Tahuando para los años 2000 - 2015 - 2020 identificados a partir de la clasificación supervisada son cultivos, áreas erosionadas, pastos, páramo, agua, vegetación arbustiva y áreas consolidadas de infraestructuras, mismas que a través del índice Kappa se realizó la validación de las imágenes con un valor de 0.83 para los tres períodos de estudio, considerando un ajuste a la realidad que presenta el área de estudio. Este valor se asemeja a lo que detalla Escandón-Calderón *et al.* (2018) en su estudio donde se evidencia un ajuste del 83.5% para el año 2000 y 75.5% para el año 2009 resultando un Kappa de 0.80 y 0.71 respectivamente, los valores generados en los mapas evidencian una semejanza a las condiciones que presentaba el área de estudio.

En términos generales la Tabla 14 muestra una predominancia en la cobertura vegetal correspondiente a cultivo, identificando de esta forma para el año 2000 un total de 4802.18 ha (25.61%) de superficie de toda la cuenca alta, transcurridos 15 años, el porcentaje se ha incrementado en un 0.41% por diversas razones como la implementación de proyectos agroproductivos, fortalecimiento de agroindustrias, incentivos agropecuarios según el PDOT Angochagua (2019), sin embargo en el período de tiempo comprendido entre los años 2015 y 2020 las hectáreas ocupadas presentaron un ligero decrecimiento del 0.3%. Es importante destacar el incremento de un 14 % de bosque entre los años 2000 y 2015 en el área de estudio, este aumento se lo acredita a la iniciativa por parte del gobierno local, central, empresas privadas y comunidades por querer pertenecer a los diferentes

programas que incentiven el cuidado y preservación del medio ambiente como el “Proyecto de conservación de páramos andinos y reforestación con especies nativas de Angochagua”, antagónicamente en 5 años transcurridos desde el 2015 al 2020 este porcentaje se ha visto disminuido en un 4% pasando de 6348 ha a 5613 ha aproximadamente, que según Arellano-Guerrón *et al.* (2019) se le otorga al incremento en la tasa de deforestación, la transformación de paisajes naturales para actividades agropecuarias, así como también a la extracción de recursos forestales sin un control adecuado.

Tabla 14. Cobertura vegetal existente en el periodo 2000 – 2020.

Tipos de cobertura	Año 2000		Año 2015		Año 2020	
	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Bosque	3715.81	19.82	6348.71	33.86	5613.64	29.94
Agua	110.83	0.59	92.61	0.49	79.45	0.42
Cultivos	4802.18	25.61	4878.20	26.02	4815.29	25.68
Área erosionada	44.85	0.24	63.89	0.34	63.82	0.34
Pastos	2199.96	11.73	2074.59	11.06	2646.09	14.11
Páramo	3311.57	17.66	3615.83	19.28	3612.61	19.27
Vegetación arbustiva	4459.85	23.79	1554.47	8.29	1796.12	9.58
Zona urbana	104.65	0.56	121.37	0.65	122.66	0.65

Se evidenció un aumento de la cobertura de pastos obteniendo para el año 2000 un total de 2199.96 ha (11.73%) mientras que para el año 2020 se presentaron una superficie de 2646.09 ha que determina el 14.11%, representando un incremento del 2.38% de la superficie total del área de estudio. Por consiguiente, se demostró que el aumento de las coberturas de cultivos y de pastos, han provocado una reducción en la extensión de la vegetación arbustiva pasando de 4459.85 ha (23.79%) para el año 2000 hasta 1796.12 ha (9.58%) en 2020 representando una reducción del 14.21% de su área total de estudio.

A lo mencionado con anterioridad, se complementa con lo establecido por GAD Angochagua (2015) en el que detalla que la parroquia abarca una "extensión de 12 392 ha de las cuales el 28% está cubierta por páramo, el 27.5% corresponde a cultivos de ciclo corto, el 15% son bosques nativos, el 14% son pastizales y el 7%

de vegetación arbustiva” bajo este señalamiento se infiere que el efecto antrópico sobre la cobertura de vegetación es notable puesto que se requiere tierras aptas para el consumo ganadero y agrícola. Además, se evidenció la presencia de suelos subutilizados dentro de la parroquia de Angochagua, mismos que han afectado en el desarrollo productivo de la actividad agrícola y ganadera como son la falta de agua de riego y la presencia de altas pendientes (GAD Angochagua, 2015) por lo que obliga a los campesinos a buscar nuevas extensiones territoriales a fin de cumplir las demandas que requiere la población.

Por otra parte, Quichimbo *et al.* (2012) menciona que los cambios generados en la cobertura vegetal y uso de suelo pueden influir directamente en la biodiversidad, el ciclo hidrológico y en el comportamiento del clima. Además, para Paruelo *et al.* (2006) y los ecosistemas naturales como el bosque, páramo y la vegetación arbustiva han sido utilizados para fines industriales (agricultura y ganadería principalmente) mismos que han generado una fragmentación de hábitat y han repercutido drásticamente en la capacidad de proveer servicios ecosistémicos para sus usuarios, esto se evidencia en la Figura 8.



Figura 8. Ganancias y pérdidas de las coberturas vegetales existentes.

El análisis multitemporal, como se muestra en la Figura 8, indicó que las coberturas cultivos y pastos en los tres años del área de influencia es la que predomina ya que la principal actividad económica del área de estudio es el campo agrícola y ganadero como lo estipula GAD Angochagua (2015) en su estudio, pues

asegura que, en su encuesta realizada a sus pobladores, el 71% se dedica a estas prácticas económicas. Además, el análisis efectuado para el ecosistema páramo determinó que el porcentaje de cobertura ha incrementado en un 2% aproximadamente (304.26 ha), de esto se pudo inferir que los programas implementados para el cuidado y conservación del ecosistema páramo a través de entes gubernamentales y empresas privadas como por ejemplo la implementación del Biocorredor Andes Norte (BIAN) (Andrade-Villareal, 2019), han permitido conservar el patrimonio natural de nuestro país. Por el contrario, entre los años 2015 y 2020 en los resultados se observa una disminución de 3 ha que se encuentran ligadas a incendios forestales de acuerdo con datos difundidos por la Secretaría Nacional de Riesgos (2020) a través de sus boletines oficiales de prensa, en efecto, Cueva-Toalombo *et al.* (2021) en su estudio sobre la valoración de incendios forestales en Imbabura ratifica la pérdida de cerca de 3 ha de ecosistema páramo en la parroquia de Angochagua y parte de La Esperanza a causa de incendios.

Al párrafo anterior se complementa con lo detallado por Alonzo y Vera (2010), donde el cambio de uso de suelo se deriva principalmente en el crecimiento poblacional, generando mayor demanda de productos agrícolas, por tanto, esto ocasionó un aumento en la tasa de deforestación para establecer nuevas áreas para la agricultura y ganadería, esto se visualiza en los datos de la cobertura de bosques, vegetación nativa que ha sido afectadas en los tres periodos de estudio. Finalmente, Podwojewski, (1999) menciona que “la población rural ha buscado aumentar las superficies productivas, por ello, en el medio indígena, los campesinos ya no logran satisfacer su autosuficiencia alimentaria”.

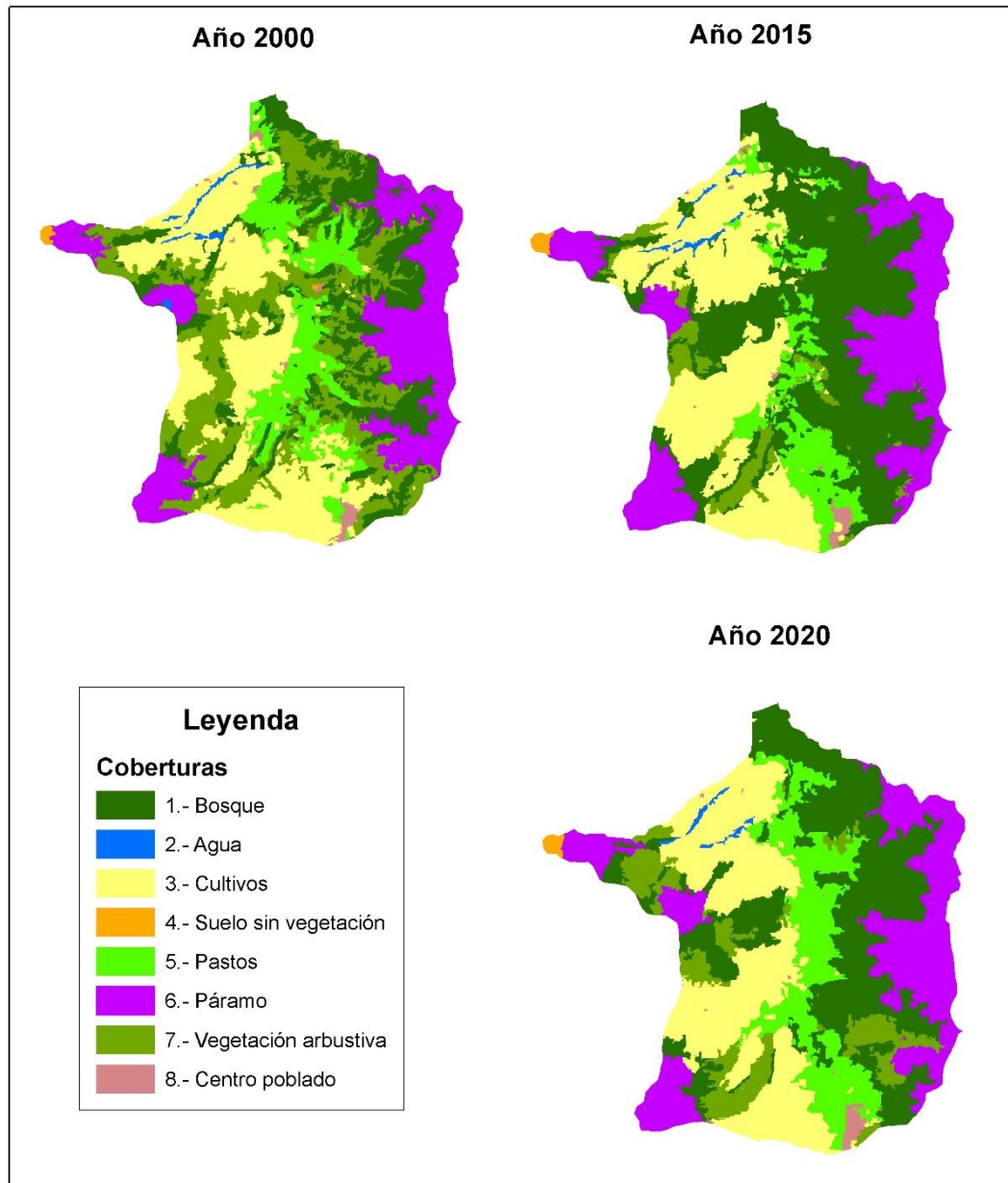


Figura 9. Cobertura vegetal existente en la cuenca alta del río Tahuando desde 2000 – 2020.

4.2. Factores hidrometeorológicos en el ecosistema páramo

El modelo hidrológico se lo realizó utilizando la ecuación 7 referente al balance hídrico considerando los cinco componentes que la conforman. A continuación, se detallan los resultados correspondientes para los años 2000, 2015 y 2020 a fin de evaluar el comportamiento de las variables en función del tiempo.

4.2.1. Precipitación

Los datos de precipitación acumulada anual se detallan en la Tabla 15, mismos que fueron interpolados en el período 2000, 2015 y 2020, donde para el año 2000 se presentó una menor acumulación de precipitaciones (1252.27 mm/año) en comparación con el año 2015 (+565.2 mm) y para el año 2020 (+176.36 mm), este resultado con el análisis de cambio de cobertura vegetal tiene una relación directa, ya que para el año 2000 existe una menor superficie de bosque y páramo en comparación con los años 2015 y 2020. De acuerdo con Borja-Escobar (2020) determina en su estudio que el páramo al ser un ecosistema conservado, las precipitaciones y su influencia en los afluentes es variable de acuerdo a la zona geográfica y factores climáticos incidentes (fenómeno El Niño) donde muestra que los valores máximos se sitúan en los meses de marzo, abril y noviembre, y, por el contrario, los valores mínimos se sitúan en los meses de agosto.

Tabla 15. Precipitación acumulada desde el 2000 – 2020 (mm/año).

Mes/año	Año 2000	Año 2015	Año 2020
Enero	97.63	97.53	115.31
Febrero	121.00	108.16	103.51
Marzo	156.75	144.50	150.31
Abril	177.63	195.47	175.30
Mayo	177.54	170.58	118.59
Junio	58.12	243.95	96.03
Julio	28.09	250.31	138.60
Agosto	22.73	8.22	73.36
Septiembre	74.67	14.13	80.19
Octubre	35.42	280.91	71.01
Noviembre	220.48	209.43	197.09
Diciembre	82.21	94.27	109.33
Σ	1252.27	1817.47	1428.63

A continuación, la Figura 10 muestra la variabilidad de las precipitaciones en función del ecosistema de páramo en los tres períodos de estudio, donde el resultado de la interpolación mostró precipitaciones que oscilaron entre los 1250 a 1820 mm/año aproximadamente, valores que se encuentran relativamente cercanos

a lo que detalla GAD Angochagua (2015) que varían entre los 700 a 1500 mm, distribuyéndose para los años de estudio mayores precipitaciones en los páramos de la Laguna del Cubilche y parte del Volcán Imbabura, sin embargo, para el año 2020 se muestra precipitaciones bajas en los páramos de la comunidad de Cochas; una de las razones podría deberse al “efecto pantalla” que actúa como una barrera natural como lo explica Carrión-Damián (2014) que los comportamientos de las precipitaciones dentro de los páramos de Jatunsacha está influenciada por corriente de aires que provienen de la cuenca Amazónica y la influencia de El Niño en sus fases (El Niño y la Niña). Además, para Pazmiño-Cuenca (2010) que las cuencas situadas al oeste del volcán Antisana sufren una disminución de precipitaciones debido al “efecto pantalla” .

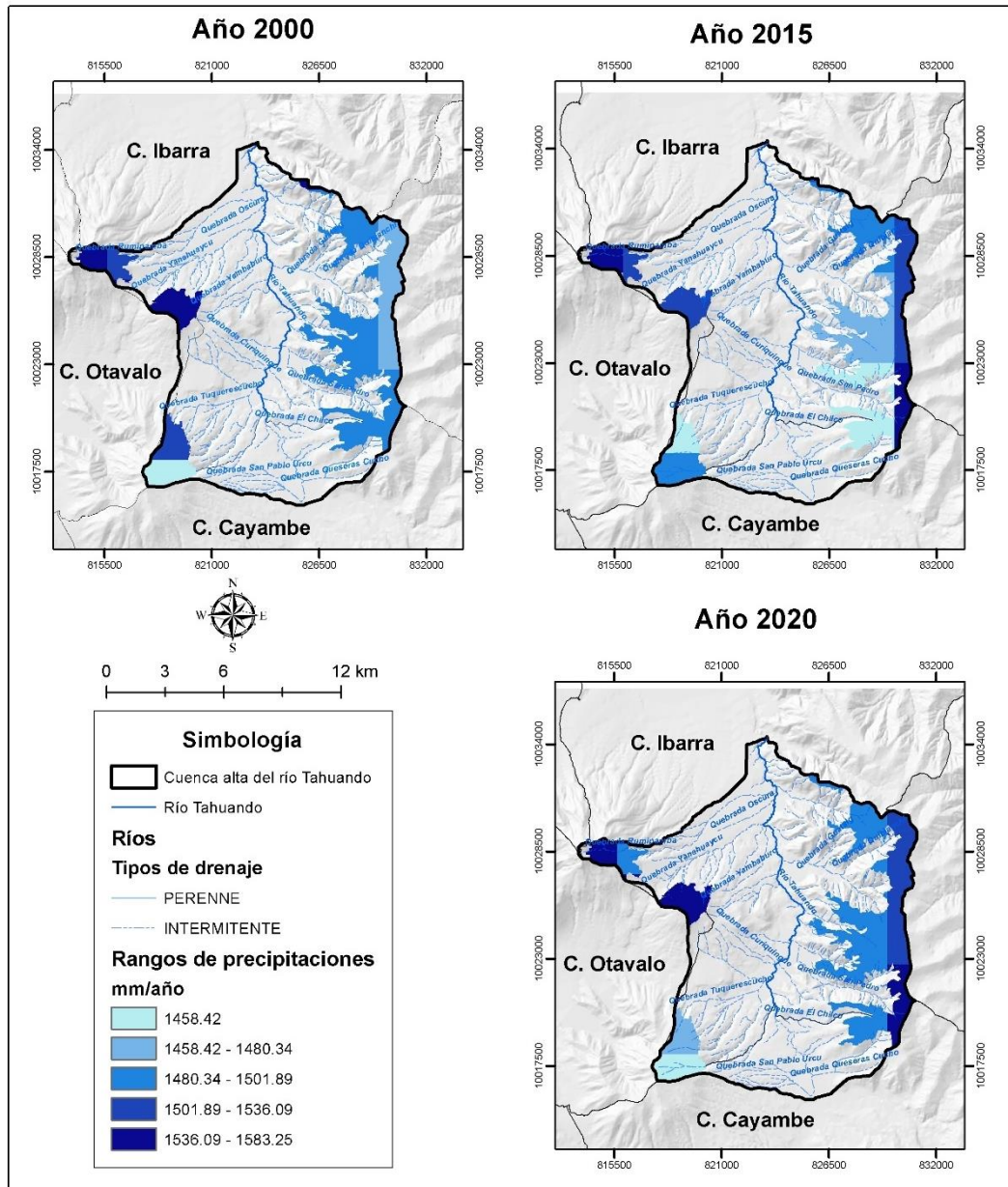


Figura 10. Precipitación media anual del período 2000 – 2020.

Para la validación de los datos de precipitación y temperatura obtenidos del servidor *Google Earth Engine (GEE)* <https://earthengine.google.com/> se compararon con los datos referenciados de los anuarios meteorológicos de la estación de Otavalo (M105) de los años 2000, 2005 y 2010 realizando un análisis de regresión donde se obtuvo un ajuste del R^2 de 0.76 y 0.78 para las variables de temperatura y precipitación respectivamente, lo que se considera un valor aceptable

por lo que presenta un ajuste de los datos obtenidos frente a los observados, como se detalla en la Figura 11.

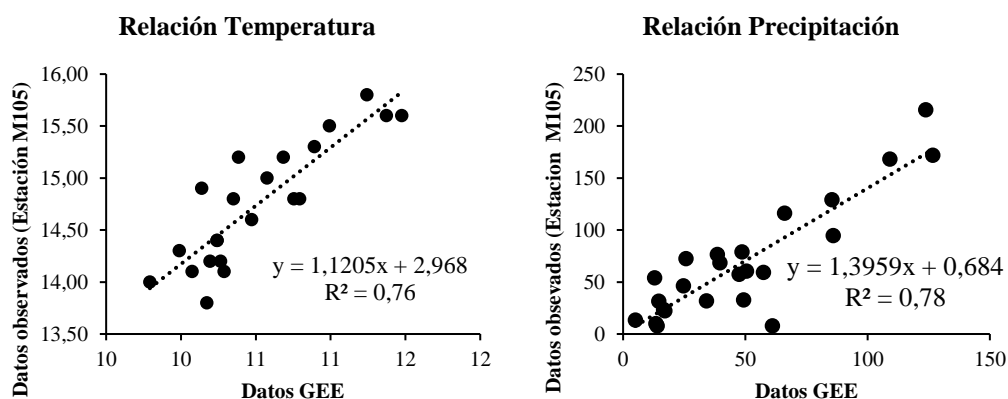


Figura 11. Validación de los datos de precipitación.

4.2.1.2. Evapotranspiración potencial (ETP)

Como se muestra en la Tabla 16, la evapotranspiración fluctúa entre los 46.98 a 49.85 mm/año siendo un precedente que a partir del año 2015 se evidencian un aumento de evapotranspiración potencial en los páramos debido a variaciones climáticas, sin embargo, para Díaz-Granados-Ortiz *et al.* (2005), la ETP en los páramos es relativamente baja, la alta humedad y el gradiente altitudinal del ecosistema ha influenciado en una eficiente conductividad hidráulica del suelo.

Tabla 16. Evapotranspiración obtenida mediante fórmula de Thornthwaite (mm/año).

