



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO  
TAHUANDO, PARROQUIA ANGOCHAGUA – IBARRA.**

**AUTOR:**

**YÁNEZ JIMÉNEZ, MARLON JAVIER**

**DIRECTOR: PHD. MASABANDA CAISAGUANO, MARCO VINICIO.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**

# CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO TAHUANDO, PARROQUIA ANGOCHAGUA – IBARRA*” fue realizado por el señor *Yánez Jiménez, Marlon Javier* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de julio del 2019

Firma:

PHD. Masabanda Caisaguano, Marco Vinicio

C.C.: 1802179190

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Yánez Jiménez, Marlon Javier*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “*BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO TAHUANDO, PARROQUIA ANGOCHAGUA = IBARRA*” es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 23 de julio del 2019

Firma:

**Yánez Jiménez, Marlon Javier**

C.C.: 1726397324

## AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### AUTORIZACIÓN

Yo, *Yánez Jiménez, Marlon Javier*, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “*BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO TAHUANDO, PARROQUIA ANGOCHAGUA = IBARRA*” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 23 de julio del 2019

Firma:

---

**Yánez Jiménez, Marlon Javier**

C.C.: 1726397324

## DEDICATORIA

*A mis padres quienes me guiaron durante la trayectoria universitaria con su ejemplo dedicación y responsabilidad para que no solo cumpla mis metas, sino que busque hacerlas sobresalientes. El presente proyecto da inicio a una nueva etapa a mi vida como ser humano y muchas nuevas metas.*

*A mis hermanos a quienes siempre procure dar el mejor ejemplo afrontando con valor cada reto que se me ponía en frente, teniendo claro cuáles son las consecuencias de mis actos*

*A mis abuelitos quienes con sus palabras de apoyo incondicional siempre me apoyaron y me impulsaron a no darme por vencido*

*A Abdón Jiménez quien confiaba mucho en mi capacidad y habilidades esperando únicamente sin lugar a dudas ver finalizada esta etapa de mi vida para que pueda competir con muchos otros profesionales con mucha valentía y astucia, esperando lo mejor de mí siempre.*

*A mis amigos más cercanos quienes me han acompañado desde el Colegio y los que se han sumado durante el camino, por ese cariño sincero y esas palabras de apoyo que me han enseñado a valorar a las personas que realmente quieren estar a tu lado y verte feliz*

*A mi Colegio el cual me transmitió el mensaje “Ser más para servir mejor” con el cual obtuve diferentes interpretaciones durante la vida universitaria, pero sin embargo siempre me mostro el camino correcto de hacer las cosas.*

*Marlon Yáñez*

## AGRADECIMIENTO

*Mi más sincero agradecimiento*

*A mi director de tesis y maestro guía el PhD. Marco Masabanda*

*Por su apoyo, colaboración y tiempo brindado para el desarrollo y culminación de esta investigación.*

*A la Ing. Cecibel Campos, Ecopar*

*Por su paciencia, comprensión y tiempo para buscar las mejores soluciones para la investigación que me propuse a realizar*

*Al Ing. Luis Ordóñez y a la Ing. Diana Domínguez, Ecopar*

*Por proponer el acercamiento de la Junta Parroquial de Angochagua para la formulación y propuestas de proyectos entre las que se estableció el desarrollo de este proyecto de investigación*

*Al Biólogo Andrés Laguna, GAD de Angochagua*

*Por su apoyo en la logística de la fase de mediciones en campo*

*A mi Universidad y maestros por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y vivir todas las experiencias a lo largo de la carrera universitaria hasta convertirme en un profesional con calidad humana*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xviii</b>
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Descripción del área de estudio.....	3
1.2.1. Características topográficas .....	4
1.2.2. Áreas Naturales y Protegidas .....	6
1.2.3. Características climáticas.....	7
1.3. Antecedentes.....	9
1.4. Identificación y Planteamiento del Problema.....	11

1.5. Justificación e Importancia.....	12
1.6. Objetivos.....	14
1.6.1. Objetivo General.....	14
1.6.2. Objetivos Específicos.....	14
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>15</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1. Fundamento Teórico de teledetección para clasificación de imágenes satelitales .....	15
2.1.1. Resolución de un sistema sensor.....	15
2.1.1.1. Resolución espacial .....	15
2.1.1.2. Resolución espectral.....	16
2.1.1.3. Resolución radiométrica.....	16
2.1.1.4. Resolución temporal.....	17
2.1.2. Tratamiento digital.....	17
2.1.2.1. Correcciones radiométricas .....	18
2.1.2.2. Correcciones Geométricas.....	19
2.1.3. Constelación de satélites PlaneScopet e imágenes de alta resolución .....	21
2.1.3.1. Imágenes PlanetScope Nivel 3B .....	22
2.1.4. Clasificación digital .....	24
2.1.4.1. Clasificación supervisada.....	25



2.1.4.2.	Clasificación no supervisada.....	26
2.2.	Fundamento Teórico del Balance Hídrico.....	27
2.2.1.	Introducción al Balance Hídrico.....	27
2.2.2.	Ciclo Hidrológico.....	30
2.2.3.	Cuenca hidrográfica.....	32
2.2.3.1.	Cuencas naturales.....	33
2.2.3.2.	Cuencas en áreas rurales.....	33
2.2.3.3.	Cuencas hidrográficas urbanas.....	34
2.2.4.	Características fisiográficas de una cuenca hidrográfica.....	34
2.2.4.1.	Área de la cuenca.....	35
2.2.4.2.	Longitud del río principal.....	35
2.2.4.3.	Perfil longitudinal.....	35
2.2.4.4.	Pendiente de la cuenca.....	35
2.2.4.5.	Índices de forma.....	36
2.2.4.6.	Fator de forma ( <b>kf</b> ).....	36
2.2.4.7.	Coeficiente de circularidad o compacidad (Índice de Gravelius) ( <b>kc</b> ).....	37
2.2.4.8.	Densidades.....	38
2.2.4.9.	Densidad de drenaje (DD).....	38
2.2.4.10.	Densidad de corrientes.....	39

2.2.4.11.	Tiempo de concentración .....	39
2.2.4.12.	Orden de drenaje .....	40
2.2.4.13.	Pendiente media del cauce principal .....	40
2.2.4.14.	Lugar de descarga.....	41
2.2.4.15.	Sinuosidad .....	41
2.3.	Manejo adecuado de cuencas andinas y del recurso hídrico .....	41
2.3.1.	Estrés hídrico general de una cuenca hidrográfica .....	42
2.3.2.	Zonas con potencial de recarga hídrica.....	44
2.3.2.1.	Pendiente y microrrelieve.....	45
2.3.2.2.	Tipo de suelo .....	46
2.3.2.3.	Cobertura vegetal permanente.....	47
2.3.2.4.	Tipo de roca.....	47
2.3.2.5.	Uso del suelo .....	48
2.3.3.	Caudal de la cuenca .....	49
2.3.3.1.	Caudal Ambiental.....	50
2.4.	Hipótesis .....	50
2.5.	Caracterización de variables y equipos de monitoreo .....	50
2.5.1.	Precipitación .....	51
2.5.1.1.	Pluviómetros.....	51