Mes/año	Año 2000	Año 2015	Año 2020
Enero	48.29	48.03	52.14
Febrero	23.02	48.23	53.13
Marzo	48.33	46.47	54.03
Abril	49.30	48.36	51.46
Mayo	49.35	51.24	52.59
Junio	47.49	48.94	48.42
Julio	46.14	48.35	45.67
Agosto	48.15	48.47	47.08
Septiembre	49.35	51.64	45.79
Octubre	51.90	51.67	48.69

Noviembre	50.51	51.93	50.39
Diciembre	51.94	53.14	48.83
Promedio anual	46.98	49.73	49.85

El resultado de la interpolación se evidencia en la Figura 12, mostrando una ETP superior en los páramos situados en las comunidades de La Rinconada, Zuleta, Angochagua, Cochás y parte del sector del Cubilche y el volcán Imbabura, sin embargo, se evidencia una menor ETP en el páramo adyacente a la comunidad de Mariano Acosta (cantón Pimampiro) tal como se muestra a continuación:

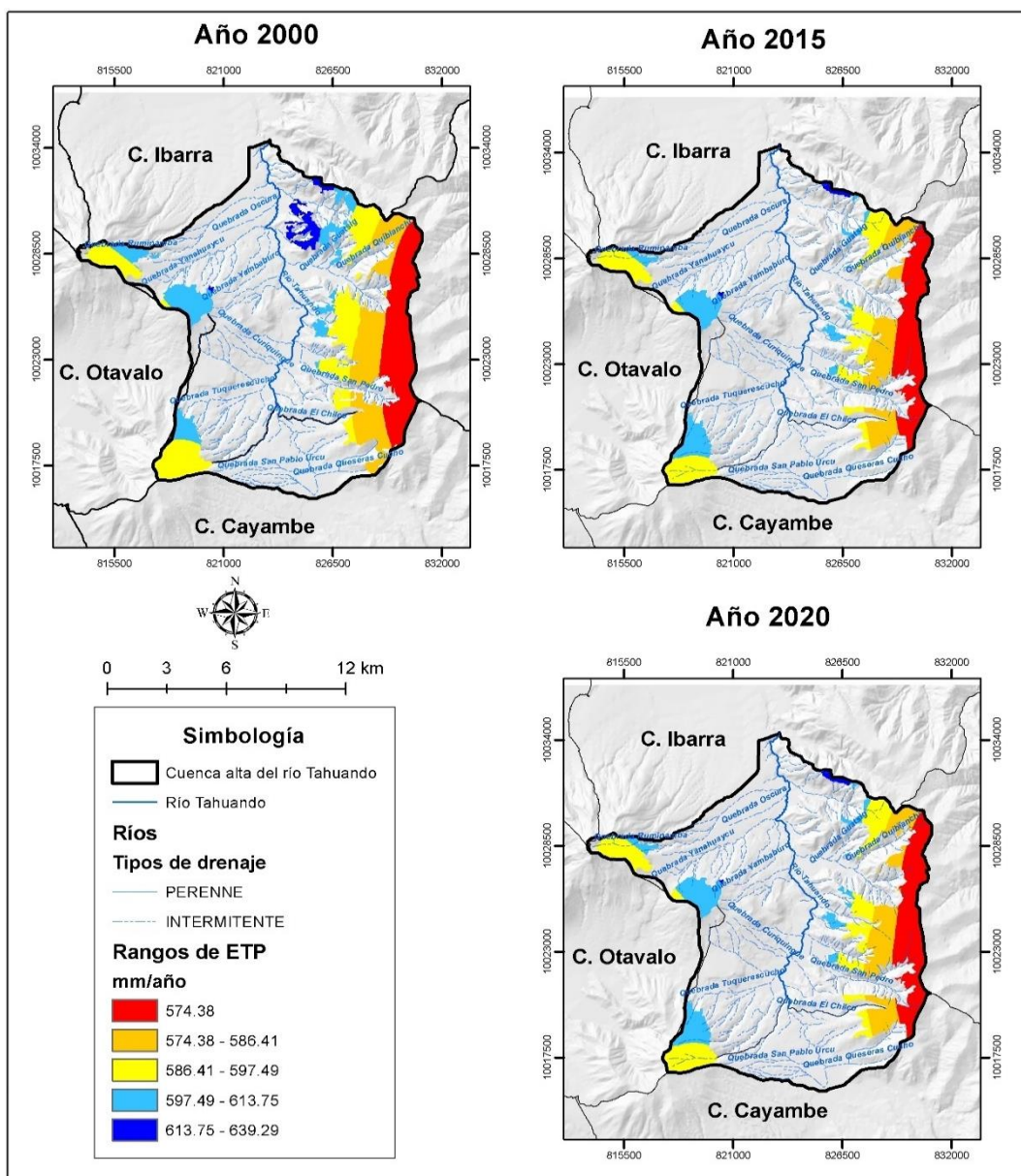


Figura 12. Evapotranspiración potencial del área de estudio.

4.2.1.3. Escorrentía

Los datos de escorrentía se obtuvieron a partir del cálculo de tres factores como fueron la vegetación, la velocidad de infiltración y pendiente del terreno (Torrice, 2011).

4.2.1.3.1. Vegetación

Los tipos de vegetación existentes en la zona se evidenciaron en la Figura 10 comprendiendo las 8 coberturas vegetales, sin embargo; se consideraron a las coberturas de páramo, bosque y cultivos, mismas que poseían una mayor extensión.

4.2.1.3.2. Pendiente del terreno

El ecosistema páramo presenta un relieve ondulado el cual representa el 58.04% (3115.72 ha), seguidamente de un relieve montañoso que corresponde al 21.19% (1137.45 ha) y en menor proporción un relieve plano con el 20.77% (1115.909 ha), lo cual se evidencia dentro de la Figura 13. Además, GAD Angochagua (2015) menciona que la parroquia del mismo nombre comprende relieves colinados y fuertes pendientes, sin embargo, detalla asimismo que la mayoría del territorio comprende un relieve ondulado, accidentado y en menor simetría relieves planos.

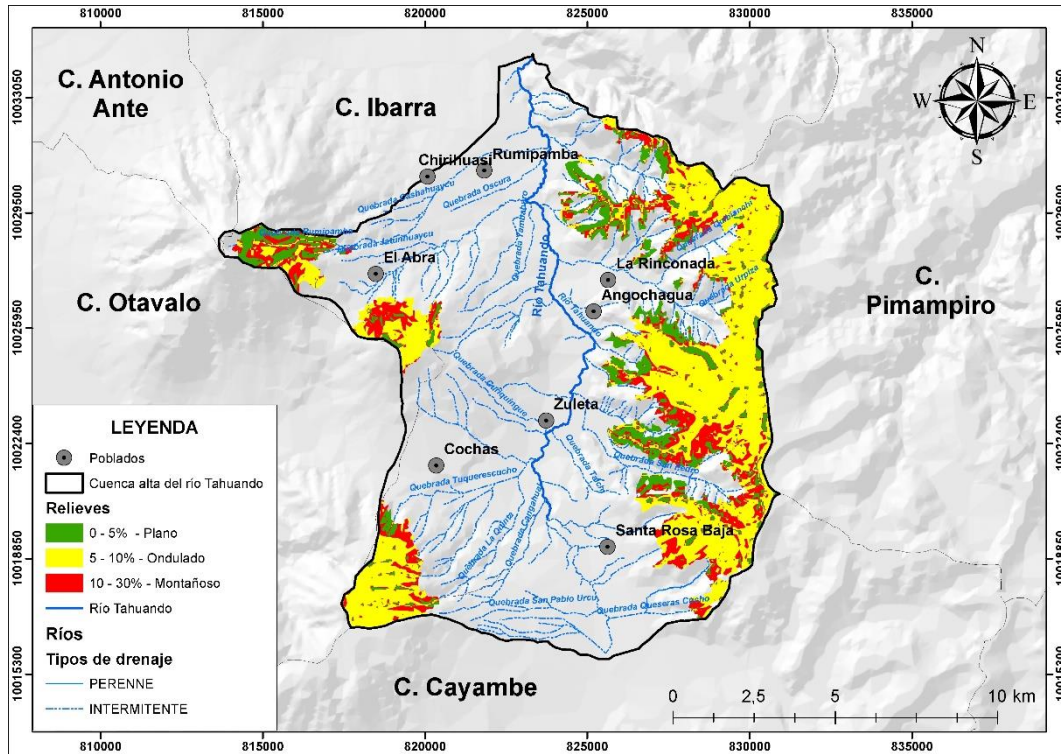


Figura 13. Pendientes de la zona de estudio.

4.2.1.3.3. Cálculo del coeficiente de escorrentía

El cálculo del coeficiente de escorrentía presentó un valor máximo de 0.60 dentro del período de estudio (2000 – 2020), resultado donde se evidencia un mayor coeficiente de escorrentía en los páramos situados en las comunidades de Cochas y El Abra (Laguna del Cubilche), mientras que la comunidad de La Rinconada presenta una escorrentía muy baja, sin embargo, en mayor extensión superficial predomina una escorrentía de rango 0.40, tal como se muestra en la Figura 14.

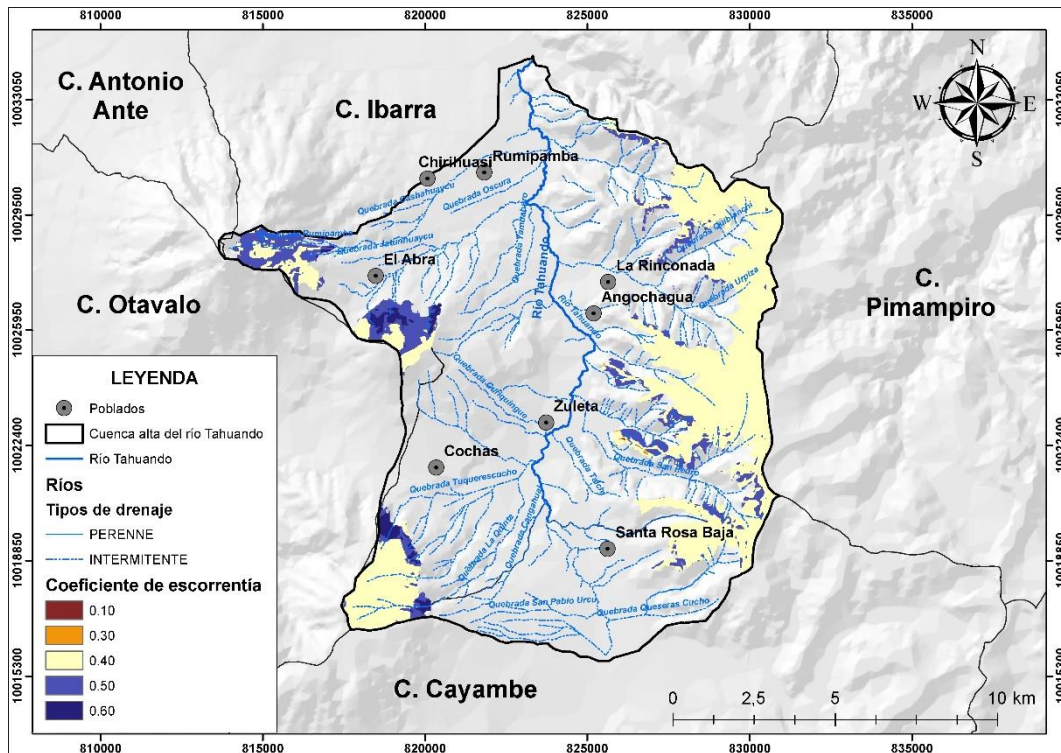


Figura 14. Coeficiente de escorrentía del ecosistema páramo.

4.2.1.3.4. Cálculo del escurrimiento superficial

La base de datos obtenida se presenta en la Tabla 17 donde se evidencia para el año 2015 un mayor escurrimiento en función de los años 2000 y 2020 presentando un incremento de +107.22 mm y +73.01 mm respectivamente, existiendo dentro de este período acontecimientos climáticos importantes (Corriente El Niño) al igual que los cambios de cobertura vegetal existentes, influenciando en la capacidad de escorrentía, valores semejantes a lo que manifiestan Reyes *et al.* (2013) donde los árboles dispersos en pasturas nativas disminuyen la escorrentía superficial e incrementan la infiltración, favoreciendo la conservación agua.

Tabla 17. Datos de escorrentía superficial (l/s) del período 2000 – 2020

Mes/año	Superficie (m ²)	Año 2000	Escorrentía final (l/s)	Año 2015	Escorrentía final (l/s)	Año 2020	Escorrentía final (l/s)
Enero	187 490 000	37.02	220.09	36.99	219.91	43.76	260.16
Febrero		45.91	272.94	41.07	244.17	39.33	233.83
Marzo		59.38	353.05	54.77	325.61	57.03	339.04
Abril		67.46	401.05	74.21	441.23	66.59	395.91
Mayo		67.26	399.87	64.67	384.49	44.82	266.46
Junio		21.93	130.39	92.25	548.47	36.19	215.18
Julio		10.50	62.42	94.14	559.67	52.29	310.87
Agosto		8.51	50.62	3.09	18.36	27.59	164.04
Septiembre		25.63	152.38	5.35	31.81	30.32	180.25
Octubre		13.42	79.77	106.54	633.40	26.88	159.81
Noviembre		83.77	498.06	79.53	472.81	74.70	444.13
Diciembre		31.16	185.28	35.77	212.65	41.51	246.80
Promedio anual		39.33	233.83	57.36	341.05	45.08	268.04

Para Ruiz Suescún *et al.* (2005) coincide que existen varios estudios que han permitido determinar los factores que controlan la generación de escorrentía en función del tiempo, pero son pocos los estudios que se han analizado la variabilidad espacial de la escorrentía. Bajo la presente acotación, Guerra-Amán (2019) detalla en su estudio la determinación de escorrentía en los páramos bajo cinco modelos de balance hídrico de acuerdo con su grado de complejidad. Además, Buytaert *et al.* (2006) menciona debido a bajas precipitaciones existentes, la escorrentía es limitada a no existente. Adicionalmente Cabrera (2012) establece que los páramos de Venezuela la escorrentía se presenta en aproximadamente un 2% debajo de las precipitaciones totales.

Para los años de estudio se evidencia una escorrentía máxima de 77.28 mm/año (resultado promedio) siendo el 2015 el año que presentó una mayor escorrentía que fluctuó entre los 12 a 93 mm, mientras que el año 2000 presentó una variabilidad de 8 a 64 mm/año. Es así como los resultados detallados con anterioridad se evidencian en la Figura 15 donde existe en menor proporción superficial, una mayor escorrentía en los páramos situados en las comunidades de

Cochas, El Abra (Laguna del Cubilche) y parte del volcán Imbabura, en cuanto a los tres años de estudio, se evidencia que existe en mayor extensión superficial, una escorrentía baja (39.53 mm/año) como resultado promedio.

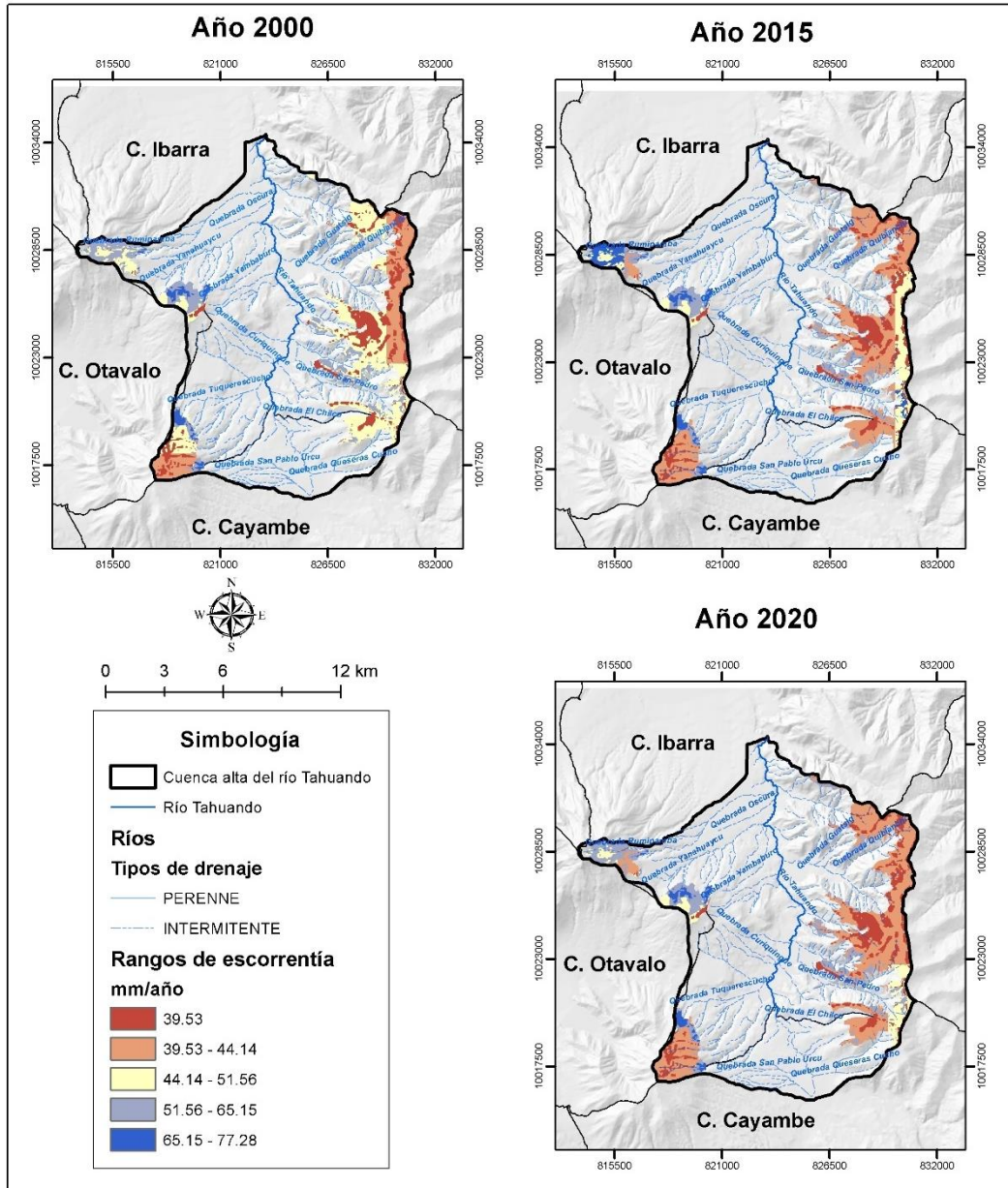


Figura 15. Escorrentía superficial del ecosistema páramo.

4.2.1.4. Infiltración

La infiltración para los años de estudio determinó que los meses de abril, mayo y noviembre presentaron una variabilidad entre los 73 mm/año y 136 mm/año

considerando que noviembre es un mes de recarga hídrica, sin embargo, para los meses de época seca determina una variabilidad desde los 5 mm/año a 155 mm/año valores pertenecientes al año 2015 donde se muestra una variación de las condiciones climáticas, tal como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Datos de infiltración (precipitación efectiva en mm/año).

Mes/año	Año 2000	Año 2015	Año 2020
Enero	60.63	60.56	71.58
Febrero	75.15	67.16	64.25
Marzo	97.00	89.78	93.36
Abril	110.26	121.35	108.76
Mayo	110.27	105.90	73.77
Junio	36.10	151.30	59.70
Julio	17.48	155.28	85.89
Agosto	14.16	5.11	45.60
Septiembre	42.11	8.79	49.90
Octubre	22.01	174.49	44.16
Noviembre	136.90	130.11	122.59
Diciembre	51.09	58.57	67.84
Sumatoria	773.55	1128.39	887.39

Poulenard *et al.* (2001) detalla que la infiltración normalmente oscila entre los 50 a 90 mm/h y entre los 10 a 20 mm/h, sin embargo, no descarta la posibilidad de la influencia de factores externos (temperatura, cambio climático, acciones antrópicas, precipitaciones elevadas y constantes) que repercuten en la determinación de la infiltración asemejando a lo detallado por Buytaert *et al.* (2006) donde evalúa que en el ecosistema páramo la infiltración generalmente es alta.

Para García-Hernández *et al.* (2008) la velocidad de infiltración depende de factores considerable como textura, salinidad de suelo, temperatura de agua, la labranza del terreno, las pendientes y la cobertura vegetal. Menciona que mientras exista una menor pendiente y gran cobertura vegetal, la tasa de infiltración será mayor. Por tanto, se evidenció en el área de estudio pendientes planas, relativamente inclinadas e inclinadas lo que permitió identificar la velocidad de infiltración en función de las coberturas vegetales existentes en cada pendiente,

cabe resaltar que las coberturas de pastos y cultivos están predominando en gran medida la cuenca del río Tahuando.

Para los años de estudio se evidencia una infiltración máxima de 1366.29 mm/año (resultado promedio) siendo el 2015 el año que presentó una mayor infiltración que fluctuó entre los 715 mm/año a 1625 mm/año, mientras que el año 2000 presentó una variabilidad de 473 a 1182 mm/año. Es así que los resultados detallados con anterioridad se evidencian en la Figura 16 visualizando un patrón similar entre los años 2000 y 2015 donde existe una infiltración que varía entre los 790.32 mm a 1333.63 mm, este último valor en menor superficie, sin embargo para el año 2020 se evidencia superficialmente una infiltración mayor (1031.11 – 1333.63 mm/ año) en los páramos situados en las comunidades de Angochagua, La Rinconada, mientras que en menor superficie se sitúan en las comunidades de Cochás, El Abra (Laguna del Cubilche) y parte del volcán Imbabura.

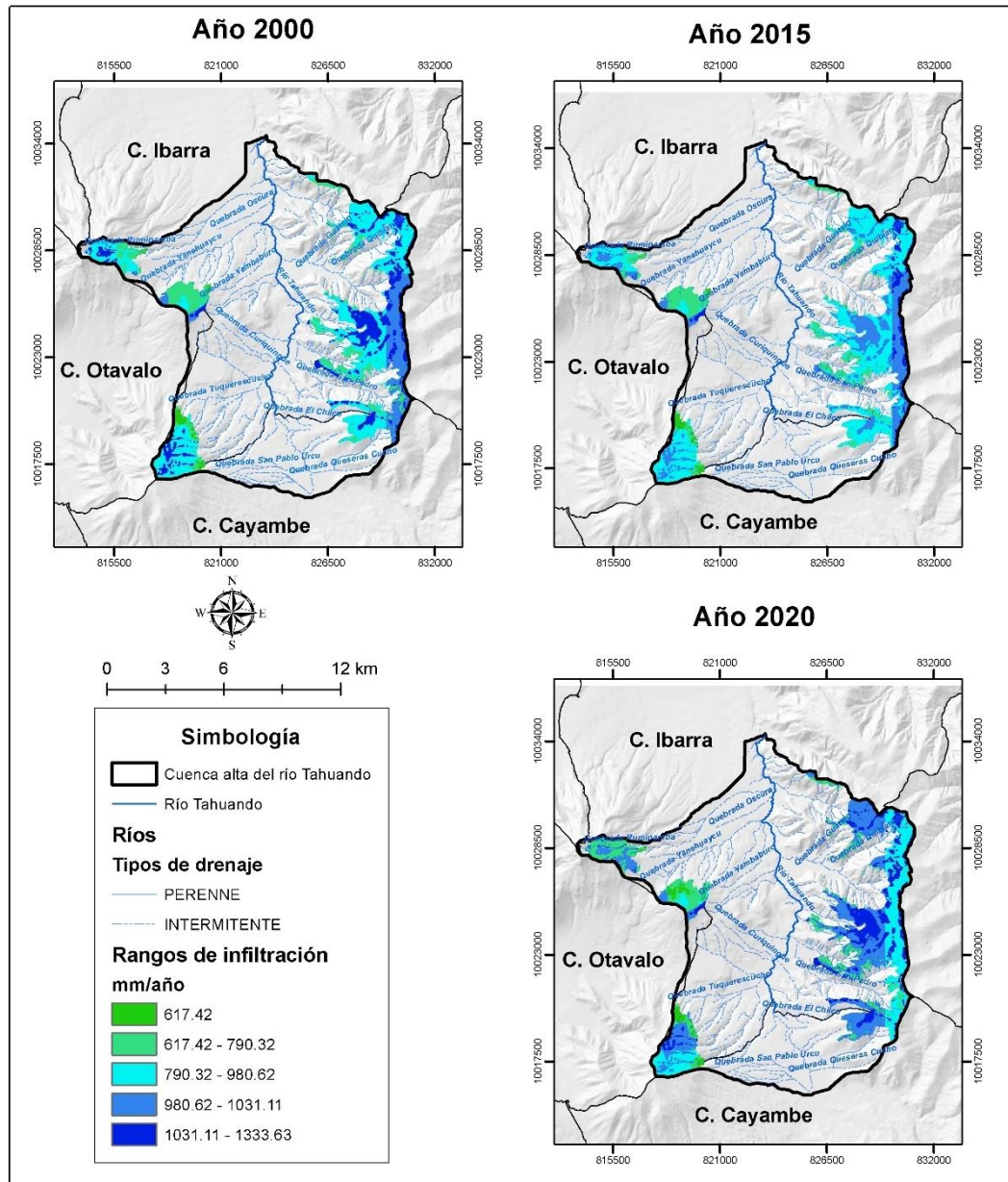


Figura 16. Infiltración existente en la zona de estudio.

Los datos obtenidos se validaron a través de las salidas de campo en las coberturas presentadas a continuación:

4.2.1.4.1. Validación de la infiltración en la cobertura páramo

El cálculo se lo realizó en los páramos del volcán Imbabura donde se determinó la infiltración (cm/h) tanto en época seca como lluviosa, visualizando los resultados en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados prueba de infiltración – cobertura páramo

Tiempo acumulado (min)	Época seca	Época lluviosa
	Velocidad de infiltración (cm/h)	Velocidad de infiltración (cm/h)
5	13.20	12.00
10	10.80	9.60
20	5.40	4.80
30	4.20	3.60
45	3.60	2.40
60	2.80	2.00
90	1.80	1.00
120	1.40	0.80
180	1.30	0.80
240	1.30	0.80

Se graficó la capacidad de infiltración en función del tiempo con los datos obtenidos, donde se evidencia para la época seca un inicio de 13.2 cm/h y decrece dando como resultado una tasa de infiltración constante de 1.3 cm/h (13 mm/h) (A), así como también para la época lluviosa (B), como se observa en la Figura 17, la tasa de infiltración inicial es 12 cm/h decreciendo hasta alcanzar una infiltración constante de 0.8cm/h (8 mm/h). De acuerdo con lo estipulado se considera importante reconocer que el suelo paramuno se encuentra relativamente húmedo a pesar de no que no existan precipitaciones prolongadas.

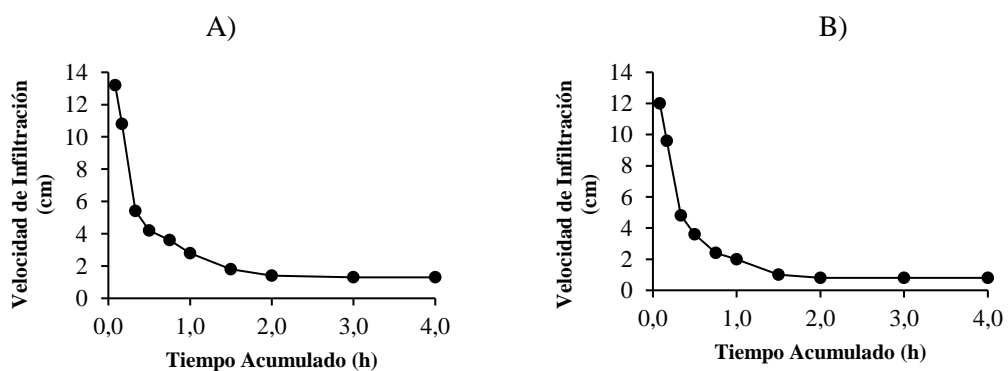


Figura 17. Velocidad de infiltración en la cobertura páramo. A) Época seca B) Época lluviosa

4.2.1.5. Capacidad de retención

El resultado de la base de datos referente a la retención de agua en el suelo mostró una mayor retención en el año 2000 debido a la cobertura vegetal existente y no existía una influencia del cambio climático (Tabla 20).

Tabla 20. Retención real de humedad en el suelo (mm/año).

Mes/año	Año 2000	Año 2015	Año 2020
Enero	10.78	10.91	14.29
Febrero	59.02	29.89	25.85
Marzo	77.40	65.59	51.52
Abril	78.35	78.11	77.27
Mayo	78.36	78.35	77.17
Junio	67.34	78.38	76.12
Julio	41.87	78.38	76.92
Agosto	21.03	37.45	71.94
Septiembre	19.43	10.74	71.91
Octubre	7.71	78.37	68.34
Noviembre	76.04	78.38	77.58
Diciembre	73.29	76.64	77.54
Pro anual	93.94	58.43	64.70

La capacidad de retención de agua se obtuvo a través de la reclasificación de las capas de pedregosidad, textura y profundidad del suelo, obteniendo un rango de 10 a 130 mm (Figura 18), siendo su cálculo promedio de 72.36 mm de retención potencial del agua en el suelo.

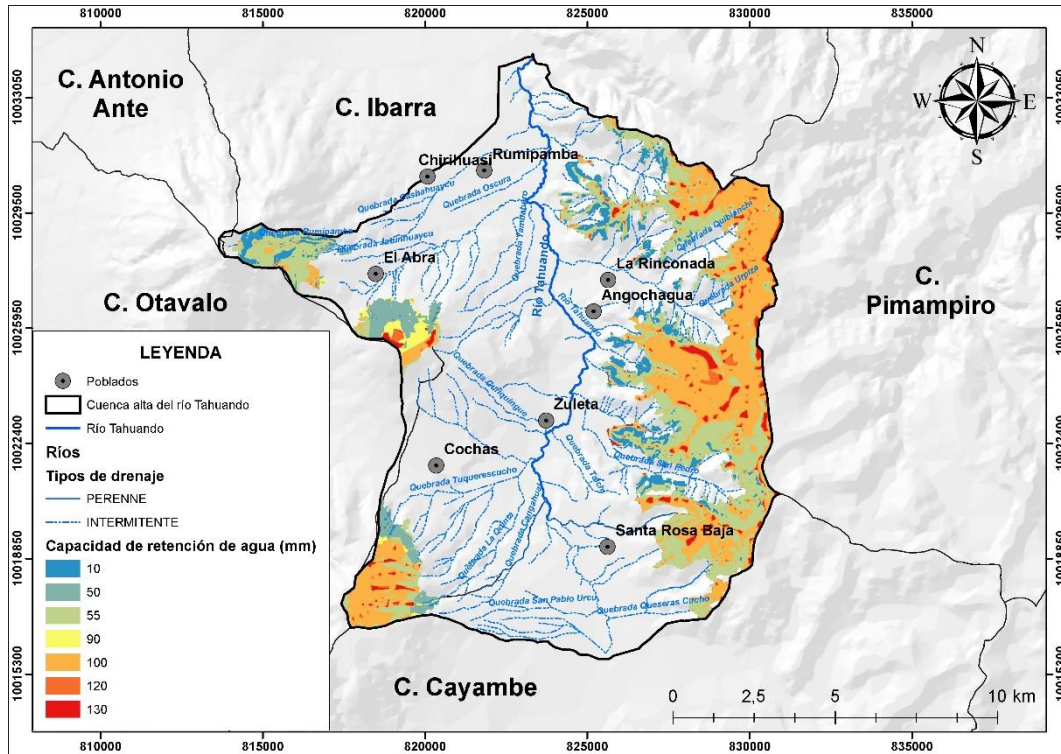


Figura 18. Capacidad potencial de retención del agua en el suelo.

Para Buytaert *et al.* (2006) detalla que existe una alta tasa de retención del agua del suelo, no descarta la influencia de una capa constante de plantas para que exista una buena retención de agua durante las épocas secas, no obstante, determina una baja retención de agua en zonas donde se evidencia la ampliación de la frontera agrícola y pecuaria además de las zonas deforestadas y quemadas, antecedente que detalla Luis-Hernando *et al.* (2009) en su estudio referente al efecto de las actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo Granizo localizado en Cundinamarca. La retención de agua en el suelo osciló entre los 10.74 a 78.78 mm/año evidenciándose en mayor volumen en los páramos de las comunidades de Angochagua y Zuleta, principalmente los resultados se evidencian en la Figura 19, misma que se muestra a continuación:

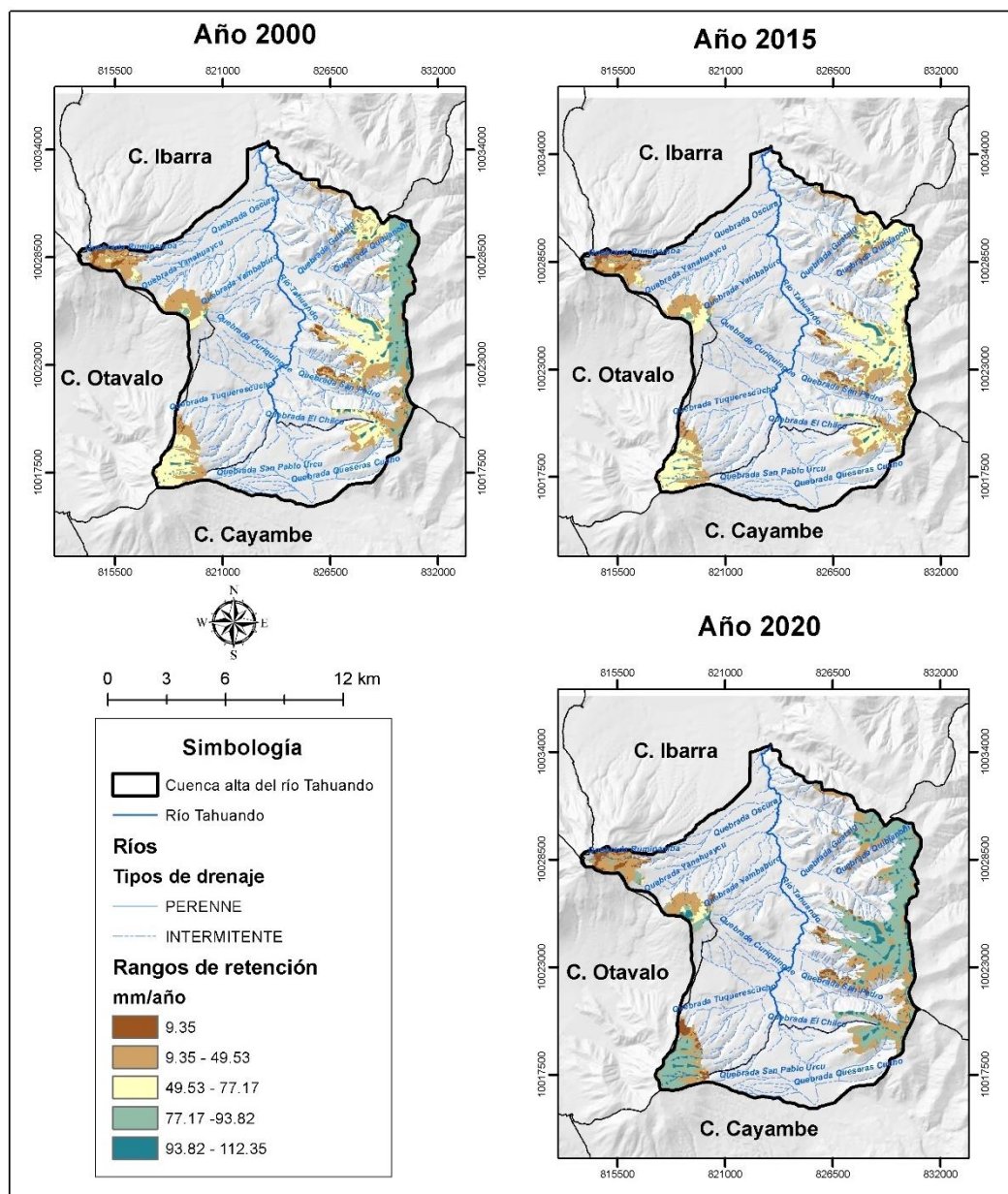


Figura 19. Retención del agua en el suelo.

4.2.1.6. Evapotranspiración real

El resultado de la base de datos referente a la evapotranspiración real mostró un mayor volumen para el año 2020 en la que se visualiza la influencia del cambio climático en función de la cobertura de páramo, los mismos se observan en la Tabla 21 que se muestra a continuación:

Tabla 21. Evapotranspiración real (mm/año).

Mes/año	Año 2000	Año 2015	Año 2020
Enero	47.76	47.54	51.85
Febrero	23.02	48.11	52.64
Marzo	48.33	46.47	54.00
Abril	49.30	48.36	51.46
Mayo	49.35	51.25	52.59
Junio	46.89	48.94	48.33
Julio	42.98	48.35	45.59
Agosto	35.02	46.05	46.44
Septiembre	43.72	35.50	45.12
Octubre	33.73	51.97	47.15
Noviembre	50.51	51.93	50.39
Diciembre	51.87	53.12	48.84
Pro anual	43.54	48.13	49.53

Los resultados visualizados se asemejan a lo que detalla Gil-Marín *et al.* (2012) en su estudio durante el periodo de medición, un resultado de evapotranspiración entre los 68 y 79 mm, sin embargo, hace una comparación con los datos emitidos por Tobón *et al.* (2004) donde se evidencia la variabilidad entre los 50 – 70 mm, resultados que determina una baja tasa de evapotranspiración favorable de excedentes hídricos.

La Figura 20 evidencia la distribución de la evapotranspiración real, manteniendo un patrón en los tres años de estudio una ETR mayor en los páramos situados en las comunidades cercanas a Rumipamba, Angochagua y Zuleta con 51.94 mm/año, sin embargo, para los años 2015 y 2020 se evidencia un ligero incremento en los páramos situados en el sector del cuartel Yaguachi y parte de las Lagunas del Cubilche cuyos valores oscilaron entre los 40.00 a 60.05 mm/año y 43.02 a 60.33 mm/año respectivamente.

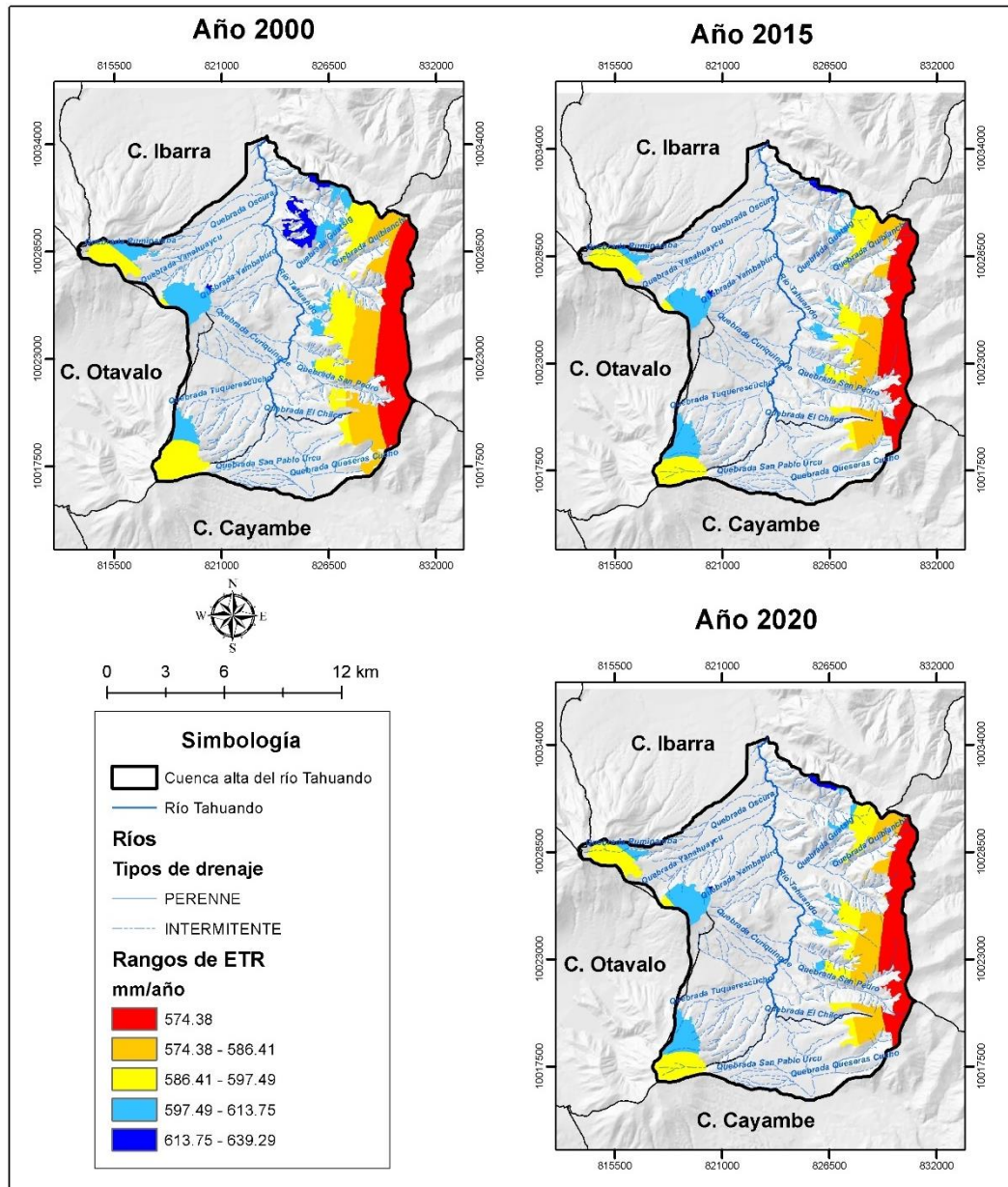


Figura 20. Evapotranspiración real de la zona de estudio.