2.5.1.2.	Instalación de un pluviómetro .....	52
2.5.1.3.	Cálculo de la precipitación media sobre una zona .....	53
2.5.2.	Evapotranspiración .....	53
2.5.2.1.	Método del Tanque evaporímetro .....	55
2.5.3.	Infiltración.....	56
2.5.4.	Escurrimiento .....	57
2.5.5.	Lisímetro .....	58
2.5.6.	Estación meteorológica.....	59
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>60</b>	
<b>3. MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>60</b>	
3.1.	Parámetros morfométricos.....	60
3.2.	Identificación de uso y cobertura de suelo .....	60
3.2.1.	Muestreo .....	61
3.2.2.	Preparación de la imagen satelital.....	62
3.2.3.	Clasificación y post clasificación de la imagen satelital.....	63
3.2.4.	Validación de resultados .....	64
3.3.	Cuantificación del balance hídrico con demanda natural.....	65
3.3.1.	Régimen de lluvia .....	66
3.3.2.	Régimen de evapotranspiración .....	67

3.3.3.	Régimen de infiltración.....	68
3.3.4.	Régimen de Escorrentía .....	68
3.3.5.	Caudal de la cuenca .....	69
3.3.6.	Zonas de recarga hídrica .....	69
3.3.7.	Balace hídrico con demanda natural .....	70
3.4.	Demanda Antrópica de agua e identificación de usos que tiene el recurso.....	70
3.4.1.	Estrés hídrico .....	71
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>73</b>	
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>73</b>	
4.1.	Resultados.....	73
4.1.1.	Parámetros morfométricos de la microcuenca .....	73
4.1.2.	Clasificación del Mapa de Uso y Cobertura del Suelo .....	75
4.1.3.	Zonas de Potencial Recarga Hídrica .....	77
4.1.4.	Precipitación .....	78
4.1.5.	Evapotranspiración .....	80
4.1.6.	Escorrentía .....	83
4.1.7.	Infiltración.....	86
4.1.8.	Balace hídrico .....	87
4.1.8.1.	Caudal de la cuenca.....	89

4.1.8.2.	Balance hídrico incluyendo la demanda antrópica y estrés de la cuenca.....	91
4.2.	Discusión de resultados .....	92
4.2.1.	Actualización de cartografía de uso y cobertura del suelo .....	92
4.2.2.	Balance hídrico .....	93
4.2.2.1.	Entradas .....	94
4.2.2.2.	Salidas naturales .....	94
4.2.2.3.	Caudal generado y salidas antrópicas.....	95
4.2.2.4.	Estrés hídrico.....	96
4.3.	Comprobación de hipótesis .....	97
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>.....</b>	<b>98</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>.....</b>	<b>98</b>
5.1.	Conclusiones.....	98
5.2.	Recomendaciones .....	99
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>.....</b>	<b>102</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Autorizaciones de la unidad hidrográfica Hidrográfica del Rio Tahuando</i> .....	2
<b>Tabla 2.</b> <i>Actividades productivas de la población económicamente activa</i> .....	4
<b>Tabla 3.</b> <i>Tipos de uso de suelo</i> .....	13
<b>Tabla 4.</b> <i>Constelación PlanetScope y Especificaciones del Sensor</i> .....	21
<b>Tabla 5.</b> <i>Niveles de procesamiento de las imágenes PlanetScope</i> .....	22
<b>Tabla 6.</b> <i>Atributos de las imágenes Orto-Escena PlanetScope</i> .....	23
<b>Tabla 7.</b> <i>Símbolos y unidades convencionales para un Balance Hídrico</i> .....	28
<b>Tabla 8.</b> <i>Rangos del área de la cuenca</i> .....	35
<b>Tabla 9.</b> <i>Rangos de pendientes</i> .....	36
<b>Tabla 10.</b> <i>Rangos del factor de forma</i> .....	37
<b>Tabla 11.</b> <i>Rangos de densidad de drenaje</i> .....	38
<b>Tabla 12.</b> <i>Potencial de recarga hídrica</i> .....	45
<b>Tabla 13.</b> <i>Potencial de recarga hídrica según su pendiente y relieve</i> .....	45
<b>Tabla 14.</b> <i>Potencial de recarga hídrica según su tipo de suelo</i> .....	46
<b>Tabla 15.</b> <i>Potencial de recarga hídrica según su tipo de cobertura vegetal permanente</i> .....	47
<b>Tabla 16.</b> <i>Potencial de recarga hídrica según su tipo de roca.</i> .....	48
<b>Tabla 17.</b> <i>Potencial de recarga hídrica según su el uso del suelo</i> .....	48
<b>Tabla 18.</b> <i>Coefficiente de cultivo bajo condiciones estándar</i> .....	54
<b>Tabla 19.</b> <i>Factor de conversión de ND a TOA</i> .....	63
<b>Tabla 20.</b> <i>Características de la cuenca</i> .....	73
<b>Tabla 21.</b> <i>Características del río Tahuando</i> .....	74

<b>Tabla 22.</b> <i>Mediciones de precipitación</i> .....	79
<b>Tabla 23.</b> <i>Mediciones de evapotranspiración</i> .....	81
<b>Tabla 24.</b> <i>Factores Atmosféricos</i> .....	83
<b>Tabla 25.</b> <i>Mediciones de escorrentía</i> .....	84
<b>Tabla 26.</b> <i>Coficiente de escorrentía calculado</i> .....	85
<b>Tabla 27.</b> <i>Mediciones de infiltración</i> .....	86
<b>Tabla 28.</b> <i>Balace hídrico con mediciones de campo</i> .....	88
<b>Tabla 29.</b> <i>Caudal promedio de la cuenca</i> .....	91
<b>Tabla 30.</b> <i>Balace hídrico incluida la demanda antrópica</i> .....	91
<b>Tabla 31.</b> <i>Registros de aforos</i> .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Ubicación de la Zona de Estudio. ....	3
<i>Figura 2.</i> Tipo de suelos. ....	5
<i>Figura 3.</i> Niveles de la cuenca Hidrográfica. ....	6
<i>Figura 4.</i> Áreas Naturales y Protegidas. ....	7
<i>Figura 5.</i> Tipo de Climas. ....	8
<i>Figura 6.</i> Mapa de precipitación media. ....	9
<i>Figura 7.</i> Longitud axial. ....	37
<i>Figura 8.</i> Orden de drenaje. ....	40
<i>Figura 9.</i> Pluviometro totalizador. ....	52
<i>Figura 10.</i> Puntos muestreados. ....	62
<i>Figura 11</i> Puntos de Comprobación. ....	65
<i>Figura 12</i> Ubicación de equipos. ....	66
<i>Figura 13</i> Meses de mayor precipitación y sequía. ....	67
<i>Figura 14.</i> Porcentaje de aprovechamiento de agua. ....	71
<i>Figura 15.</i> Ubicación de las autorizaciones de agua. ....	71
<i>Figura 16</i> Perfil del río Tahuando. ....	74
<i>Figura 17.</i> Curva hipsométrica de la cuenca. ....	75
<i>Figura 18.</i> Matriz de confusión. ....	76
<i>Figura 19.</i> Mapa de Uso de Suelo. ....	77
<i>Figura 20.</i> Zonas de Potencial Recarga Hídrica. ....	78
<i>Figura 21.</i> Régimen de precipitación. ....	80
<i>Figura 22.</i> Histograma del régimen de precipitación. ....	80



<b>Figura 23.</b> Régimen de evapotranspiración.....	82
<b>Figura 24.</b> Histograma del régimen de Evapotranspiración.....	82
<b>Figura 25.</b> Régimen de escorrentía.....	84
<b>Figura 26.</b> Histograma del régimen de Escorrentía.....	85
<b>Figura 27.</b> Régimen de infiltración. ....	87
<b>Figura 28.</b> Histograma del régimen de Infiltración.....	87
<b>Figura 29.</b> Mapa del Balance Hídrico. ....	89
<b>Figura 30.</b> Mapa del Balance Hídrico. ....	90
<b>Figura 31.</b> Mapa de estrés hídrico.....	92
<b>Figura 32.</b> Registros del caudal que ingresa en la planta de tratamiento de Guaraczapas. ....	96

## RESUMEN

La falta de información sobre producción y consumo de agua en la unidad hidrográfica del río Tahuando que se encuentra dentro de la Junta Parroquial Angochagua es fundamental para dar un manejo adecuado al recurso hídrico que se extrae en las concesiones sin causar presión principalmente sobre los ecosistemas que generan más agua. El estudio realizado en la mesocuenca evalúa la cantidad de agua generada en cada uno de los sistemas productivos. En la cuantificación de la oferta se instalaron pluviómetros en cada uno de los niveles de la unidad hidrográfica, para la demanda natural se instalaron evaporímetros y lisímetros, a partir de la cual se recolectó información del consumo de agua por cada especie vegetal representativa de los ecosistemas de estudio y la cantidad de caudal que se puede obtener de manera superficial y subsuperficial. En la validación de resultados se utilizó información de precipitación de la estación meteorológica M0105 de los años 2010 al 2015 más cercana y se calculó un caudal promedio aproximado que debería producir la cuenca. Una vez obtenido el caudal y espacializado de acuerdo a las zonas de potencial recarga hídrica de la unidad hidrográfica se empleó el modelo oferta demanda en el cual se obtuvo como resultado la disponibilidad hídrica actual. Finalmente se calculó el estrés hídrico en función de los lineamientos propuestos por la ONU en el documento “Agua limpia y saneamiento” en el 2018 con la información de las mediciones realizadas en campo y el caudal de consumo, obteniendo como resultado el estrés de acuerdo a los niveles de la mesocuenca

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ESTRÉS HÍDRICO**
- **ZONAS DE POTENCIAL RECARGA HÍDRICA**
- **BALANCE HÍDRICO**

## **ABSTRACT**

The absence of information about the production and consumption of water in the hydrographic unit of the Tahuando river that is located inside the Angochagua Parish is fundamental to give an adequate management to the water extracted without causing pressure on the ecosystems that generate this resource. The study made in the mesocuenca, evaluates the amount of water generated in each of the economic systems. For the quantification of the offer, pluviometers were installed in each level of the hydrographic unit, for the natural demand evaporimeters and lysimeters were installed. From this measuring equipments the information of consumption for each plant species was collected and the amount of flow that can be obtained in the soil superficially and subsuperficially. For the validation of the results, the meteorological information of the meteorological station M0105 from the years 2010 to 2015 was used for calculating an approximated flow. Once obtained the flow and the spatialized according to the zones of potential hydric recharge of the hydrographic unit. The offer demand model was employed to know the current water availability. Finally, the water stress was calculated in function of the guidelines proposed by the ONU in the document "Clean water and sanitation" in 2018 with the information registered in the equipments of measurements and the flow of consumption, obtaining as a result the stress of the mesocuenca levels

### **KEYWORDS:**

- **WATER STRESS**
- **POTENTIAL WATER RECHARGE ZONES**
- **WATER BALANCE**

## CAPITULO 1

### 1. ASPECTOS GENERALES

#### 1.1. Introducción

La información relacionada con la cuantificación de agua que generan los diferentes ecosistemas dentro de una cuenca hidrográfica es fundamental para tener presente en principio el manejo de este recurso y como beneficia al desarrollo los sistemas productivos actuales de los moradores de la zona, además es un indicador fundamental para el cambio climático al estar relacionado con el ciclo hidrológico y características meteorológicas recurrentes en la unidad hidrográfica (Carchi, 2015)

Actualmente los sistemas productivos existentes en la zona de estudio corresponden a zonas de páramo (1886.65 ha), bosque nativo (1442.73 ha), bosque plantado (979.03 ha), áreas de pastizal (1433.09 ha). En la parroquia se puede identificar zonas de protección con actividades turísticas, plantaciones forestales y áreas de producción ganadera los cuales son ecosistemas específicos en los que se enfoca este estudio, ya que corresponden a las mayores extensiones donde se da el intercambio del recurso hídrico (Sandoval H. , 2015).

La evaluación de la oferta y demanda natural dentro de la unidad hidrográfica es el primer paso al momento de realizar un estudio de Balance hídrico, ya que el abastecimiento del recurso estará definido en función de la capacidad de regulación hídrica de los ecosistemas presentes en la parte, alta media y baja de la cuenca hasta llegar al cauce principal y de las características atmosféricas. El rio Tahuando nace en las rinconadas orientales de la parroquia, a partir de la precipitación vertical y horizontal captada en ecosistemas presentes en la cuenca alta,

acumulándose hasta llegar a la cuenca baja y formar un cuerpo de agua, es por este motivo que los procesos hidrológicos que se dan en este sistema son de gran importancia para conocer el régimen hídrico y cuantificar la cantidad de agua que ofrece la cuenca al desarrollo de las actividades productivas de las comunidades de Angochagua (Carchi, 2015).