4.2.2. Balance hídrico

El balance hídrico en el ecosistema páramo del período 2000, 2015 y 2020 determinó las entradas y las salidas para evaluar la disponibilidad hídrica existente en área de estudio. Considerando los valores promedios de las variables analizadas como fueron la precipitación, la cobertura vegetal, escurrimiento, ETP y ETR y la capacidad de retención en el suelo. Los resultados del balance hídrico se evidencian en la Figuras 20, 21 y 22 de los años del período de estudio.

El GAD Ibarra (2020) determina que el balance hídrico a nivel cantonal se centra en que la evapotranspiración se cuantifica en un 68% del agua precipitada, mientras que el 15% escurre por el sistema hídrico de la microcuenca del río Tahuando cuyo caudal es 1.7 m³/s, a la vez se presenta una infiltración subterránea del 17%. Además, durante el mes de octubre y noviembre son meses de almacenamiento hídrico mientras que a partir del mes de mayo a septiembre existe un déficit para la época seca, mientras que el resto de los meses restantes cuentan con un superávit hídrico debido a la saturación que se presenta en la época lluviosa.

Como indica la Figura 21, para el año 2000 se evidencia para el mes de noviembre la mayor precipitación (220.48mm), y un menor escurrimiento (83.77 mm) debido a que existió una mayor infiltración (136.90 mm) puesto que el mes mencionado actúa como almacenador de agua como lo detalla el GAD Ibarra (2020) en su PDOT. Por otra parte, se evidencia que, a partir del mes de junio hasta septiembre, la capacidad de retención de agua (S) decrece debido a que los meses son hidrológicamente secos (Villarroel-Montano, 2021).

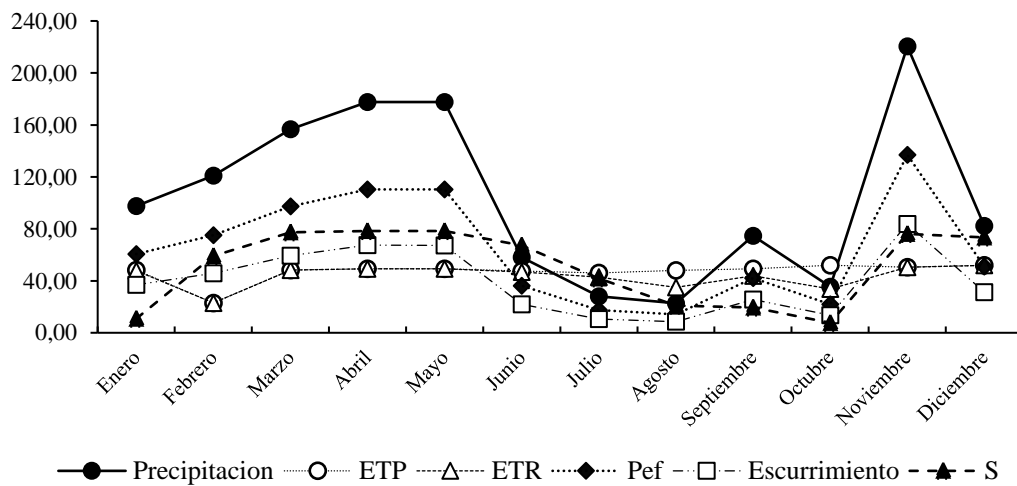
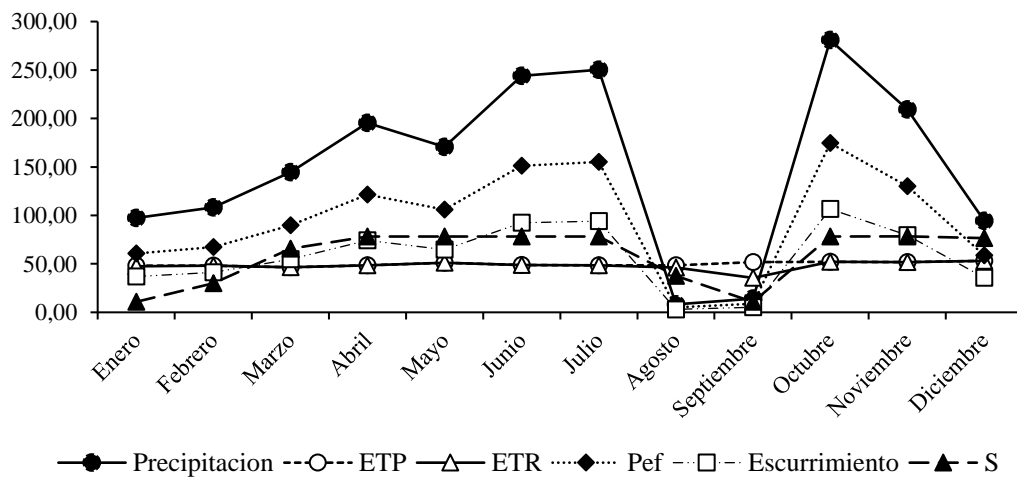


Figura 21. Balance hídrico en el año 2000.

Como indica la Figura 22, se muestra una elevada precipitación (280.91 mm) en el mes de octubre, a la vez el almacenaje de retención de agua fue de 78.37 mm y por ende una considerable escorrentía (106.54 mm); sin embargo, la influencia de fenómenos naturales junto con la evolución constante del cambio

climático resultado de la intensificación de actividades antrópicas han repercutido en ecosistemas de alto interés de conservación, es así como, en los meses de agosto y septiembre (meses hidrológicamente secos) cuantifican valores bajos a diferencia del resto de meses, estos cambios tan drásticos que se presentan en el área de estudio se anexa a lo que detalla Martínez *et al.* (2017) en su estudio donde considera al fenómeno de El Niño como un factor influyente pues detalla que en este año existieron un choque de las corrientes de los vientos ecuatoriales (sentido este – oeste), seguidamente de ondas Kelvin que transportaron una gran energía calórica en el borde occidental y oriental del Pacífico lo que originó que en ciertas regiones sean más cálidas causando extremas sequías, como se consecuencia del fenómeno natural se evidenciaron en Latinoamérica y el Caribe eventos como precipitaciones extremas y las consecuentes inundaciones, las mismas que repercutieron en los



campos de la agricultura principalmente (Villaruel-Montano, 2021).

Figura 22. Balance hídrico en el año 2015.

Para el año 2020, la Figura 23 muestra la misma tendencia de almacenaje de agua en el mes de noviembre (77.58 mm) siendo su precipitación de 197.09 mm reflejándose una infiltración de 122.59 mm, a la vez se desarrolló una escorrentía de 74.70 mm. Se evidencia las consecuencias reflejadas a partir del 2015 en donde el mes de julio (mes seco) obtuvo mayores valores de las variables a diferencia del resto de meses que conforma la época seca (Villaruel-Montano, 2021).

Además, se evidencia que las variables de evapotranspiración potencial y real para los años 2000 y 2015 fueron variables, sin embargo, para el año 2020 se mantuvieron constantes. Adicionalmente, la retención de agua (S) en el año 2020 fue constante, sin embargo, en los dos períodos de estudio anteriores fueron cambiantes de acuerdo con los fenómenos naturales presentados en espacio y tiempo.

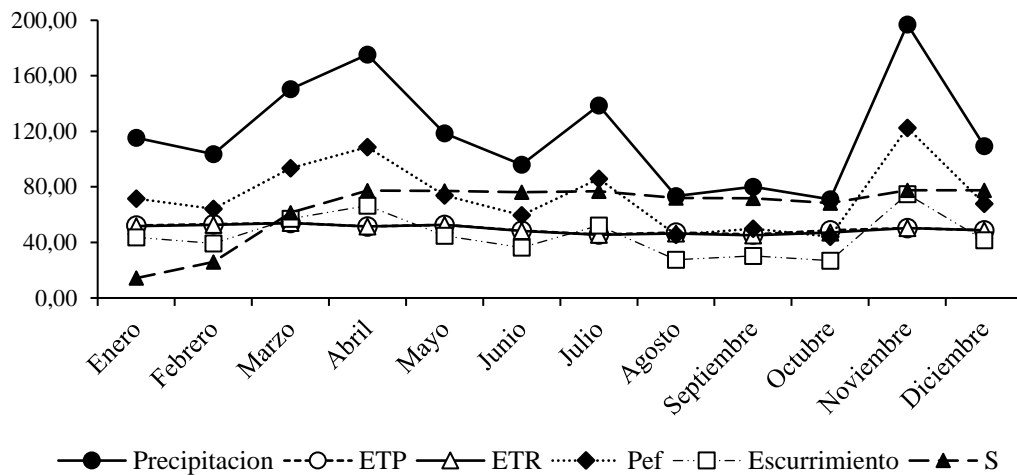


Figura 23. Balance hídrico en el 2020

De acuerdo con el estudio, los datos de precipitación alcanzaron valores mensuales promedio de 124.95 mm/año, mientras que la precipitación efectiva (infiltración) obtuvo valores promedios a 77.48 mm/año, encontrando una diferencia de 47.47 mm entre las variables. El escurrimiento mostró valores mensuales promedio de 47.26 mm/año, mientras que la evapotranspiración potencial alcanzó valores promedios de 48.85 mm/año, encontrando así una diferencia considerable en lo que respecta a la retención de humedad en el suelo mismo que alcanzó un valor máximo de 701.18 mm/año para el año 2015 mientras que los años 2000 y 2020 obtuvieron valores de 610.62 y 776.46 mm/año respectivamente, además cabe considerar que la capacidad máxima de retención de agua en la cuenca alta del río Tahuando es de 130 mm/m, bajo este señalamiento se entiende que a nivel de ecosistema páramo, existe un superávit de agua, estos resultados se asemejan a los resultados de Ruiz-Reyes (2016) en su estudio donde

señala que la cuenca alta del río Tahuando posee una capacidad máxima de retención de agua de 150 mm/m.

Los resultados concuerdan con el estudio realizado por la Consultora “Aguas del Ecuador” (2008) citado por Ruiz-Reyes (2016) donde menciona que las precipitaciones dentro de la cuenca del río Tahuando oscilan entre los 50 a 110 mm distribuye en la parte baja con 50 mm, en la zona del volcán Imbabura las precipitaciones están alrededor de los 70 mm y en la Cordillera de Angochagua los valores de las precipitaciones entre los 90 a 110 mm, coincidiendo así las precipitaciones obtenidas con los resultados de la consultora tanto en las zonas del volcán Imbabura y parte de la Cordillera de Angochagua.

4.2.2.3. Caudal

4.2.2.3.1. Perfil del área

Como se visualiza en la Figura 24, la profundidad más notable del punto de aforo fue de 38 cm y el punto más bajo es de 9 cm, a todo ello se suma el punto de toma de datos en la que se trata de hacerlo donde no exista gran cantidad de rocas puesto que infieren en la velocidad del caudal.

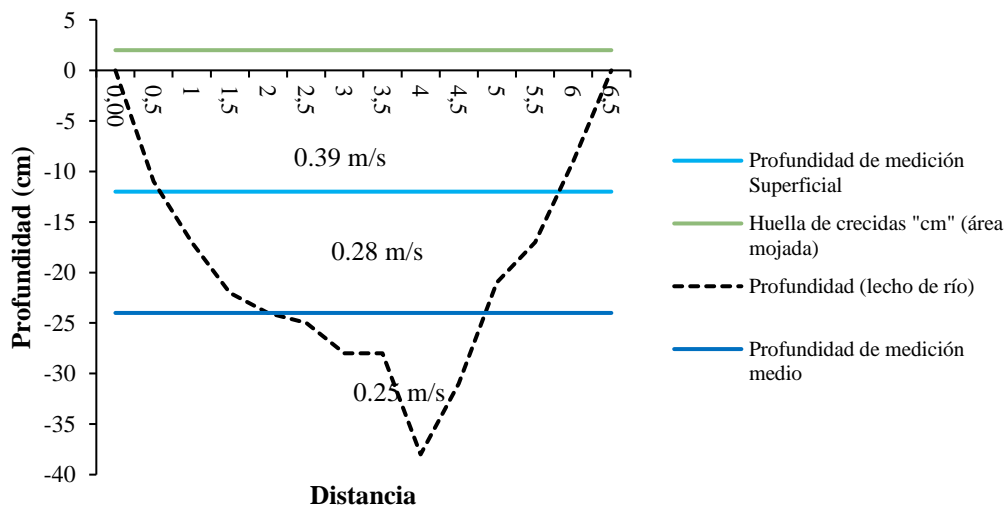


Figura 24. Perfil y velocidad del lecho del río Tahuando.

4.2.2.3.2. Caudal aforado

La medición de caudales en campo se lo realizó por medio del molinete electromagnético MF Pro para la época seca presento un caudal de 400 l/s y para la época lluviosa fue de 690 l/s, cabe mencionar que los datos son resultados obtenidos en el año 2020.

El caudal generado a nivel de cuenca hidrográfica fue de 1.39 m³/s (1398 l/s), resultado determinado para la época seca (junio- septiembre) donde el caudal fue de 2.01 m³/s (2019.01 l/s) y para la época lluviosa (octubre – mayo) fue de 4.4 m³/s (4464.42 l/s). Los datos fueron generados en el software ArcGIS v10.8, mismos que mostraron que existe un superávit de agua debido a los usos existentes que se encuentran en el área, estos resultados se compararon con lo que detalla (Terán-Vinueza, 2021) en su estudio donde afirma que la cuenca alta del río Tahuando posee un caudal promedio de 1.28 m³/s .

En lo que respecta al ecosistema páramo se generó un caudal en el año 2020 de 1.68 m³/s (1687 l/s), dato resultante para la época seca (junio – septiembre) de 1.75 m³/s (1753 l/s), mientras que para la época lluviosa (octubre – mayo) fue de 1.81 m³/s (1809 l/s) a través del software ArcGIS v10.8 demostrando que existe un superávit de agua en el ecosistema paramuno que se distribuye en toda la cuenca hidrográfica, siendo un factor aportante a los afluentes que llegan a generar el caudal del río Tahuando.

Por otro lado, los caudales generados se validó con el caudal otorgado por el Banco Nacional de Autorizaciones (departamento del MAATE) donde se obtuvo un caudal existente en la zona de estudio fue de 1219 l/s de las parroquias de Angochagua y La Esperanza (Tabla 22) con los usuarios que están concesionados (65 usuarios), infiriendo así que en la cuenca del río Tahuando existe un superávit de 179 l/s, sin embargo, en la parte baja y media de la cuenca se evidencia ligeras variaciones del aporte de agua debido a los usos de cobertura vegetal (pastos y cultivos principalmente) que influyen en la distribución del caudal; no obstante, existe un mayor caudal en la parte alta porque no existe gran demanda de recursos

hídricos ya que existe mayor cobertura vegetal como bosque, vegetación arbustiva y páramo, siendo este último un ecosistema de reserva de agua.

Tabla 22. Uso y caudales de las concesiones en la zona de estudio.

Uso	Angochagua	La Esperanza
	Caudal (l/s)	
Riego	1031.17	126.93
Uso doméstico	50.04	5.80
Abrevadero	5.00	0.50

Fuente: (SENAGUA, 2018)

La información anteriormente mencionada concuerda con lo que estipula Cuasapud-Guadir (2017) en estudio donde menciona con los datos de caudal que se obtuvieron en el año 2016 han disminuido, considerando el crecimiento poblacional, factor que influye en los caudales puesto que en la parte baja de la cuenca del río Tahuando (urbe) existe un déficit ya que el caudal obtenido es de 234.9 l/s y abastece a 134 185 habitantes y para el sector rural existe un superávit ya que la oferta hídrica es de 42.22 l/s y abastece a 30 128 habitantes.

4.3. Propuesta de estrategias de conservación del recurso hídrico en función del modelo hidrológico obtenido

Para el proceso de establecer propuestas de estrategias de conservación del recurso hídrico y el ecosistema páramo, se involucró a las comunidades locales y actores externos interesados en la transformación del territorio, para lo cual se conoció las principales amenazas o problemas que afectan la estabilidad del sistema, a su vez se reconoció la trascendencia que tiene el generar un pensamiento colectivo de colaboración y cooperación que esté fortalecido por procesos políticos integrales amparados por un interés común como es la conservación de los sistemas de manejo adaptativo y el mantenimiento de la biodiversidad y la diversidad cultural a través de mecanismos de conservación integral, que conducen hacia un desarrollo sostenible (Lozano *et al.*, 2016).

4.3.1 Identificación de problemáticas

Los resultados arrojados de acuerdo al análisis de datos y al establecimiento de mapas parlantes elaborados en la reunión sostenida el 3 de junio de 2022 con el técnico ambiental, los presidentes de las juntas de agua, guardabosques de cada comunidad y un delegado por parte de la presidenta del GAD parroquial fueron la explotación agropecuaria en los sectores de Chirihuasi y Rumipamba donde los asistentes manifestaron su preocupación ya que existe un alto incremento de áreas destinadas para actividades agropecuarias sin ningún control, así como también la explotación ganadera en los alrededores de las comunidades de La Rinconada, Angochagua, Santa Rosa Baja y Zuleta, provocando cavilación en la población porque este ejercicio ya se encuentra limitando con las franjas del ecosistema páramo, a esto se suman los cambios de uso de suelo, la transformación del paisaje natural por la pérdida de cobertura vegetal específicamente la vegetación arbustiva de acuerdo a los resultados del objetivo 1, de igual forma, toma un rol fundamental las alteraciones que se sitúan en las fuentes de agua y el poco énfasis que se otorga a la educación ambiental.

4.3.2 Matriz de Vester

En la Matriz de Vester se distribuyó los diversos problemas recopilados encontrando así las situaciones de mayor preocupación del sitio de estudio , evidenciando 11 problemas en general, estableciendo un análisis de doble vía de cada problemática, conociendo así el grado de influencia que presenta un problema frente a los demás, tal y como se puede observar en la Tabla 23. La aplicación de la metodología Vester en la identificación de problemáticas socioambientales en cuencas hidrográficas según Rodríguez-Restrepo (2022) es la más óptima en vista de que se trabaja de manera objetiva, es decir que se prioriza los problemas, se define un plan de trabajo y se trabaja en programar soluciones.

Tabla 23. Problemáticas existentes en la zona de estudio.

Variables	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	Total
												Influencia
1 Explotación agropecuaria y ganadera sobre la línea de páramos		1	2	3	1	3	3	1	2	3	2	21
2 Cambio de uso de suelo en los páramos	3		3	2	3	2	1	2	3	3	2	24
3 Transformación de paisajes naturales	3	2		2	1	3	3	1	2	3	2	22
4 Disminución de vegetación arbustiva	3	3	3		1	2	3	2	3	3	2	25
5 Erosión del suelo	1	1	1	2		2	2	0	0	1	1	11
6 Alteraciones en las fuentes hídricas	3	1	2	1	2		1	2	1	1	0	14
7 Incremento del porcentaje de pastos	3	1	3	3	3	2		2	3	0	1	21
8 Carencia de estaciones meteorológicas	1	1	2	1	0	1	2		2	2	0	12
9 Uso inadecuado de los recursos hídricos	1	0	0	1	1	2	2	2		1	3	13
10 Desconocimiento de educación ambiental	3	1	2	3	1	3	3	2	3		1	22
11 Aguas negras	3	2	0	1	0	3	1	0	3	3		16
Total dependencia	24	13	18	19	13	23	21	14	22	20	14	

Una vez identificado y verificado el grado de influencia entre los problemas se estableció un diagrama de dispersión para mostrar las relaciones existentes y ser clasificadas en problemas pasivos, críticos, indiferentes y activos como se muestra en la Figura 25, reafirmando lo que se mencionó en la reunión realizada con los entes prioritarios en el recurso hídrico.