Además, para conocer el déficit o superávit de agua es importante tener en cuenta la demanda antrópica. Los usos consuntivos y no consuntivos registrados por la Secretaria Nacional del Agua dentro de la zona de estudio se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1.**

*Autorizaciones pertenecientes a la unidad Hidrográfica Hidrográfica del Rio Tahuando*

<b>Concesiones</b>	
<b>Uso</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
Riego	848,112
Consumo doméstico	594,462
Abrevadero	562,452
Piscícola	100

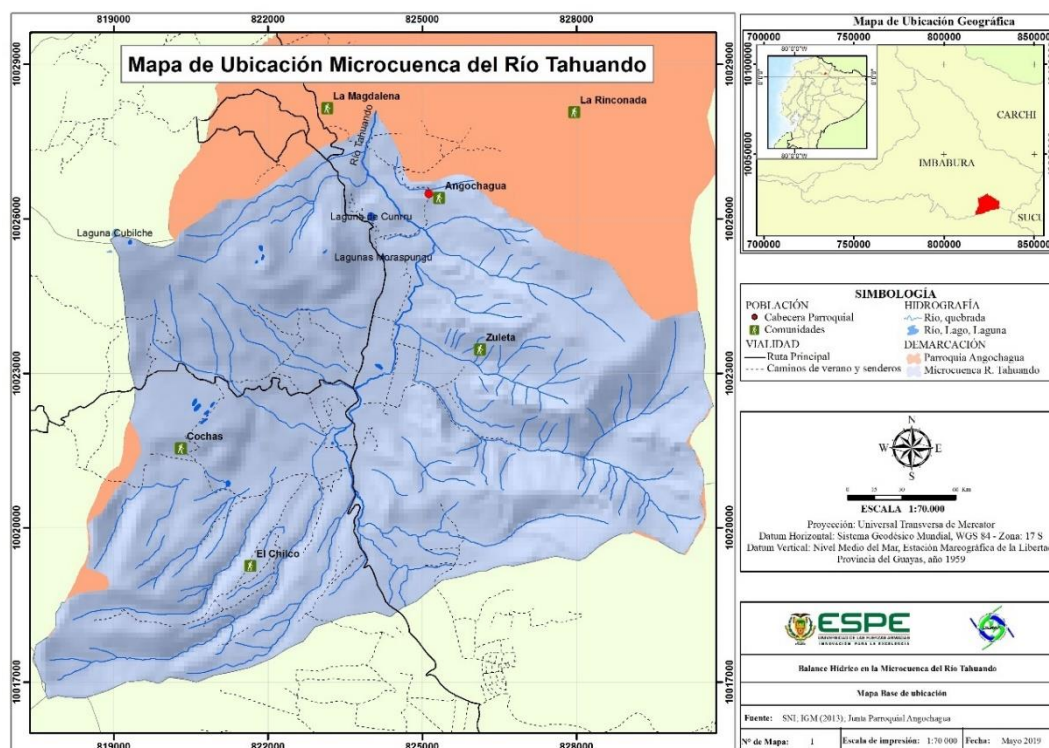
Fuente: “El banco de autorizaciones de la demarcación de Mira” (SENAGUA-Ibarra, 2018)

El nivel de estrés hídrico al cual este sometido cada nivel de esta cuenca estará dado en función de la cantidad de agua extraída de esa zona. A su vez, el estado actual de la unidad hidrográfica del río Tahuando está relacionado por el manejo de los niveles de cuenca y las zonas de potencial recarga hídrica, las cuales determinan los ingresos de agua y la capacidad de infiltración que tiene cada ecosistema. Para las salidas se debe tener en consideración el manejo de los ecosistemas de acuerdo a su ubicación y la capacidad de consumo por procesos de evaporación o transpiración de cada especie vegetal, y el volumen de caudal extraído para el manejo de los seres humanos. Las variables a evaluar para el balance hídrico en conjunto con las características morfométricas dan como resultado una evaluación de las condiciones a las que se encuentra sometido el régimen hídrico en esta zona y los posibles impactos que se

pueden generar debido al manejo que se le está dando.

## 1.2. Descripción del área de estudio

El presente proyecto de investigación se llevó a cabo en la cuenca del Río Tahuando perteneciente a la Junta parroquial de Angochagua. Abarca una superficie de 8899.49 ha y el río nace en la parte suroriental de la parroquia de Angochagua del cantón de Ibarra ubicado en la provincia de Imbabura, en la figura 1 se puede visualizar que Angochagua se encuentra limitada territorialmente al norte con la parroquia San Francisco, al Sur con Olmedo, al este con Mariano Acosta y al Oeste con San Pablo y La Esperanza. Esta cuenca colinda hidrográficamente de la siguiente manera: al norte con la quebrada Rinconada, al sur con las quebradas Arrayán y Verde Tola, al este con el río Pisque y al oeste con el río Itambi.



**Figura 1.** Ubicación de la Zona de Estudio.

Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

La parroquia rural de Angochagua al 2015 posee un total de 3017 habitantes con una tasa de

crecimiento del -1.59% de acuerdo a las proyecciones realizadas con datos del censo nacional del 2010. Las actividades productivas de la población económicamente activa de Angochagua se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.**

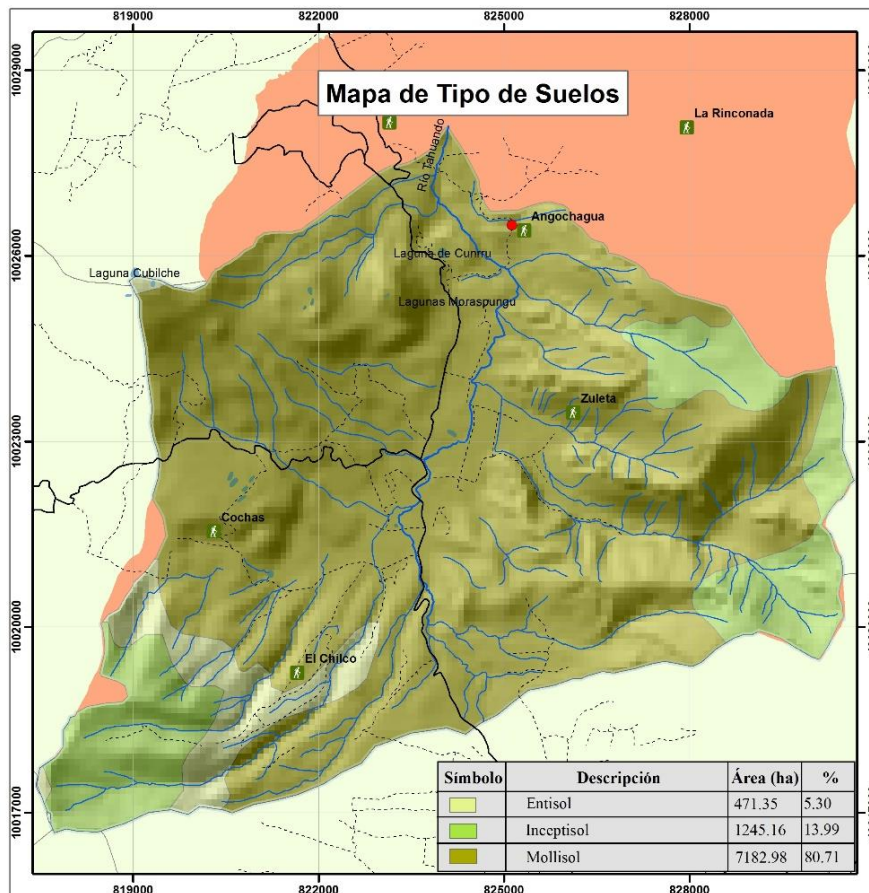
*Actividades productivas de la población económicamente activa*

<b>Población ocupada en:</b>	
<b>Actividades</b>	<b>Porcentaje de habitantes (%)</b>
Agricultura, silvicultura caza y pesca	42.50
Manufactura	11.38
Comercio	3.35
Sector público	3.61

Fuente: “Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Angochagua” (Sandoval H. , 2015)

### **1.2.1. Características topográficas**

La topografía del terreno es una de las características más relevantes para generar mayor acumulación en los flujos de los cuerpos de agua por medio de la escorrentía superficial y subsuperficial en la zona de estudio. El tipo de pendientes de la cuenca varía entre plana a extremadamente empinada en suelos de orden entisol (471.35 ha), plano a quebradas en suelos de orden inceptisol (1245.16 ha) y en molisoles se presenta una topografía que varía entre ligeramente inclinado a extremadamente empinado (7182.98 ha) (Sandoval H. , 2015). El mapa de suelos de acuerdo a las características topográficas se presenta en la figura 2



**Figura 2.** Tipo de suelos.

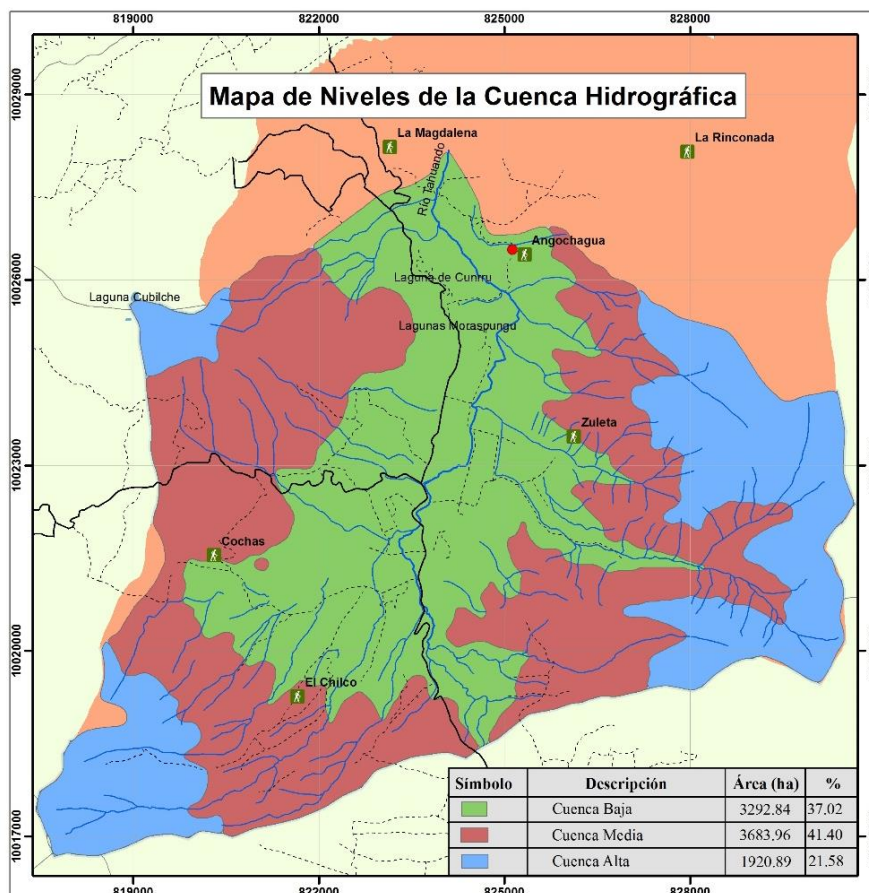
Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

De acuerdo al nivel altitudinal la cuenca del rio Tahuando se encuentra dividida en tres partes:

- Cuenca alta: 3527 a 3954 msnm, con una cobertura de 1920.89 ha que corresponde al 21.58% del territorio
- Cuenca media: 3100 a 3526 msnm, con una cobertura de 3683.96 ha que corresponde al 41.40% del territorio
- Cuenca Baja: 2672 a 3099 msnm, con una cobertura de 3292.84 ha que corresponde al 37.02% del territorio