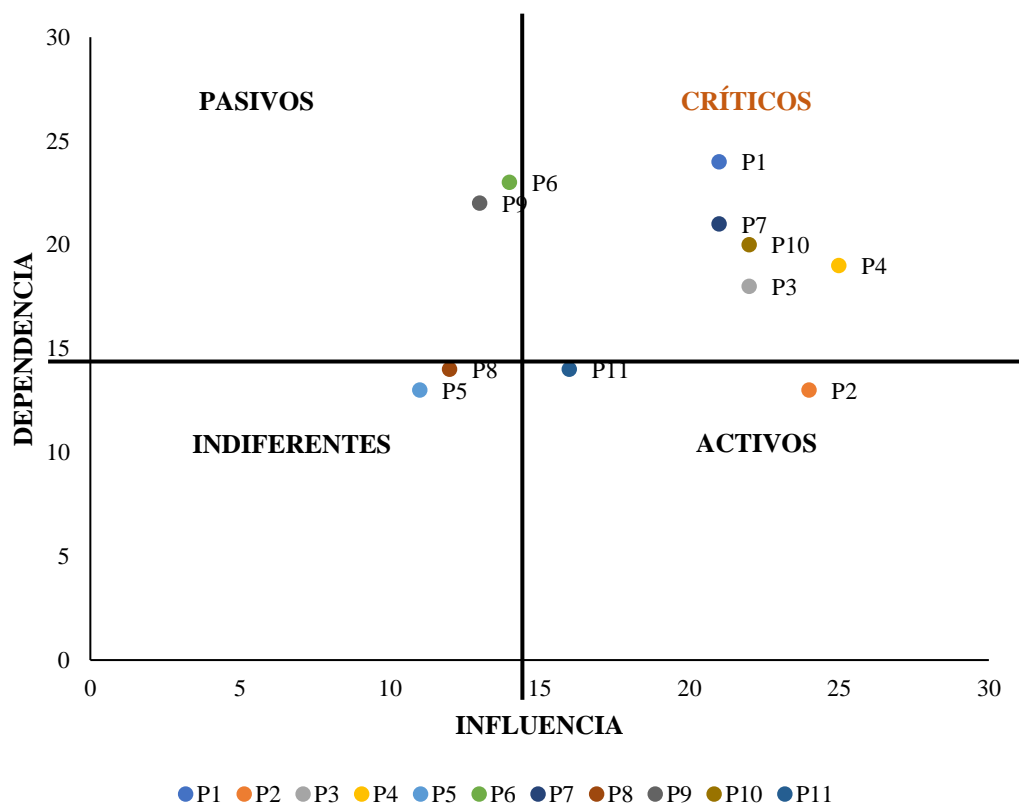


Figura 25. Categorización de las problemáticas

4.3.3 Establecimiento de estrategias de conservación

Para poder impulsar procesos de conservación y uso sustentable de un ecosistema se tuvo que entender en primera instancia, que la perspectiva de territorio debe ser estudiada como un socio-ecosistema, y en segunda instancia, la aplicación del enfoque ecosistémico como tal, razón por la cual se establecen 4 estrategias de manejo, protección y conservación del recurso hídrico y los ecosistemas presentes en la cuenca.

4.3.3.1 Estrategia 1. Recuperación y conservación de suelos en áreas intervenidas.

Con la implementación del presente programa se busca la disminución de la presión de los sistemas productivos sobre el suelo, evitando así su erosión y pérdida, en los sectores donde se ha evidenciado un alto grado de intervención humana como

son las áreas de La Rinconada, parte de Angochagua y Zuleta, con la finalidad de generar mejores condiciones para la recuperación y conservación de los suelos altoandinos.

La principal recomendación relacionada con este programa es el establecimiento de acuerdos sociales para sacar el ganado vacuno y cultivos de los sectores que se encuentran demasiado cerca del páramo y así poder crear colectivamente condiciones más amigables para el uso y mantenimiento de los servicios ambientales de los suelos de montaña.

Objetivo general

Conservar y/o restaurar las áreas intervenidas en las comunidades de Angochagua, La Rinconada y Zuleta, a fin de que se garantice la regeneración de los sectores degradados sin que se vea afectado el sistema productivo.

Objetivos específicos

- Identificar zonas en las cuales se encuentren remanentes de vegetación prioritaria para conservación y áreas direccionadas para restauración.
- Recopilar información sobre actividades alternas sostenibles de producción ganadera y agropecuaria, para procesos de capacitación en las comunidades.
- Dinamizar la participación de unidades sociales estratégicas tales como estudiantes, autoridades, agricultores y ganaderos. .

Tabla 24. Programa de conservación y recuperación de suelos en áreas intervenidas.

Proyectos	Actividades	Verificadores	Responsable
<p>Caracterización del disturbio, factores de tensión y limitantes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación del estado actual de áreas degradadas • Identificación de barreras ecológicas y sociales que impiden la recuperación o restauración, por ejemplo, limitantes que inciden en la dispersión de plantas, el establecimiento y el desarrollo de estas. • Implementación de capacitaciones a través de círculos restaurativos con los pobladores sobre barreras ecológicas y socioeconómicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Documento del estado actual de áreas degradadas • Formularios de visitas de campo • Informes de avance • Lista de asistencia a capacitaciones • Fotografías 	<p>GADS Parroquiales de Zuleta y Angochagua</p>
<p>Proyecto de recuperación de áreas intervenidas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Realización de talleres sobre la implementación de labranza mínima, reemplazo de plaguicidas químicos por abonos orgánicos. • Establecimiento de espacios para desarrollo de compost y lombricultura. • Ejecución de mingas de limpieza y creación de zanjas de desviación para evitar el poder erosivo del agua. • Implementación de cultivos asociados a fin de que se cree una simbiosis entre organismos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Actas de reuniones • Cronograma de talleres • Lista de asistencia • Reportes mensuales de seguimiento. 	<p>GADS Parroquiales</p>

4.3.3.2 Estrategia 2. Protección de remanentes de bosque y páramo en las parroquias de Angochagua y Zuleta.

Con la implementación de un programa para la protección de la vegetación natural se implementarán acciones directas de conservación de páramo y bosque ya que se promueve y se fortalece a través de la educación ambiental y revalorización de estos ecosistemas, los cuales se encuentran distribuidos a lo largo de la microcuenca, específicamente en áreas como Angochagua, Zuleta, Cubilche, parte alta del volcán Imbabura y comunidades como Cochas y La Rinconada.

Las actividades que se pueden desarrollar tienen como fin la conservación y la regulación hídrica, basándose principalmente en la aplicación de técnicas de restauración tanto activa como pasiva para fortalecer biocorredores ecológicos, los cuales van a ir interconectando parches de páramos y bosque existentes en Santa Rosa del Tejar por ejemplo, con remanentes existentes en la parroquia vecina de Mariano Acosta, lo cual se va a convertir en un mejoramiento de la calidad de los servicios ambientales que estos ecosistemas proveen.

Objetivo general

Garantizar una adecuada protección de los remanentes de la vegetación natural de los ecosistemas bosque y páramo, a fin de que se incrementen y lograr un biocorredor ecológico.

Objetivos específicos

- Proteger los bosques y páramos remanentes del área, mediante el establecimiento de unidades de manejo de recursos naturales.
- Promover y fortalecer la participación de las diferentes organizaciones y grupos locales en la planificación y ejecución de actividades ligadas a protección de la vegetación natural.
- Elaborar planes de manejo en función del cuidado y preservación de los ecosistemas altoandinos.

Tabla 25. Programa para la protección de remantes de bosque y páramo en las parroquias de Angochagua y Zuleta.

Proyectos	Actividades	Verificadores	Responsable
<p>Proyecto de protección para los remanentes de ecosistema páramo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de guías didácticas sobre la flora característica de los páramos. • Establecimiento de sistemas comunitarios para la vigilancia y el monitoreo sistemático. • Limpiezas constantes con la ayuda del sector educativo. • Implementación de planes de manejo en función del cuidado del ecosistema páramo 	<ul style="list-style-type: none"> • Guías de flora característica de páramos • Documento del plan de vigilancia y monitoreo • Oficios o actas de invitación • Registro fotográfico • Visitas periódicas en campo 	<p>GADS Parroquiales, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica</p>
<p>Proyecto de protección para los remanentes de bosque</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de un proceso sistemático de información, formación y difusión, para una permanente concientización ambiental. • Implementación de talleres con enfoque de protección de los remanentes de bosques. • Reforestación con plantas nativas para la protección de sensibilidad hídrica. • Fortalecimiento de las unidades de biocorredores ecológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Informes de monitoreo y control • Material utilizado en los talleres • Reportajes realizados en plataformas digitales • Estadística de áreas reforestadas • Reportes semanales de avance 	<p>GADS Parroquiales, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica</p>

4.3.3.3 Estrategia 3. Transición de agricultura y ganadería común a una sostenible.

El cambio en los sistemas tradicionales de producción agropecuaria y ganadera es fundamental para lograr un desarrollo sostenible, según Serrano (2015) para que exista sostenibilidad, la agricultura y ganadería debe satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras y al mismo tiempo garantizar la rentabilidad, salud ambiental, equidad social y económica.

Con la implementación de este programa se logrará el aumento de la variedad de los cultivos tradicionales a diferentes altitudes, diversificando así los alimentos y el mercado, para contribuir al cambio de los sistemas tradicionales a que sean de carácter sostenible.

Objetivo general

Promover el desarrollo sostenible de los recursos naturales en los sistemas productivos como la ganadería y agricultura, a través del mejoramiento en la administración, manejo y producción agropecuaria.

Objetivos específicos

- Fortalecer el cambio de los sistemas productivos agropecuarios tradicionales por sostenibles.
- Generar un proceso sistemático de información, formación y difusión en las comunidades de la importancia de cambiar el sistema productivo tradicional a un amigable con el medio ambiente.
- Garantizar un adecuado desarrollo de las actividades productivas, bajo tres ejes fundamentales como lo social, ambiental y económico.

Tabla 26. Programa de transición de agricultura y ganadería común a una sostenible.

Proyectos	Actividades	Verificadores	Responsable
Proyecto Cultivo Vivo	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de parcelas ecológicas, ya que contribuye al aumento de la variedad de los cultivos, aprovechando al máximo la simbiosis. • Utilización de fertilizantes orgánicos, producidos por los mismos dueños como son cascaras de huevo, estiércol animal, hojas. • Capacitación constante en la forma de riego en función del tipo de terreno, cobertura vegetal, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Registro fotográfico • Informe de seguimiento • Visitas periódicas en campo 	<p>GADS Parroquiales, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica</p>
Proyecto Desarrollo Ganadero sostenible	<ul style="list-style-type: none"> • Zonificación ganadera basada en la capacidad de carga animal, permite aprovechar sustentablemente los pastos ya plantados. • Complementación nutricional del ganado con sales y balanceados. • Mejoramiento genético del ganado previo a acuerdos sociales con los pobladores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapas de zonificación ganadera • Informe de entregas de complementación nutricional • Actas de acuerdos, entrevistas semiestructuradas con pobladores • Informes estadísticos 	<p>GADS Parroquiales, Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica</p>

4.3.3.4 Estrategia 4. Capacitación constante a las comunidades sobre la importancia del manejo y conservación del medio ambiente.

Para Guevara-Fiallos (2019) en el momento en que la degradación del medio ambiente empieza a ser entendida como un problema social, es necesario fomentar la práctica de la educación ambiental debido a que se la determina como una estrategia óptima para la difusión, sensibilización y capacitación de la ciudadanía, de esta manera se apoya y fortalece el concepto de desarrollo sostenible, ya que en ella intervienen todos los grupos de la población.

Con la implementación del programa de capacitación constante de las comunidades se contribuirá a los procesos permanentes de formación, capacitación e investigación, los cuales sirven para elevar el nivel de conciencia de los pobladores sobre el manejo y la preservación de los recursos naturales, a fin de que los problemas identificados sean disminuidos y en lo posible erradicados con el transcurrir del tiempo.

Objetivo general

Fomentar el incremento de formación, capacitación e investigación de los actores involucrados en los sistemas de producción y de conservación de la cuenca alta del río Tahuando.

Objetivos específicos

- Implementar planes de educación ambiental en función de los factores ecológicos, políticos, económicos, sociales y educacionales.
- Evaluar el grado de conciencia ambiental que presentan los pobladores del sector a fin de que se identifique sus necesidades, intereses, recursos y posibilidades.
- Realizar eco talleres, de los cuales se puede obtener promotores ambientales que contribuyan al incremento de la conciencia ambiental.

Tabla 27. Programa para la capacitación constante a las comunidades sobre la importancia del manejo y conservación del medio ambiente.

Proyectos	Actividades	Verificadores	Responsable
<p>Proyecto Mientras más conozco más conservo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de subproyectos escolares que generen intercambio de conocimientos ambientales entre instituciones. • Formación de promotores ambientales, especializados en educación ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • Informe de visita de seguimiento a talleres • Fichas de evaluación de los talleres • Cuadros de reconstrucción de actividades 	<p>GADS Parroquiales, Unidades Educativas</p>
<p>Proyecto Rescatando saberes ancestrales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Unificación de conocimientos ancestrales y actuales de conservación y manejo de los recursos naturales. • Charlas motivacionales sobre la preservación del medio ambiente. • Talleres medioambientales donde se evidencie el cambio del sistema productivo tradicional por un sostenible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reportes • Fichas descriptivas • Recursos utilizados • Registro fotográfico • Informe de monitoreo y control 	<p>GADS Parroquiales, Unidades Educativas</p>

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los patrones espaciales de la cobertura vegetal en el ecosistema páramo de la cuenca alta del río Tahuando aumento de forma no representativa de 304.64 ha (1.62%) siendo para el año 2000 una superficie de 3311.57 ha (17.66) y para el año 2020 de 3612.61 ha (19.27%), mientras que, la vegetación arbustiva fue la cobertura que mayor superficie perdió, pasando de 44959.85 ha (23.79%) en el año 2000 a 1796.12 ha (9.58%) en el año 2020, principalmente por el aumento de las actividades agropecuarias.

Existe un déficit general del recurso hídrico en la cuenca alta del río Tahuando; sin embargo, para el ecosistema páramo, presentó un superávit hídrico en función al análisis del balance hídrico realizado, debido a que se registraron valores más altos referentes a la infiltración del suelo, garantizando una mayor recarga de los acuíferos y abastecimiento de agua. El caudal promedio de la cuenca alta del río Tahuando fue de 1.68 m³/s; sin embargo, se registran cambios en la escorrentía superficial a partir del año 2015, momento en el que existen alteración en el régimen pluviométrico, principalmente en los meses ecológicamente secos.

La información obtenida cartográficamente junto con los datos de las variables hidrometeorológicas en la cuenca alta del río Tahuando permitieron el establecimiento de estrategias enfocadas en la conservación y preservación del ecosistema páramo, que promoverá la concientización ambiental estableciéndose como una herramienta para evitar el deterioro de los recursos naturales existentes en el área de estudio en proyectos a futuro.

5.2. Recomendaciones

Ejecutar investigaciones a futuro por períodos de tiempo más prolongados con el fin de evaluar la dinámica del balance hídrico de la cuenca alta del río Tahuando, las mismas que serán útil para la toma de decisiones de los GADs parroquiales y su posterior difusión de los resultados a las comunidades pertinentes para su manejo adecuado y protección del recurso hídrico.

Desarrollar y poner en práctica las estrategias propuestas en el presente estudio a corto plazo para gestionar de manera adecuada los recursos naturales y evaluar la distribución hídrica y conservación de los ecosistemas de bosque , páramo y vegetación arbustiva y su influencia en los campos agrícola y ganadero, fomentando un equilibrio entre el uso del suelo con el uso potencial del mismo y evitar los conflictos de uso de suelo generados por el mal manejo del territorio. La aplicación de los programas podría llevarse a cabo, a través del financiamiento y acompañamiento técnico de las instituciones tanto públicas como privadas.

Se recomienda la participación de entidades Gubernamentales (GADs Municipales, Parroquiales y Provinciales) y No Gubernamentales (ONG) en proyectos y socializaciones ambientales enfocadas a la creación de políticas ambientales para el manejo de recursos hídricos y que sean incorporadas en las actualizaciones de los PDOTs de las parroquias de La Esperanza y Angochagua.

REFERENCIAS

- Aguirre, N., Torres, J., y Velasco, P. (2013). Guía para la restauración ecológica en los páramos del Antisana. *Volumen I, 9-13 pp. Quito, Ecuador: Fondo de protección del agua FONAG.*
- Aladin. (2020). Angochagua, Ecuador - Clima y Previsión meteorológica mensual. Weather Atlas.
- Alonzo, L. A. A., y Vera, M. A. G. (2010). Pérdida de cobertura vegetal como efecto de la urbanización en Chetumal, Quintana Roo. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales, 12(2)*, 1-19.
- Amador-García, A., Granados-López, E., y Mendoza, M. E. (2011). Three approaches to the assessment of spatio-temporal distribution of the water balance: the case of the Cuitzeo basin, Michoacán, Mexico. *Investigaciones geográficas, (76)*, 34-55.
- Andrade-Figueroa, G. (2020). La gobernanza local en el manejo integral del agua: el caso de la parroquia de Angochagua, Ecuador. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial, (17)*.
- Andrade-Villarreal, D. A. (2019). *Lineamientos para el establecimiento de un área de conservación y uso sustentable en la parroquia de Angochagua, cantón Ibarra, provincia de Imbabura* (Tesis de pregrado, PUCE-Quito).
- Aponte-Pérez., L. T., y Galeano-Franco., L. (2017). *Análisis multitemporal de los cambios en los usos del suelo y su influencia en la oferta hídrica superficial en la microcuenca la Teneria del municipio de la playa de Belén norte de Santander.* (Tesis doctoral).
- Araque-Arellano, M., Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., y Ortiz, L. (2019). Cuencas hidrográficas.
- Arellano-Guerrón, S. L., Arroyo-Mera, D. M., Carrión-Albuja, E. A., y Merizalde Leiton, C. E. (2019). Geoparques mundiales de la UNESCO y su importancia en el desarrollo sostenible de las comunidades. Estudio de caso: "Geoparque Imbabura". *Siembra, 6(1)*, 93-108.

- Arteaga-Gutiérrez, J. A. (2020). *Análisis morfométrico y neotectónico en cuencas hidrográficas de los levantamientos Napo y Cutucú mediante modelos de elevación digital* (Tesis de pregrado, Quito, 2020.).
- Astínza, M., Cubero-Mora, L. P., y Posada-Arrubla, A. (2007). Agua y globalización: Tensiones y balances asociados al recurso hídrico en Ecuador: el caso de los páramos del Cantón de Quijos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 6(10), 39-51.
- Beltrán, K, S. Salgado, F. Cuesta, S. León, K. Romoleroux, E. Ortiz, A. Cárdenas, y Velástegui, A. (2009). “Sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador”.
- Borja-Escobar, C. D. (2020). *Análisis de la variabilidad espacio-temporal del índice de vegetación mejorado (EVI) y su relación con índices atmosféricos globales en el páramo ecuatoriano* (Tesis de pregrado, Quito, 2020.).
- Botana, M. I., y Fernández, S. E. (2019). Teledetección como experiencia de aprendizaje. In *XXI Jornadas de Geografía de la UNLP (La Plata, 9 al 11 de octubre de 2019)*.
- Bravo, J. D. (2000). *Breve introducción a la cartografía ya los sistemas de información geográfica (SIG)*. Ciemat.
- Bueno-Pérez, S. E., Marceleño-Flores, S., Nájera-González, O., y Mota, R. D. H. (2019). Implementación del método de escasez en la determinación de la huella hídrica en la zona costera de San Blas, México. *Tecnura*, 23(62), 45-54.
- Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96.
- Bustamante-Quintero, G. A. (2016). *Análisis Hidráulico E Hidrológico En El Sector De Saucos 6 Para Control De Inundaciones* (Tesis de pregrado, Universidad de Guayaquil: Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Carrera de Ingeniería Civil).
- Buytaert, W. (2017). Hidrología del páramo andino para medidas de conservación: 26.

- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., y Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Cuenca. Recuperado: http://www.paramo.org/files/hidrologia_paramo.pdf*.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., y Hofstede, R. (2008). *Impacto humano en la hidrología de los páramos Andinos*. Programa Interdisciplinario de Población y Desarrollo Local Sustentable, Cuenca (Ecuador).
- Cabrera, H., Garcés, M., y Paredes, P. (2012). Proyecto de desarrollo de capacidades para el uso seguro de aguas servidas en agricultura. *Producción de Aguas Servidas, Tratamiento y Uso en el Ecuador* (págs. 45-49).
- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*.
- Cáceres, L., Mejía, R., y Ontaneda, G. (1998). Evidencias del cambio climático en Ecuador. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3).
- Camacho-Ponce, O. (2020). Disponibilidad hídrica actual y futura en el oriente del Valle de México.
- Camargo, E. S. C., Barón, E. M. P., y Carreño, J. A. F. (2020). Desarrollo y extensión rural.: Estrategias para el fortalecimiento de la agricultura familiar campesina. *Libros Universidad Nacional Abierta ya Distancia*, 1-125.
- Carlosama-Angamarca, K. M., y Granda-Dávila, M. A. (2022). *Evaluación de escasez hídrica y estado de conservación de las vertientes de agua de consumo humano en la parroquia Angochagua* (Tesis de pregrado).
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., y Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30-47.
- Carrión-Damián, D. A. (2014). *Comparación de variables edafoclimáticas, en zonas de bosque y páramo utilizando modelo de interpolación kriging en la parroquia*

- Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo* (Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Castellanos, P. M. A., Pineda, E. L. Q., y Ortegón, y. A. C. (2020, June). Evaluation of simple space interpolation methods for the depth of precipitation: application for boyacá, colombia. In *2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)* (pp. 1-6). IEEE.
- Castillo, F. A. J. (2015). Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la NASA. *Enfoque UTE*, 6(4), 81-97.
- Castro, J. E., Kloster, K., y Torregrosa, M. L. (2004). Ciudadanía y gobernabilidad en México: el caso de la conflictividad y la participación social en torno a la gestión del agua. *El agua en México vista desde la academia*, 339 – 369.
- Cely, A. V. (1999). Metodología de los escenarios para estudios prospectivos. *Ingeniería e investigación*, (44), 26-35.
- Cerda, J., y Villarroel Del, L. U. I. S. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista chilena de pediatría*, 79(1), 54-58.
- Chinchilla, M., Mata, R., y Alvarado, A. (2011). Andisoles, Inceptisoles y Entisoles de la subcuenca del río Pirrís, región de los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35(1), 83-107.
- Cominelli, G. (2019). Estudio hidrológico y morfométrico de la cuenca del Arroyo Chirmay. In *XXI Jornadas de Geografía de la UNLP 9 al 11 de octubre de 2019 Ensenada, Argentina. Construyendo una Geografía Crítica y Transformadora: En defensa de la Ciencia y la Universidad Pública*. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Departamento de Geografía.
- CODA, Código Orgánico del Ambiente. (2017). Registro Oficial Suplemento 983 de 12-abr.-2017 Estado: Vigente.

- Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización COOTAD (2018).
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). Constitución De La República Del Ecuador.
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... y De 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.
- Cuasapud-Guadir, N. T. (2017). *Manejo y protección de fuentes de agua para consumo humano en la microcuenca del Tahuando, en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura* (Tesis de postgrado).
- Cuesta, C. F., y De Bievre, B. (2008). Páramo or northern Andes (Venezuela, Colombia, Ecuador, northern Perú). In *Temperate grasslands of South America. The world temperate grasslands conservation initiative workshop. Hohhot (China)* (pp. 3-11).
- Cueva-Toalombo, J., Caiza-Criollo, E., y Salguero, M. (2021). Valoración social económica ambiental de los incendios forestales. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 5(15), 226-231.
- Díaz-Bustos, J. P. E. (2017). Determinación de la disponibilidad hídrica superficial mediante balance hídrico en la Cuenca de Río Cumbaza-San Martín, 2016.
- Díaz-Granados-Ortiz, M. A., Navarrete-González, J. D., y Suárez-López, T. (2005). Páramos: hidrosistemas sensibles. *Revista de ingeniería*, (22), 64-75.
- Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., y Delgado-Fernández, M. E. (2019). Estimación Del Balance Hídrico De Una Cuenca Andina Tropical. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1), 56-69.
- Enríquez-Ruiz, M. G. (2018). *Valoración de la disponibilidad hídrica para la conservación de la reserva Sabia Esperanza, en la Microcuenca del río Mataquí* (Tesis de maestría).

- Escandón-Calderón, J., Ordóñez-Díaz, J. A. B., Nieto de Pascual-Pola, M. C. D. C., y Ordóñez-Díaz, M. D. J. (2018). Cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 27-53.
- Estrada M. (2021). Registro Nacional de Trabajos de Investigación: Modelamiento hidrológico e hidráulico para un sistema de alerta temprana en la quebrada Cashahuacra, distrito de Santa Eulalia.
- Falcones-Rodríguez, L., Palacios-Cabrera, T., y Jódar-Abellán, A. (2021). Simulación hidrológica de una microcuenca en Ecuador utilizando el modelo SWAT para determinar el comportamiento del recurso hídrico frente al cambio climático.
- GAD Angochagua, P. D. T. O. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Rural de Angochagua 2015.
- GAD Ibarra. (2020) Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Ibarra.
- García-Hernández, M. A., García-Hernández, M. A., Castellanos-Vargas, I., Cano-Santana, Z., y Peláez-Rocha, C. M. (2008). Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas inalterados. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 21-27.
- García, M. C., Piñeros-Botero, A., Bernal-Quiroga, F. A., y Ardila-Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64.
- Gil-Marín, J. A., Lozada-García, B. I., López-Pérez, N., Marquez, L., y Berardelli, G. (2012). Precipitation Regime Of Maturin, Monagas State, Venezuela.
- González, M. C., Saldarriaga, G. D. J., y Jaramillo, O. (2010). Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial.
- Gordillo-Ruiz, M. C., y Castillo-Santiago, M. A. (2017). Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(10), 39-49.
- Guerra-Amán, M. J. (2019). *Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la escorrentía en microcuencas que drenan los páramos del Ecuador* (Tesis de pregrado, Quito, 2019.).

- Guevara-Fiallos, J. C. (2019). *Plan integral de gestión de riesgos institucional para la Escuela de Ecoturismo, de la Facultad de Recursos Naturales de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* (Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Hidalgo-Proaño, M. (2017). Variabilidad climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. *CienciAmérica*, 6(2), 42-47.
- Horton, R. E. (1941). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity 1. *Soil science society of America journal*, 5(C), 399-417.
- Ibáñez-Asensio, S., Moreno-Ramón, H., y Gisbert-Blanquer, J. M. (2011). Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía.
- IpiALES-Arroyo, C. A. (2022). *Modelamiento del balance hídrico de la microcuenca del Río Ambi* (Tesis de pregrado).
- ITC. 1996. Drainage Pattern Analysis and Extraction of Hydrologic Properties from a Digital Elevation Model.
- Jácome, G., Mejía, J., Guerra, N., Romero, A., Piedmag, V., Padilla, C., y Pupiales, N. (2020). Los volcanes de Imbabura y su tiempo geológico. Imbabura, Ecuador.
- Jácome, G., Valarezo, C., y Yoo, C. (2018). Assessment of water quality monitoring for the optimal sensor placement in lake Yahuarcocha using pattern recognition techniques and geographical information systems. *Environmental monitoring and assessment*, 190(4), 1-15.
- Jaramillo, O., Gonzales, M., y Saldarriaga, G. (2010). Estimación de la demanda de agua. Conceptualización y dimensionamiento de la demanda hídrica sectorial. *Gestión y Ambiente*, (1), 175.
- Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hespings, M., Schoolmeester, T., y Verbist, K. (2019). *El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos: el impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. UNESCO Publishing.

- Joret, E. Q. (2008). *Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos* (Tesis doctoral, Universidad Autónoma del Estado de México).
- Landini, A. M., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agnes, D., y Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ciencia del suelo*, 25(2), 123-131.
- Landis, Jr y Koch, Gg (1977). La medición de la concordancia del observador para datos categóricos. *Biometría*.
- Lazo-Pillaga, L. R. (2014). *Evaluación de métodos de clasificación basados en píxeles y en objetos para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo a partir de imágenes satelitales Rapideye* (Tesis de postgrado, Universidad del Azuay).
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. (2014). Quito, Ecuador: Registro Oficial Suplemento 305.
- Llambí, L. (2012). Procesos de transformación de los territorios rurales latinoamericanos: los retos de la interdisciplinariedad. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, (3), 117-134.
- Llerena, C. (2003). Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas Foro Regional sobre Sistemas de Pago por Servicios Ambientales en Cuencas Hidrográficas Arequipa, Perú, 09-12 de junio 2003.
- López-Miñano, M. I. (2008). Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación de una cuenca mediterránea.
- López-Santos, A., Bueno-Hurtado, P., Arreola-Ávila, J. G., y Pérez-Salinas, J. E. (2017). Acciones para conservación de suelos identificadas mediante índices Kappa al noreste de Durango, México. *Agrociencia*, 51(6), 591-605.

- Lozano, P., Armas, A., y Machado, V. (2016). Estrategias para la conservación del ecosistema páramo en Pulinguí San Pablo y Chorrera Mirador, Ecuador. *Enfoque UTE*, 7(4), 55-70.
- Luis-Hernando, E., Gómez, J. E., Barrantes, V. J., y Limas, L. F. (2009). Efecto de actividades agropecuarias en las características del suelo en el páramo el granizo,(Cundinamarca-Colombia). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 12(2), 79-89.
- MAGAP. (2018). *Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca*. Quito, Ecuador.
- Martínez, A., Rodríguez, Z., y Duque, J. F. (2021, June). Estimación y análisis de la demanda hídrica de la subcuenca del Río Estibaná como parte del balance hídrico (2018-2019). In *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología–APANAC* (pp. 205-211).
- Martínez, R., Zambrano, E., Nieto, J. J., Hernández, J., y Costa, F. (2017). Evolución, vulnerabilidad e impactos económicos y sociales de El Niño 2015-2016 en América Latina. *Investigaciones Geográficas (España)*, (68), 65-78.
- Morales-Betancourt, J. A., y Estévez-Varón, J. V. (2006). El páramo:¿ ecosistema en vía de extinción? *Revista Luna Azul (On Line)*, 22.
- Morejón-Miranda, Y. M., Vega-Carreño, M. B., Escarré-Esteve, A., Peralta-Vital, J. L., Quintero-Silveiro, A., y González-Piedra, J. I. (2015). Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 94-108.
- Morocho, C. C., y Chunchu, G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71-83.
- Mosquera-Sabogal, T. A. (2019). Dinámica del agua en el suelo en Función del Manejo de la Paja de Caña Azúcar Mediante el Modelo Agroambiental Apsim.
- Muñoz-Arboleda, O. J. (2015). Análisis de los efectos del fenómeno climático de la niña en Colombia a la luz del actual modelo de gestión integral del riesgo.

- Murillo-Quijada, O. A. (2022). Implicancias del uso de bandas de elevación en un modelo hidrológico a macro-escala: aplicación en cuencas andinas de Chile central.
- Ortiz, M. A. D. G., González, J. D. N., y López, T. S. (2005). Páramos: Hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*.
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbagy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G., y Baeza, S. (2006). Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia Uruguay*, 10(2), 47-61.
- Paz, A. (2019). Ecuador: Páramos de los volcanes Chimborazo y Chalupas no soportan más presión. Recuperado de <https://es.mongabay.com/2019/04/paramos-ecuador-volcan-chimborazo-y-volcan-chalupas/>
- Pazmiño-Cuenca, A. F. (2010). *Variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones en zonas de montaña: Caso del volcán Antisana* (Tesis de pregrado, QUITO/EPN/2010).
- PDOT Angochagua. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. 2014*, 258.
- Peña, L. C. B., López, D. A. S., Cejudo, L. C. A., Santander, Á. P., Olavee, M. E. T., y Olivass, A. G. (2016). Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica en el acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua), mediante una evaluación espacial multi criterio. *Estudios territoriales en México: Percepción remota y sistemas de información espacial*, 339-362.
- Piccolo, A., y Mbagwu, J. S. C. (1994). Humic substances and surfactants effects on the stability of two tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 950-955.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J. L., y Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena*, 45(3), 185-207.
- Podwojewski, P. (1999). Los suelos de las altas tierras andinas: los páramos del Ecuador. *Bol Soc Ecuator Cie Suelo*, 18(9), 14.

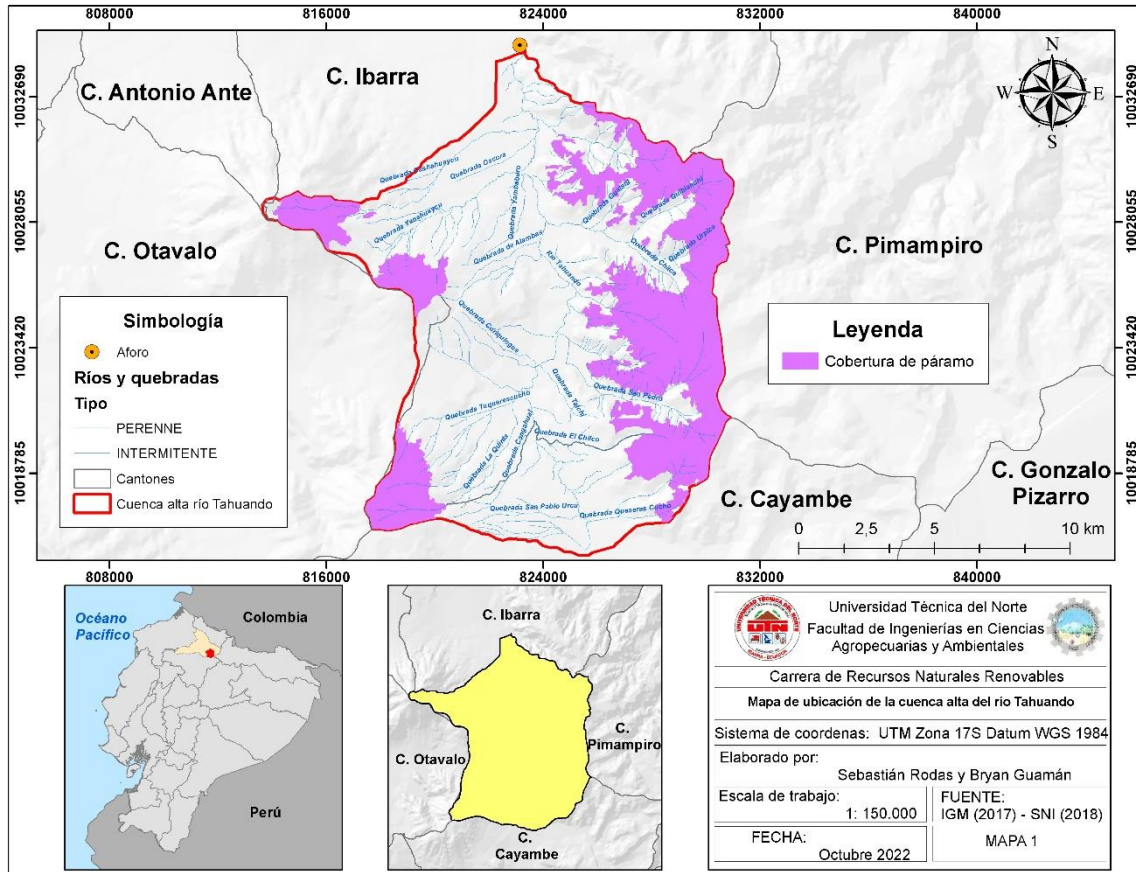
- Podwojewski, P., y Germain, N. (2005). Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *European journal of soil science*, 56(1), 39-51.
- Poma-Copa, M. P., y Usca-Tiuquinga, M. R. (2020). Estimación del balance hídrico climático (BHC) de las microcuencas del cantón Joya de los Sacha, Orellana. *Revista Científica FIPCAEC (Fomento de la investigación y publicación en Ciencias Administrativas, Económicas y Contables)*. ISSN: 2588-090X. *Polo de Capacitación, Investigación y Publicación (POCAIP)*, 5(5), 3-26.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., y Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138-153.
- Ramsar, C. O. P. (2008). Estrategia regional de conservación y uso sostenible de los humedales altoandinos. *Quito, Ecuador: Gobiernos de Ecuador y Chile, CONDESAN, TNC-Chile*.
- Reyes, B., Ríos-Ramírez, N., Cárdenas, A. Y., Andrade-Castañeda, H. J., Ibrahim, M. A., Jiménez Otárola, F., Sancho, F., Ramírez, E., y Woo, A. (2013). Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo del Ecuador.
- Rodríguez-Restrepo, V. J. (2022). ¿Cómo gerenciar un proyecto a través de la matriz Vester en planificación estratégica? Caso: explotación minera en Timbiquí (Cauca).
- Rodríguez, M. G., y González, M. P. (2010). Cartografía mediante imágenes landsat de suelos salinos en la tierra de Medina (Valladolid). *Estudios Geográficos*, 71(268), 161-176.
- Ruiz-Reyes, T. L. (2016). *Modelación cartográfico-hidrológica de la cuenca alta del río Tahuando para el manejo del recurso hídrico mediante herramientas SIG* (Tesis de pregrado).

- Ruiz-Suescún, O. A., Acosta-Jaramillo, J. J., y León-Peláez, J. D. (2005). Escorrentía superficial en bosques montanos naturales y plantados de Piedras Blancas, Antioquia (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2635-2650.
- Santillán-Gutiérrez, E., Dávila-Vázquez, G., Sánchez, J. D. A., y Díaz-Torres, J. D. J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. *Revista Ambiente & Agua*, 8, 104-117.
- Schmidt-Mumm, U., y Vargas Ríos, O. (2012). Comunidades vegetales de las transiciones terrestre-acuáticas del páramo de Chingaza, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 60(1), 35-64.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, (34-35), 13-30.
- Schosinsky, G., y Losilla, M. (2000). *Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual*. *Revista Geológica de América Central*, (23).
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). Plan de Creación de Oportunidades 2021 – 2025.
- Secretaría Nacional de Riesgos. (2020). Controlado incendio forestal en páramos de Zuleta – Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.
- SENAGUA. (2018). *Secretaría Nacional del Agua*. Quito, Ecuador.
- Serrano, S. M., Cuadrat-Prats, J. M., y Romo, A. (2005). Análisis estacional de la influencia climática sobre la variabilidad espacio-temporal del NDVI en el centro del valle del Ebro. *Revista de Teledetección*, 23, 51-64.
- Serrano, J. A. S. (2015). Trabajo en común, agricultura familiar y desarrollo rural: un trinomio interrelacionado, complementario y necesario en el campo español. *Entorno Geográfico*, (11).
- SNI. (2012). *Sistema Nacional de Información*. Quito, Ecuador.
- Takahashi, T., Ikeda, Y., Fujita, K., y Nanzyo, M. (2006). Effect of liming on organically complexed aluminum of nonallophanic Andosols from northeastern Japan. *Geoderma*, 130(1-2), 26-34.