Los tres niveles de la cuenca se encuentran en la figura 3



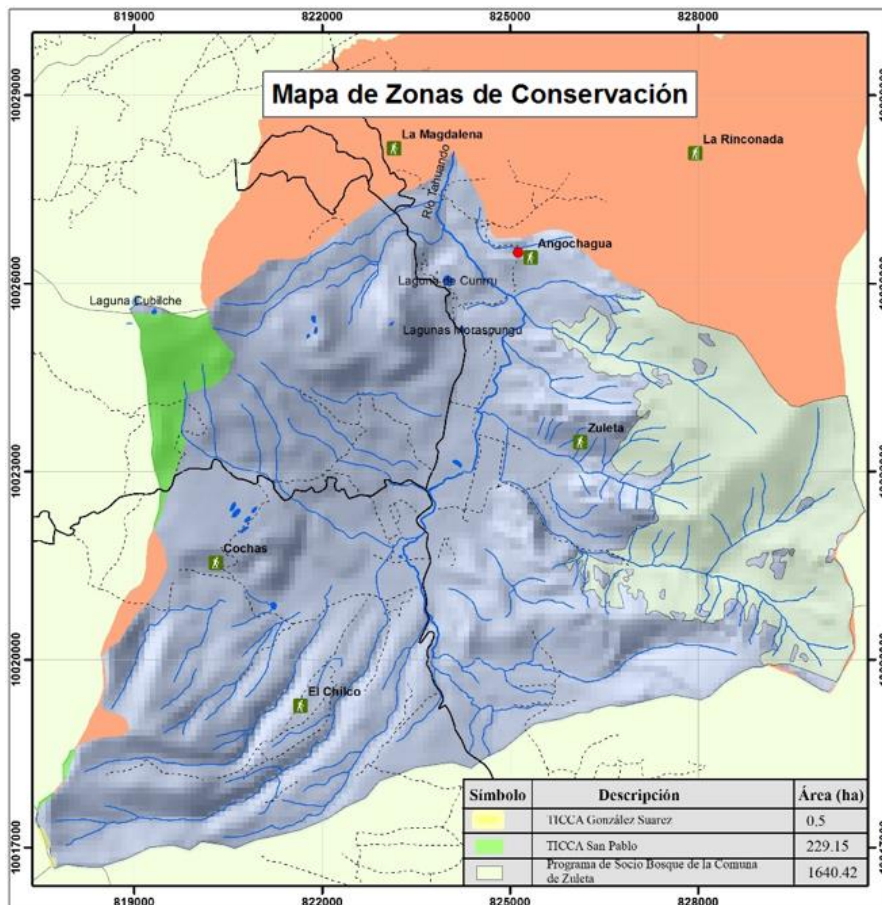


**Figura 3.** Niveles de la cuenca Hidrográfica.  
Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

### 1.2.2. Áreas Naturales y Protegidas

Las zonas de conservación que se encuentran presentes en la parroquia pertenecen al programa de socio bosque (PSB) denominado “Zuleta” con una superficie de 1640.42 ha, otra parte del territorio se encuentra en las áreas conservadas por pueblos indígenas y comunidades locales (TICCAS) correspondientes a González Suarez con una superficie de 0.5 ha y San Pablo con 229.15 ha, los cuales son ecosistemas naturales con valores de conservación de biodiversidad representativos de la zona, contribuyendo a la conservación genética y de gran importancia en cuanto a servicios ambientales del recurso hídrico y captura de carbono. Estas

áreas ecológicas se encuentran ubicadas en ecosistemas de páramo y corresponden a zonas de gran importancia al ser los proveedores de los servicios ambientales. Además, cada uno de los ecosistemas provee a los moradores de la parroquia con servicios como: alimento, materias primas, medicina, provisión de agua de consumo doméstico y riego, regulación del clima, belleza escénica, recreación, ciencia y educación. El mapa de las Zonas de Conservación se presenta en la figura 4

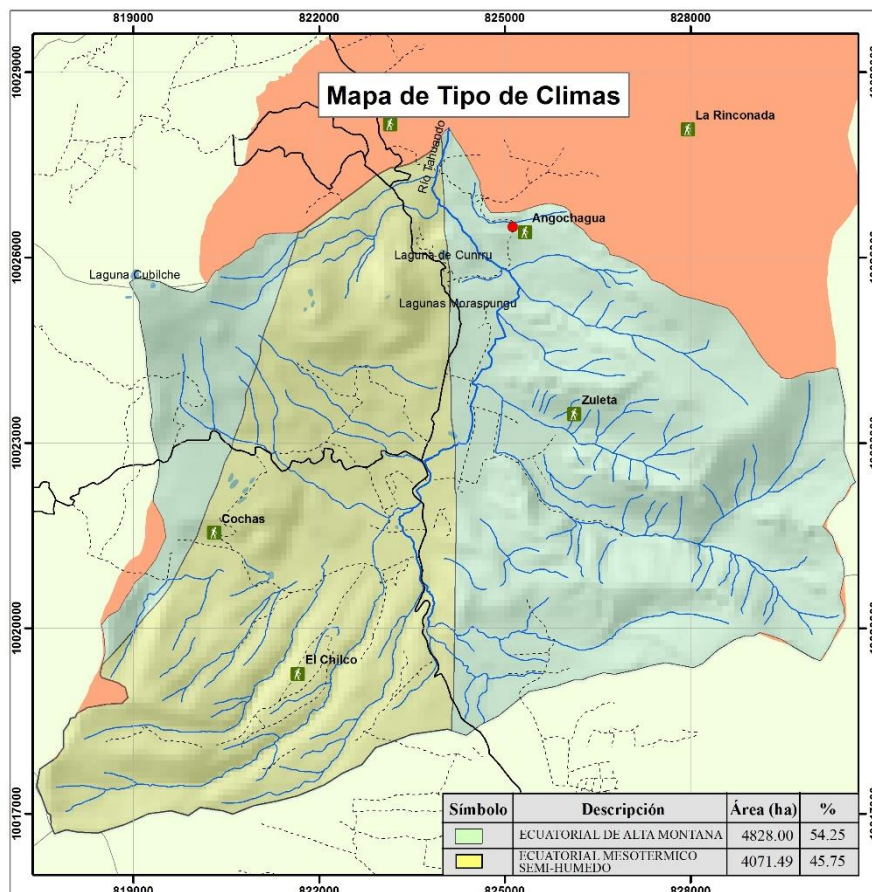


**Figura 4.** Áreas Naturales y Protegidas.

Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

### 1.2.3. Características climáticas

Los tipos de climas dependen de la altura a la que se encuentre, dentro de la cuenca se existen los siguientes: en las partes más altas se tiene un clima ecuatorial de alta montaña mientras que las zonas bajas poseen un clima ecuatorial mesotérmico semihúmedo. El mapa del tipo de climas se presenta en la figura 5

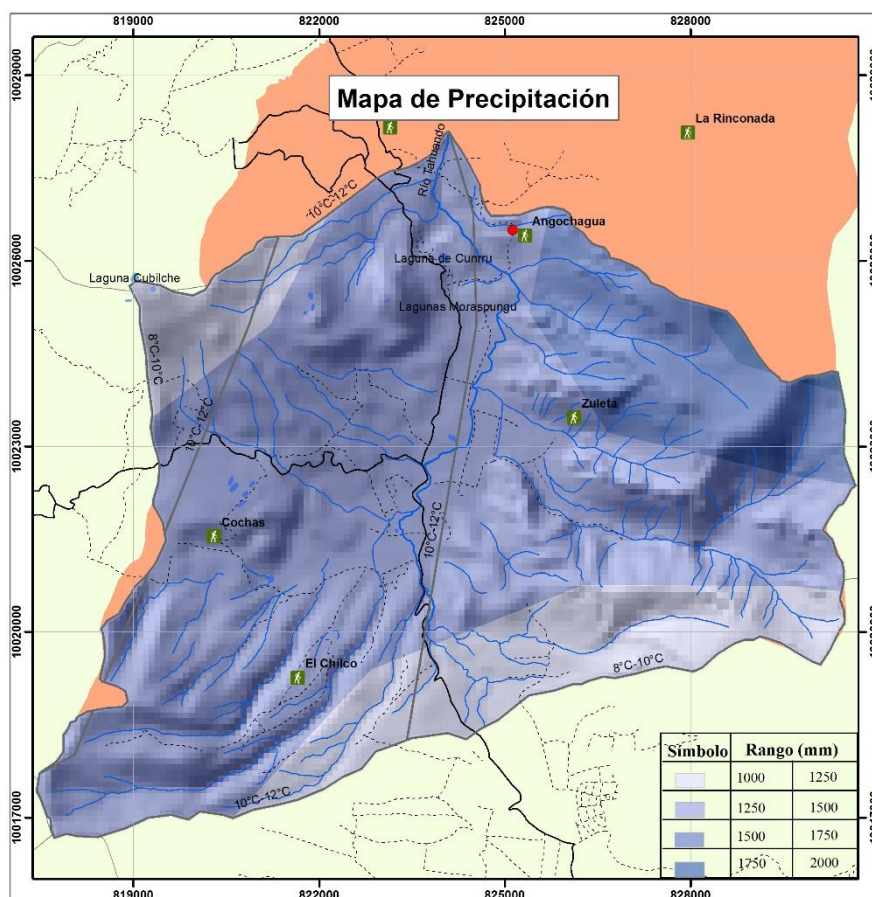


**Figura 5.** Tipo de Climas.

Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

En cuanto a la precipitación y temperatura, oscilan entre los 1000 mm a 2000 mm y los 10 °C a 16 °C teniendo como época de lluvias los meses de febrero a mayo en las que se cuenta con la presencia de frecuentes neblinas (precipitación horizontal) además de lluvias (precipitación vertical), y de menor precipitación de octubre a enero. El mapa de precipitación

se presenta en la figura 6



**Figura 6.** Mapa de precipitación media.

Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

### 1.3. Antecedentes

La parroquia Angochagua es contemplada por su riqueza turística y cultural, así como también por sus valores escénicos, hidrológicos y biológicos, esta parroquia rural se caracteriza por la abundante existencia de páramo, el cual es un ecosistema con la función de retención y regulación hídrica que mediante su vegetación y suelo, cumple una función similar al de una almohadilla, ya que absorbe gran cantidad de agua, la importancia de este ecosistema está en el papel que desempeña en la sostenibilidad, ya que dota del recurso hídrico a la población de la zona y de sus sectores aledaños. Esta parroquia se encuentra dentro de la cuenca del Río

Mira, de la cual uno de las unidades hidrográficas aportantes es la microcuenca del Río Tahuando (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016).

En el Plan de Manejo de Microcuencas del GADPR Angochagua del 2016, se estableció que se le da una mayor superficie al uso de la tierra del sector agropecuario que cubre una superficie de 3265 ha, correspondiente al (39,4%), seguido del páramo andino con 3265 ha que representa el (27,7%) y finalmente el bosque nativo y sembrado que cubre 2817 ha, que constituye el (24%) (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016).

Hace diez años con la concienciación de la población y el apoyo por parte de diferentes organizaciones y autoridades tanto nacionales como internacionales, se realizaron estudios para identificar el aporte de los servicios ambientales que podía ofertar la parroquia, dentro de estos se estableció la protección y conservación del páramo, debido a que era una prioridad por sus particularidades de regulación hídrica; y de la misma manera se resolvió trabajar en proyectos que apoyen a la conservación, protección y manejo de ecosistemas dentro del territorio (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016).

En la parroquia uno de los enfoques principales es el tema del agua, en el Plan de Manejo para Microcuencas de la parroquia Angochagua elaborado en el 2016, se realiza una propuesta de regulación de usos por zona de la parroquia, donde se indica que el páramo conservado y reforestado debe ser monitoreado y corresponden a zonas de protección absoluta, con el fin de establecer acciones de protección, mediante mecanismos acordados con el Municipio local y otras entidades que colaboren con su ejecución de manera sustentable (Sandoval H. , 2015).

Según el INAMHI, la precipitación de la parroquia oscila entre 700 mm y 1500 mm, contando con meses de mayor lluvia y de sequias y precisamente durante los últimos años la parroquia ha sido víctima de fuertes sequias limitando la producción agropecuaria, es por eso

que el riesgo de déficit de agua corresponde una preocupación de los pobladores también se interesa las autoridades por generar información para proponer un proyecto de mitigación de sequías, y para el conocimiento del manejo actual de los recursos naturales de estas comunidad (Sandoval H. , 2015).

#### **1.4. Identificación y Planteamiento del Problema**

El balance hídrico se considera un requisito indispensable para la gestión integral del agua de un territorio (Laporte, 2012), el cual sirve para impulsar el manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos, suelo y naturales que se encuentren relacionados, con el propósito de mejorar la calidad de vida, el bienestar social y económico de un territorio (Organización Meteorológica Mundial, 2014).

En la parroquia rural de Angochagua se encuentra la microcuenca del Río Tahuando, que cubre una superficie correspondiente al 64,79% del territorio, la parroquia con el fin de dar soluciones a las problemáticas relacionadas al recurso hídrico tomó la iniciativa de realizar un balance hídrico en función del uso del suelo de la zona: tierra agropecuaria, páramo andino, bosque nativo y sembrado para mejorar las condiciones de uso actuales del recurso, la calidad de vida de los moradores de la zona y en general del ambiente (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016). La información actual del ciclo hidrológico en cada una de las coberturas y su regulación es escasa, ya que no existen estudios sobre el manejo de los caudales superficiales ni subterráneos para esta microcuenca (García, 2017).

Específicamente en la zona de estudio la principal problemática se presenta en época de verano durante la cual existe escases de agua por lo que es necesario tener una cuantificación de las reservas que se generan en la temporada de lluvia como una herramienta de negociación para desarrollar proyectos relacionados con la gestión integrada de la microcuenca, impulsando

los procesos productivos y de aprovechamiento de este recurso (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016). La posible solución a la problemática presentada es realizar un estudio de Balance hídrico cuantificando la oferta y evaluando la demanda hídrica mediante técnicas de medición directas durante la época de lluvia para conocer la capacidad de almacenamiento de los ecosistemas en unidades de volumen de agua con la que cuenta la parroquia para el desarrollo de sus actividades productivas

### **1.5. Justificación e Importancia**

La parroquia de Angochagua busca mejorar el manejo del agua perteneciente a la microcuenca del Río Tahuando y de todos sus afluentes directos, ya que es uno de los cuerpos de agua aportantes dentro de la demarcación Mira y corresponden a la principal fuente de agua para uso doméstico, riego, abrevaderos, piscícolas, agua potable dentro de la parroquia. Los cuerpos de agua poseen una extensión de 7122,66 ha y existe alrededor de 49 autorizaciones, las cuales se ven beneficiadas por el uso y aprovechamiento de este recurso, entre los usuarios se destaca 25 autorizaciones para uso doméstico, 21 para riego, 2 de abrevaderos, 1 de piscícola (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016). De esta manera se busca la conservación de ecosistemas generadores del recurso hídrico y trabajar en la gestión de uso del agua establecido por la constitución, en donde se presenta como un derecho y una prioridad el agua para consumo humano, además se contribuye al cumplimiento los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en cuanto al recurso hídrico.