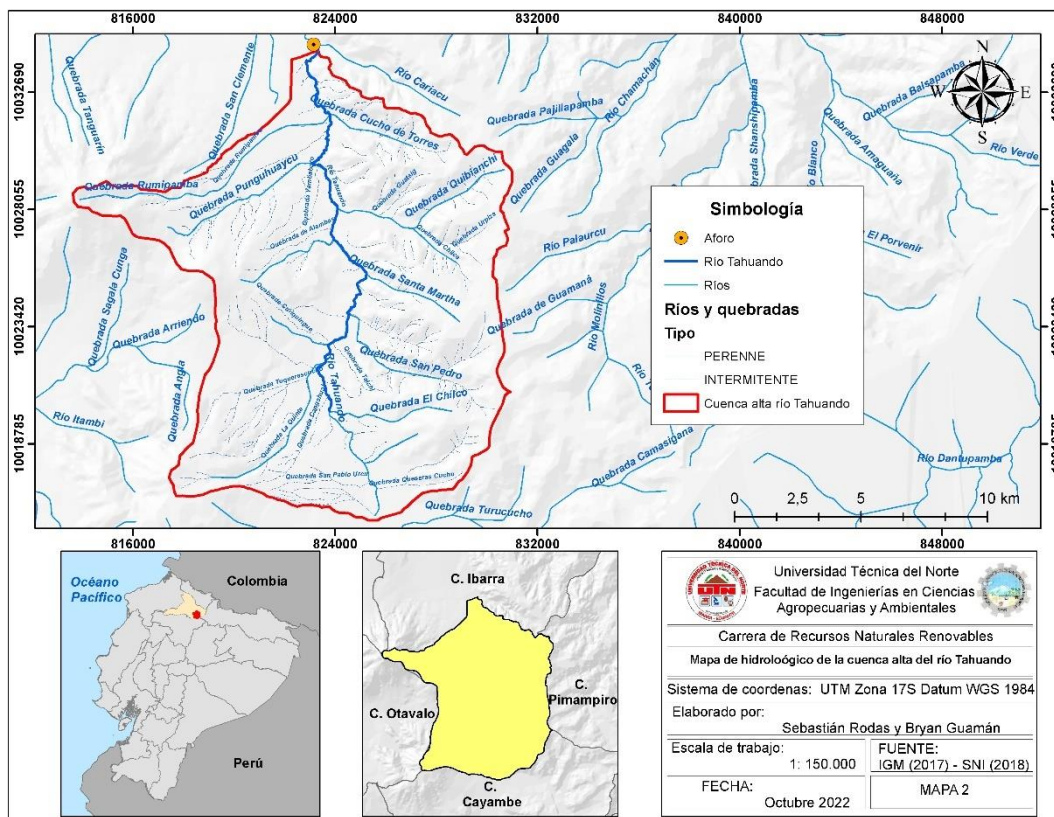
- Terán-Vinueza, B. F. (2021). *Plan de manejo ambiental para la cuenca alta del Río Tahuando, cantón Ibarra, provincia de Imbabura* (Tesis de postgrado).
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Tobón, C., Bruijnzeel, L. A., y Frumau, A. (2004, July). Physical and hydraulic properties of tropical montane cloud forest soils and their changes after conversion to pasture. In *Proceedings of the Second International Symposium: Science for Conserving and Managing Tropical Montane Cloud Forest*, Waimea, Hawaii.
- Tonneijck, F. H., Jansen, B., Nierop, K. G. J., Verstraten, J. M., Sevink, J., y De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61(3), 392-405.
- Torres-Romero, S. F., y Proaño-Santos, C. O. (2018). Componentes del balance hídrico en los páramos de Jatunsacha, Ecuador. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 28(2), 52-66.
- Torrico, M. A. T. (2011). Determinación de balances hídricos en microcuencas y subcuencas.
- Toro-Guerrero, F. J., Kretschmar, T., y Hinojosa-Corona, A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), 69-81.
- Tovar, C., Seijmonsbergen, A. C., y Duivenvoorden, J. F. (2014). Cambio en el uso del suelo/cobertura y los patrones de configuración espacial de la jalca peruana entre 1987 y 2007, avances en investigación para la conservación de los páramos andinos.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*,
- Uvidia-Zambrano, K. Y. (2020). *Análisis de la dinámica espacio temporal del índice de vegetación de diferencia normalizada (ndvi) y su relación con patrones climáticos*

- globales en el páramo ecuatorial entre el año 2001 y 2018* (Tesis de pregrado, Quito, 2020.).
- Vargas, K., y Téllez, J. M. (2019). La cuenca hidrográfica como unidad de planificación sostenible. *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 5(2).
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Diaz, J., ... y Alcántara, J. (2016). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Villacis-Quiñonez, P. L. (2014). *Balance hídrico de la microcuenca del río "Nila" cantón Buena Fe, provincia de Los Ríos* (Tesis de pregrado, Quevedo: UTEQ).
- Villarroel-Montano, E. (2021). *Caracterización de Procesos de Recarga Artificial de Acuíferos como medios para Conservar el Balance Hídrico en el Abanico de Punata* (Tesis doctoral).
- Yuste, J. C., Hereş, A. M., Ojeda, G., Paz, A., Pizano, C., García-Angulo, D., y Lasso, E. (2017). Soil heterotrophic CO₂ emissions from tropical high-elevation ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture fluctuations. *Soil Biology and Biochemistry*, 110, 8-11.
- Zamalloa, T. (2017). Los mapas parlantes, instrumento eficaz de diagnóstico, planificación y autoevaluación comunal. MARENASS. Perú.

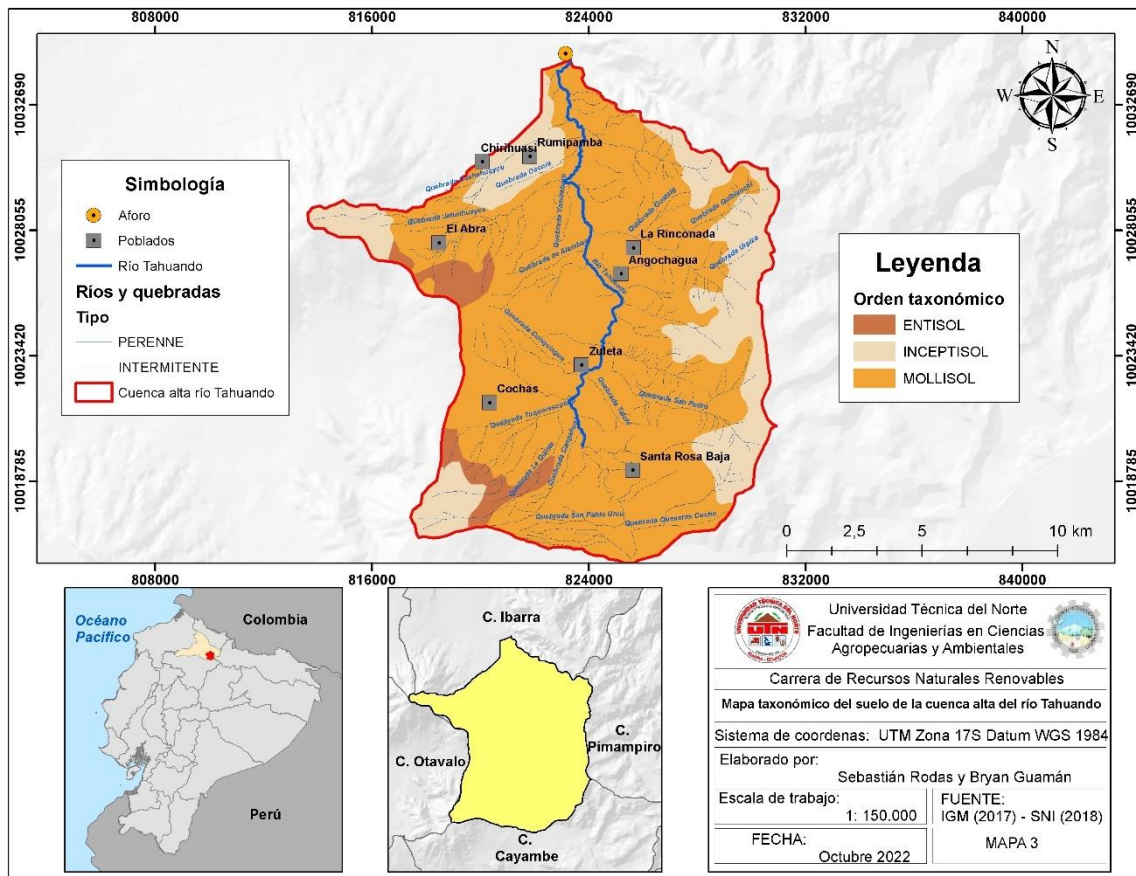
ANEXOS



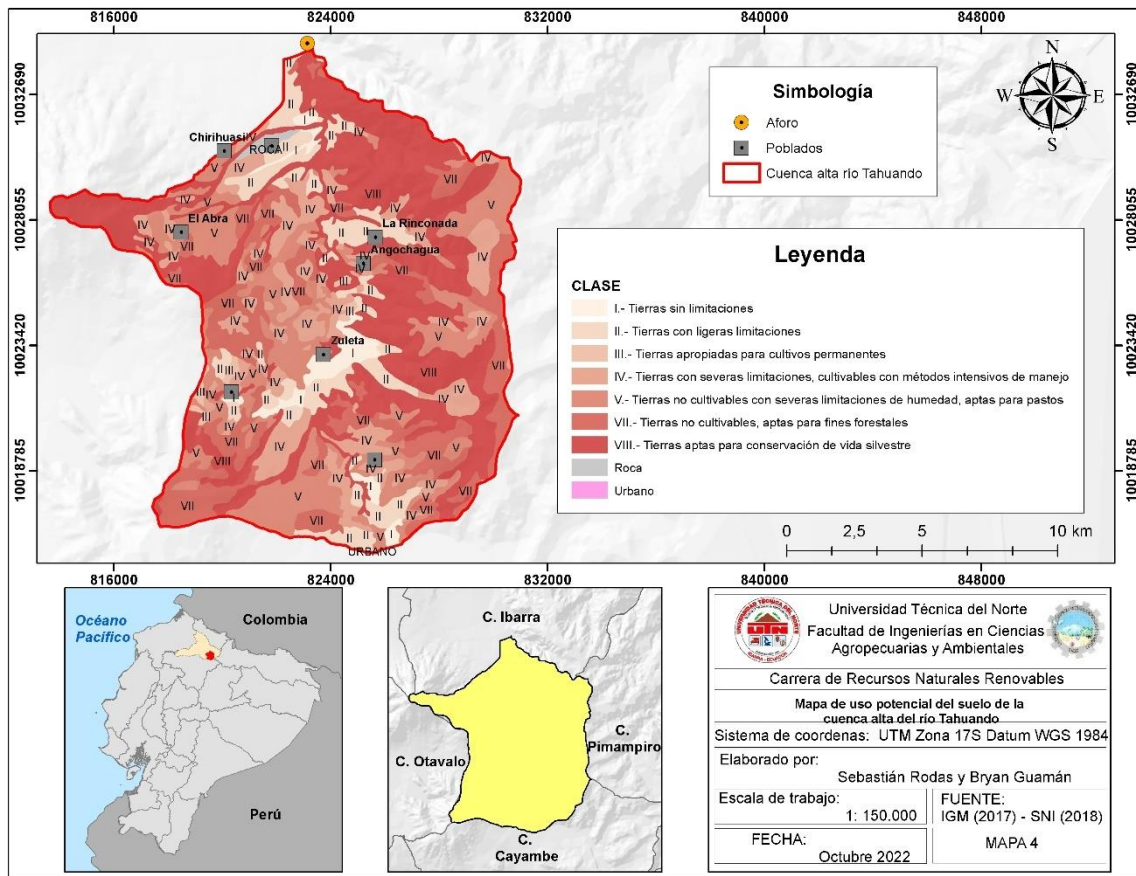
Anexo 1. Mapa de la ubicación del ecosistema páramo en la cuenca alta del río Tahuando



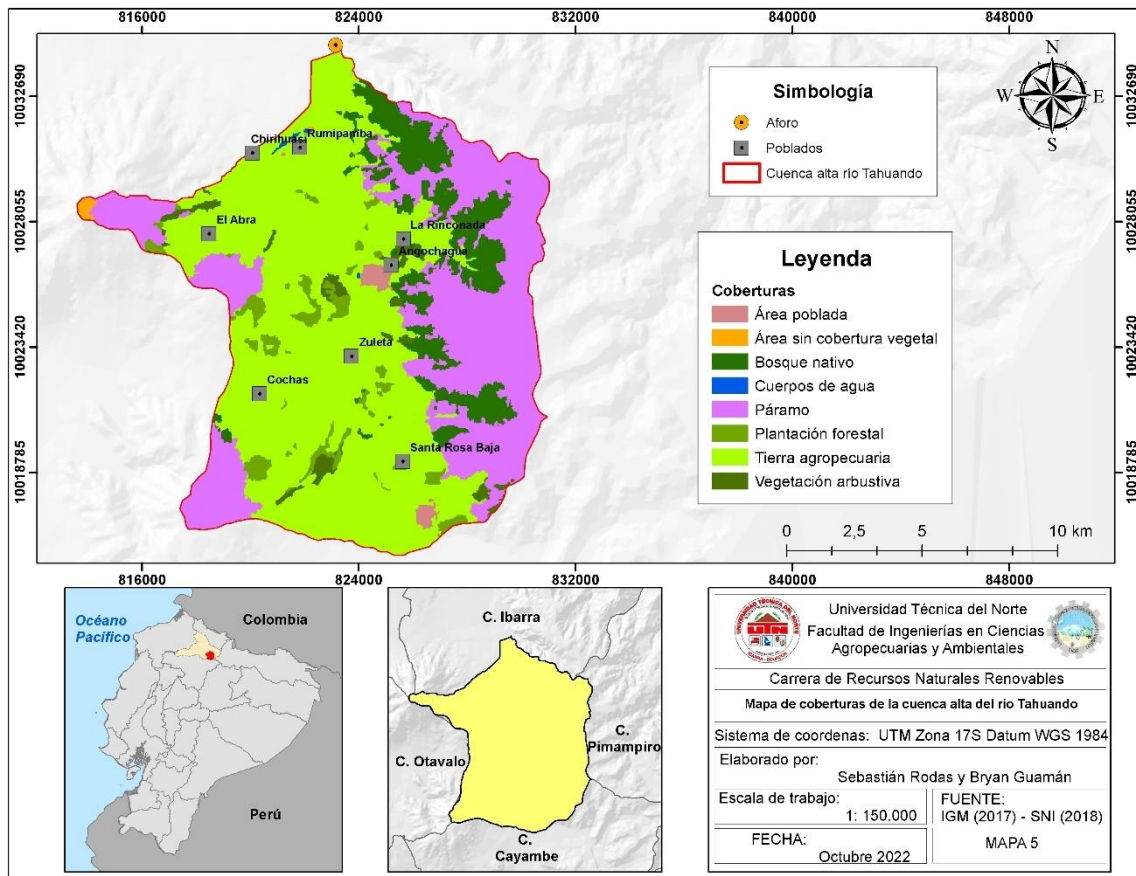
Anexo 2. Mapa hidrológico de la cuenca alta del río Tahuando



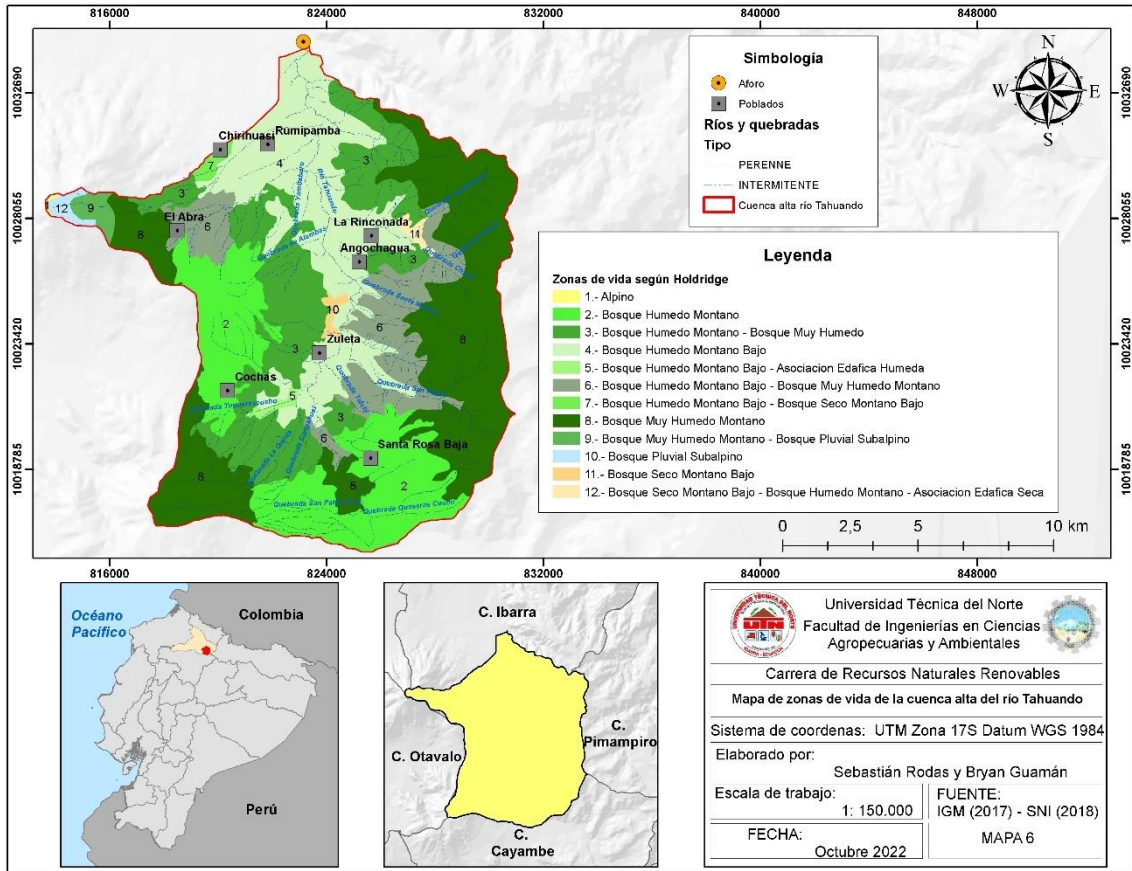
Anexo 3. Mapa taxonómico del suelo de la cuenca alta del río Tahuando



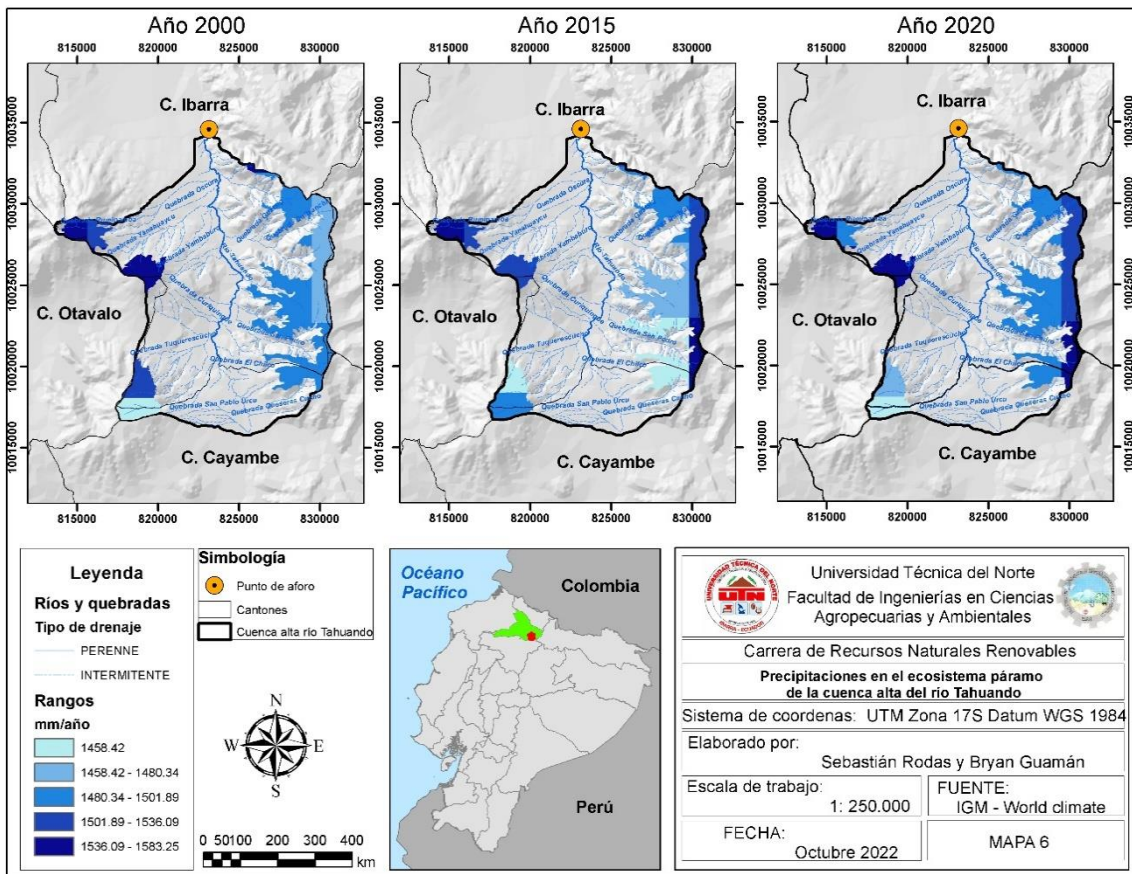
Anexo 4. Mapa de uso potencial del suelo de la cuenca alta del río Tahuando



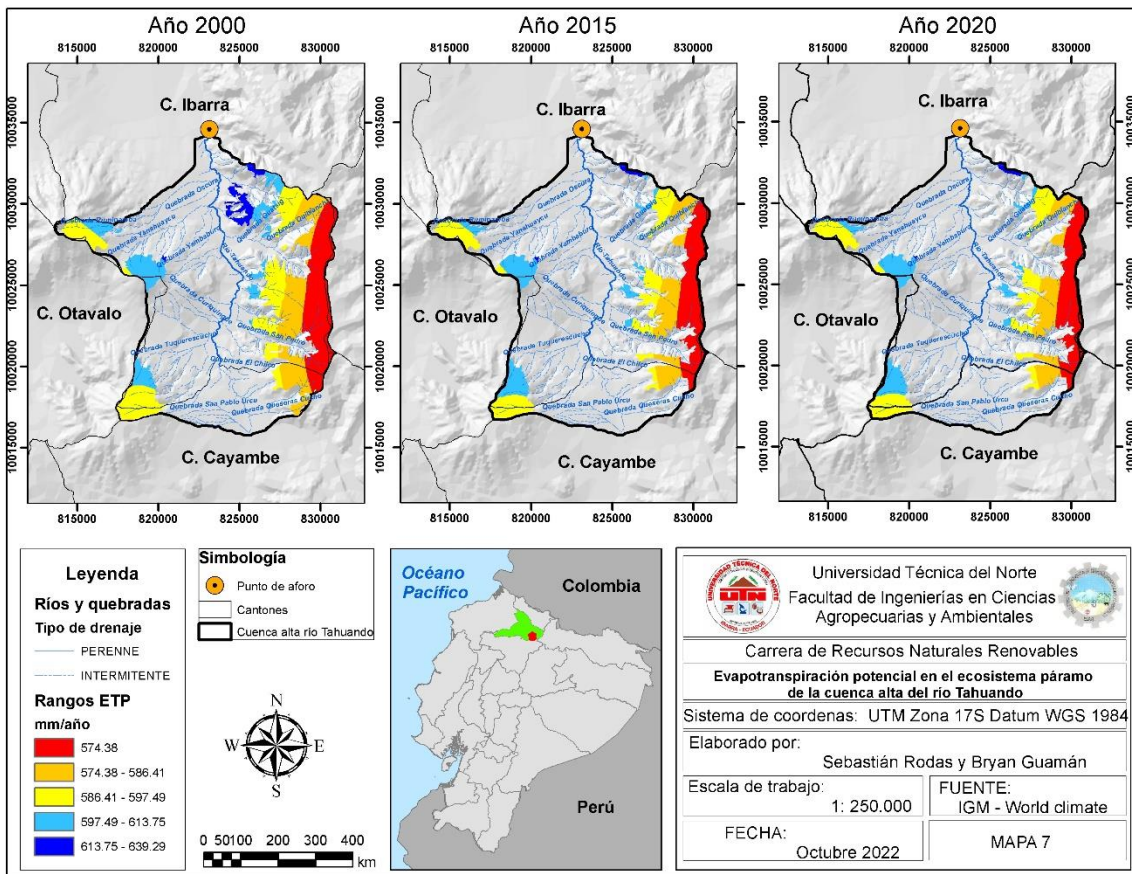
Anexo 5. Mapa de coberturas de la cuenca alta del río Tahuando



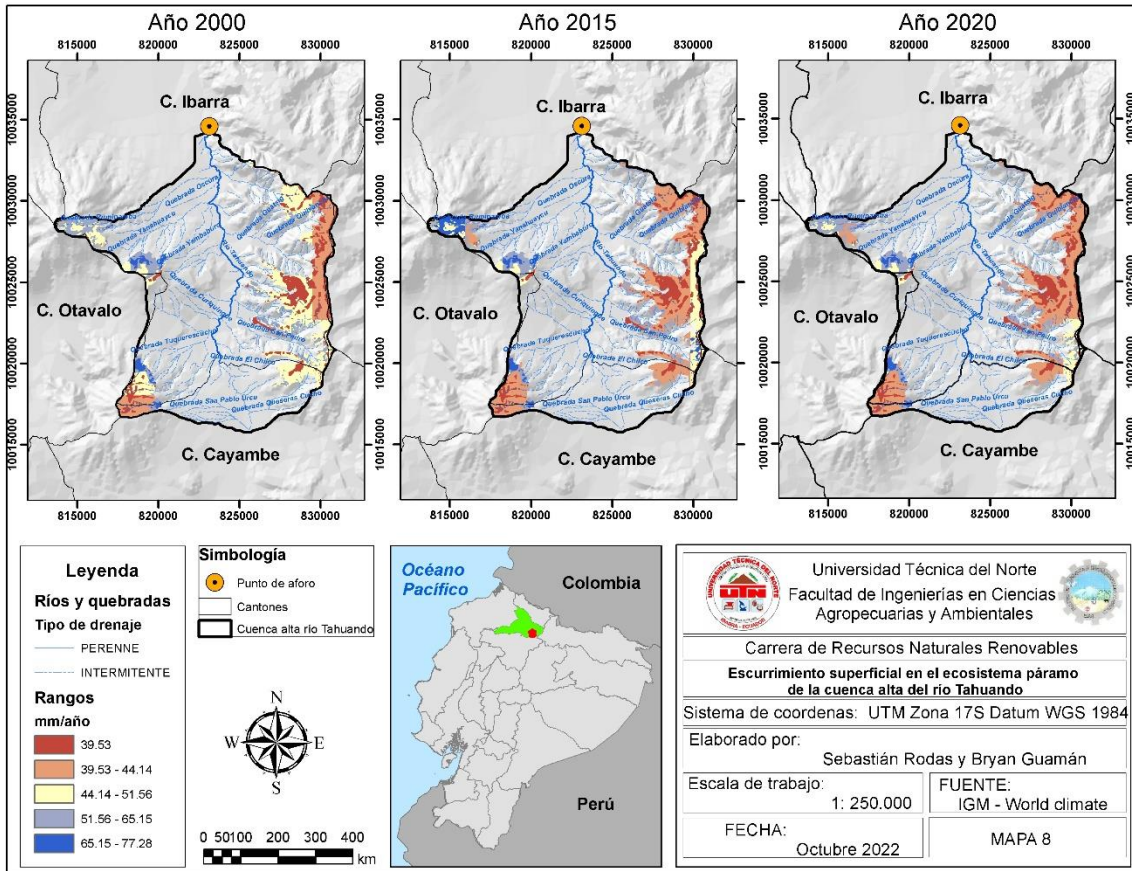
Anexo 6. Mapa de zonas de vida de la cuenca alta del río Tahuando



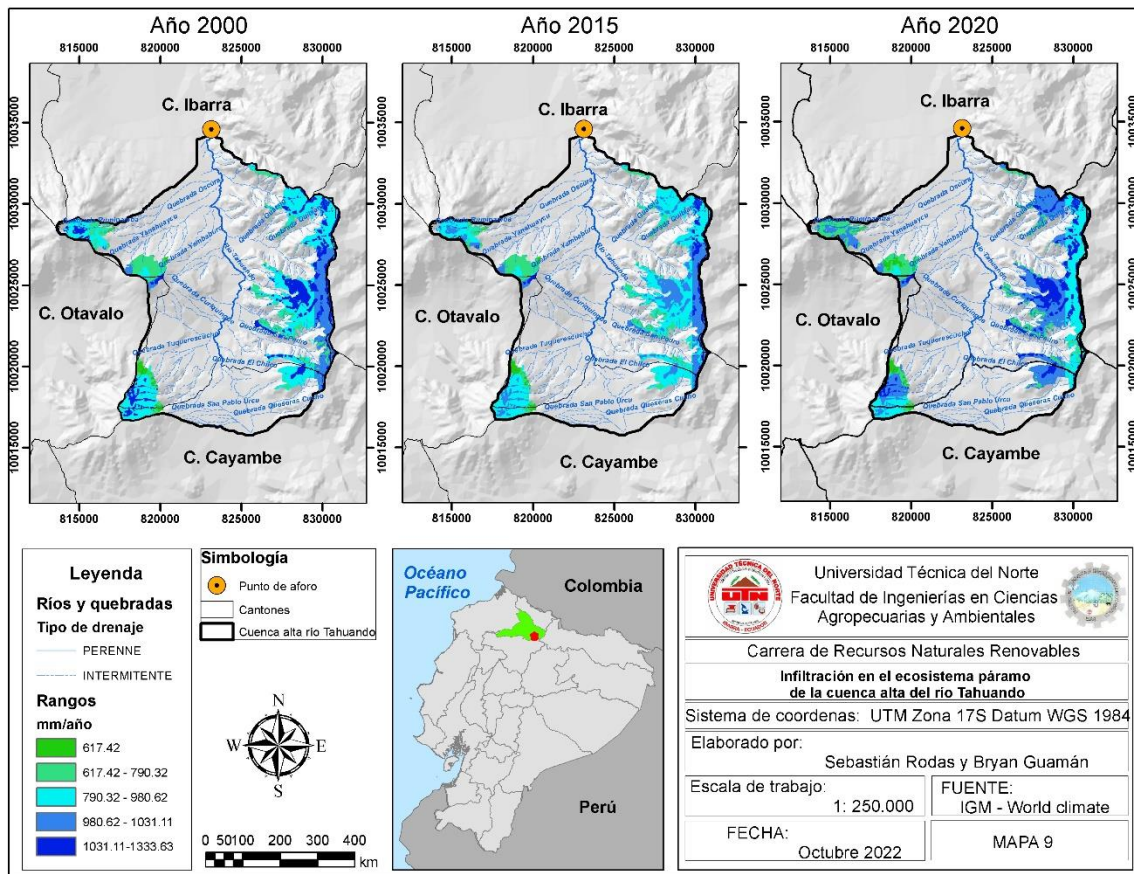
Anexo 7. Precipitaciones en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando



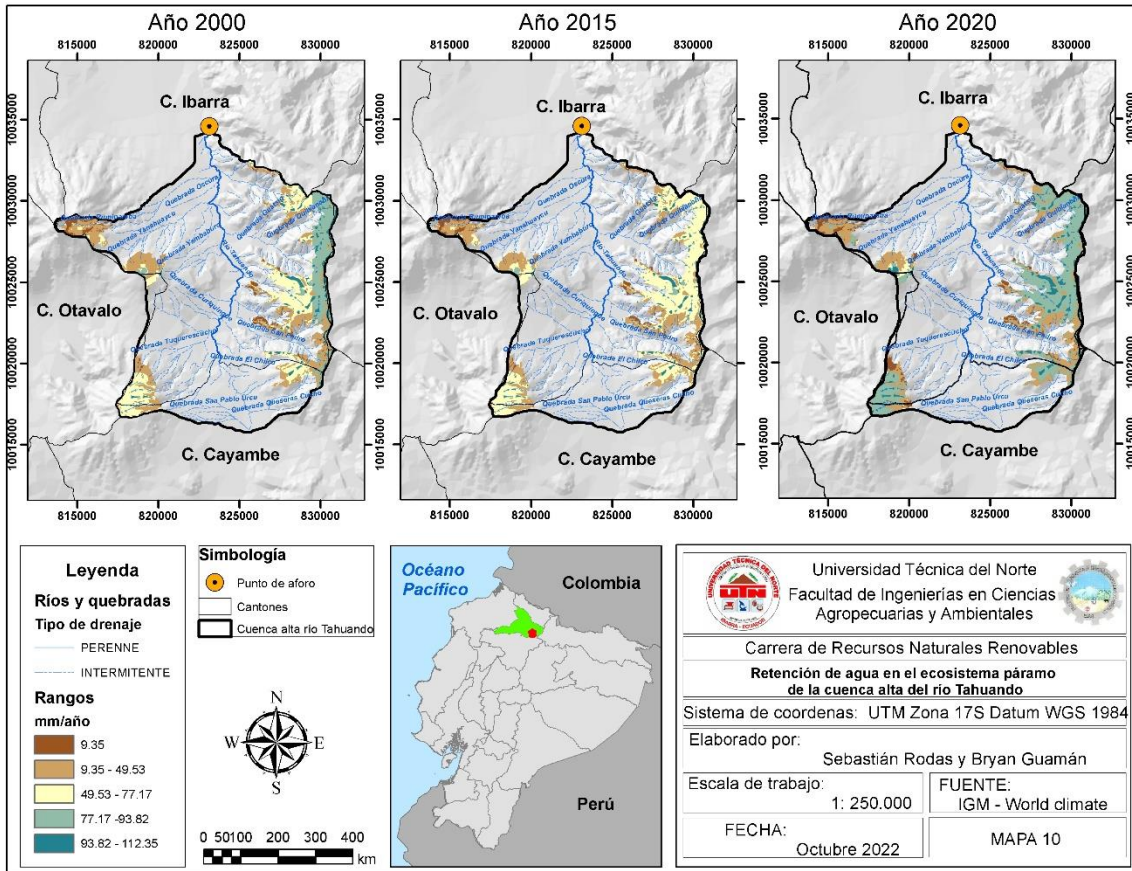
Anexo 8. Evapotranspiración potencial en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando



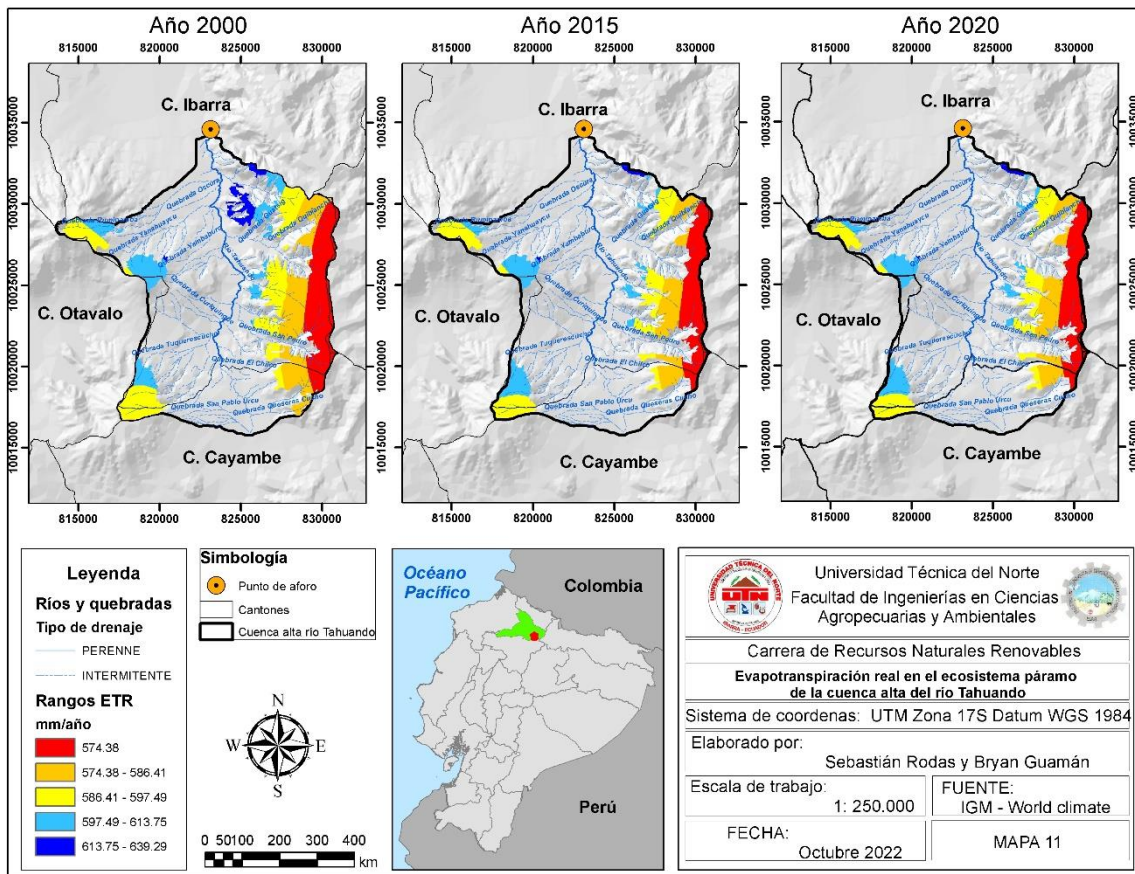
Anexo 9. Escorrentía en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuayo



Anexo 10. Precipitación efectiva (infiltración) en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando



Anexo 11. Retención de agua en el suelo en la cobertura de páramo en la cuenca alta del río Tahuando



Anexo 12. Evapotranspiración real en la cobertura de páramo de la cuenca alta del río Tahuando



Anexo 13. Aforo de caudal con el molinete MF Pro



Anexo 14. Toma de datos de caudal en época seca y lluviosa



Anexo 15. Socialización de las problemáticas con el personal técnico y los comuneros de Angochagua

Comportamiento de las variables													
Factores (mm) /Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Precipitación	97.63	121.00	156.75	177.63	177.54	58.12	28.09	22.73	74.67	35.42	220.48	82.21	1252.27
ETP	48.29	23.02	48.33	49.30	49.35	47.49	46.14	48.15	49.35	51.90	50.51	51.94	563.77
ETR	47.76	23.02	48.33	49.30	49.35	46.89	42.98	35.02	43.72	33.73	50.51	51.87	522.48
Pef	60.63	75.15	97.40	110.26	110.27	36.10	17.48	14.16	42.11	22.01	136.90	51.09	773.55
Escurrimiento	37.02	45.91	59.38	67.46	67.26	21.93	10.50	8.51	25.63	13.42	83.77	31.16	471.96
S	10.78	59.02	77.40	78.35	78.36	67.34	41.87	21.03	19.43	7.71	76.04	73.29	610.62

Anexo 16. Balance hídrico en el ecosistema páramo año 2000

Comportamiento de las variables													
Factores (mm) /Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Precipitación	97.53	108.16	144.50	195.47	170.58	243.95	250.31	8.22	14.13	280.91	209.43	94.27	1817.47
ETP	48.03	48.23	46.47	48.36	51.24	48.94	48.35	48.47	51.64	51.97	51.93	53.14	596.77
ETR	47.54	48.11	46.47	48.36	51.25	48.94	48.35	46.05	35.50	51.97	51.93	53.12	577.60
Pef	60.56	67.16	89.78	121.35	105.90	151.30	155.28	5.11	8.79	174.49	130.11	58.57	1128.39
Escorrimento	36.99	41.07	54.77	74.21	64.67	92.25	94.14	3.09	5.35	106.54	79.53	35.77	688.38
S	10.91	29.89	65.59	78.11	78.35	78.38	78.38	37.45	10.74	78.37	78.38	76.64	701.18

Anexo 17. Balance hídrico en el ecosistema páramo en el año 2015

Comportamiento de las variables													
Factores (mm) /Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Precipitación	115.31	103.51	150.31	175.30	118.59	96.03	138.60	73.36	80.19	71.01	197.09	109.33	1428.63
ETP	52.14	53.13	54.03	51.46	52.59	48.42	45.67	47.07	45.79	48.69	50.39	48.84	598.23
ETR	51.85	52.64	54.00	51.46	52.59	48.33	45.59	46.44	45.12	47.15	50.39	48.84	594.41
Pef	71.58	64.25	93.36	108.76	73.77	59.70	85.89	45.60	49.90	44.16	122.59	67.84	887.39
Escurrimiento	43.76	39.33	57.03	66.59	44.82	36.19	52.29	27.59	30.32	26.88	74.70	41.51	541.02
S	14.29	25.85	61.52	77.27	77.17	76.12	76.92	71.94	71.91	68.34	77.58	77.54	776.46

Anexo 18. Balance hídrico en el ecosistema páramo en el año 2020