Las actividades productivas mayormente beneficiadas de este recurso actualmente corresponden a las que se encuentran en relación con el uso de riego, ya que hacen uso del 82,09% con un caudal promedio de 752,75 l/s, seguido del piscícola con un porcentaje de aprovechamiento de 10,91% y un caudal promedio de 100 l/s, seguido de usos domésticos

correspondientes al 7% y un caudal promedio de 70 l/s, y finalmente los abrevaderos que cuentan con el 0,07% y un caudal de 0,7 l/s, de esta manera se presenta la necesidad de un manejo adecuado del recurso para poder proporcionar un sistema de distribución generalizado para todo el territorio (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016).

Se han planteado algunos proyectos de regulación de uso ya que se busca mantener un equilibrio ambiental y sustentable del terreno, para esto se han realizado talleres en las comunidades con el fin de delimitar el uso del suelo, teniendo en consideración que en cada comuna se presenta una realidad social diferente debido a características propias de la ubicación geográfica, por tanto los intereses varían entre cada una, además en el proceso de zonificación las áreas más representativas corresponden a tierra agropecuaria como la zona más extendida. A continuación, se presenta la tabla 3 con el uso del suelo.

**Tabla 3.**  
*Tipos de uso de suelo*

Usos del suelo		
Uso	Área (ha)	Porcentaje (%)
Agropecuaria	4640	39,4
Páramo andino	3265	27,7
Plantaciones forestales y matorrales	2817	24
Construcciones	1166	9,9

Fuente: “Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Angochagua” (Sandoval H. , 2015)

De esta manera se identifica el interés por la conservación de los ecosistemas naturales generadores del recurso hídrico para una correcta gestión y manejo del agua durante épocas de sequía en las actividades relacionadas con agricultura y ganadería (Zufferey, Achig, & Cevallos, 2016).

Por lo tanto, al tener interés por los servicios ambientales y al hacer uso del recurso hídrico en la mayoría actividades productivas en las que se ve intervenido el territorio, se busca conocer



las entradas y salidas de agua para mejorar la gestión y control del agua e implementar incentivos de acuerdo a las actividades productivas y de conservación existentes.

## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo General**

Analizar el recurso hídrico de la unidad hidrográfica del río Tahuando, parroquia Angochagua-Ibarra de Imbabura mediante el estudio de la información existente y análisis de datos obtenidos en campo correspondientes a los meses de febrero a mayo para recomendar acciones que minimicen la falta del recurso hídrico en la época de sequía

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

Realizar la actualización de la cartografía de uso y cobertura del suelo existente, obtener una identificación real sobre el tipo de coberturas presentes en el territorio, empleando técnicas de teledetección.

Cuantificar la oferta y demanda de agua, con la finalidad de establecer el balance hídrico en la cuenca del Río Tahuando, en base a la “Guía Internacional de investigación y métodos – Métodos de cálculo del balance hídrico”.

Determinar el estrés general de la cuenca mediante los resultados obtenidos del balance hídrico para proponer alternativas que mejoren el manejo de la unidad hidrográfica.

## CAPITULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Fundamento Teórico de teledetección para clasificación de imágenes satelitales

La teledetección es la ciencia que permite obtener información de un objeto mediante la manipulación de imágenes obtenidas a partir de sensores espaciales que se encuentran montados en plataformas y están en constante monitoreo del planeta. Este procedimiento se da a partir de la información que proviene del reflejo de la radiación solar sobre los objetos terrestres. La radiación reflejada es capturada por satélites que se encuentran orbitando en la exosfera y almacenada en matrices ordenadas por filas y columnas, parcialmente procesada y retransmitida a estaciones terrestres para un posterior procesamiento y análisis de las imágenes (Chuvieco, 1990).

Los sensores que recogen imágenes satelitales se encuentran clasificados como sensores pasivos, los cuales se limitan a obtener información ráster a partir del rebote de la energía electromagnética contra la cubierta terrestre, esta radiación puede ser de origen solar o en virtud de la temperatura propia que posean los objetos (Chuvieco, 1990).

##### 2.1.1. Resolución de un sistema sensor

La resolución que tiene una imagen implica el nivel de detalle de las cuatro manifestaciones de la información que proviene en una imagen satelital: espacial, espectral, radiométrica y temporal. De esta manera se podrá discriminar objetos e información en función del detalle que las resoluciones lo permita (Chuvieco, 1990).

##### 2.1.1.1. Resolución espacial

Traducido como el tamaño de pixel que tiene una imagen, esta resolución corresponde al tamaño mínimo que se van a poder visualizar y a la cual van a estar separados todos los objetos en una imagen. La resolución espacial depende de características del sensor como: la altura orbital, la velocidad de exploración, número de detectores y la calidad del lente del sensor. La escala de trabajo al momento de realizar mapas temáticos relacionados con el análisis espacial de la información de una imagen satelital tendrá una estrecha relación con la resolución espacial que esta posea, ya que los objetos identificables deberán ser de un tamaño igual o mayor al tamaño de pixel (Chuvienco, 1990).

Como limitante de este tipo de información se presenta el problema que existe al momento de la interpretación digital en zonas urbanas, ya que particularmente las cubiertas de las viviendas en zonas urbanas pueden afectar la clasificación otorgándoles un valor de pixel muy parecido al que tiene el suelo desnudo (Chuvienco, 1990).

#### **2.1.1.2. Resolución espectral**

El detalle espectral tendrá estrecha relación al número y ancho de cada banda que posea una imagen satelital debido a que la información que registre un sensor se comporta de manera diferente de acuerdo al valor espectral con el que se lo esté analizando. Desde esta perspectiva una imagen será más idónea de acuerdo a la mayor cantidad de bandas posea, cubriendo la mayor parte del ancho espectral y facilitando la caracterización de los objetos (Chuvienco, 1990).

Sin embargo, la selección de una imagen de acuerdo al número y ancho de bandas depende del diseño del sensor, ya que algunos sensores poseen aplicaciones específicas (Chuvienco, 1990).

#### **2.1.1.3. Resolución radiométrica**

Representa el nivel de detalle que reconoce el sensor en la radiancia espectral que recibe. El

número de niveles digitales que posee una imagen depende del rango de la resolución radiométrica que posea cada pixel. La información que reciben los sensores de cada objeto debe ser transformados mediante una conversión analógico – digital realizada a bordo del sensor para ordenar los niveles de información que la imagen posea. Actualmente la mayoría de satélites ofrecen 256 niveles. Al igual que en otro tipo de resoluciones en cuanto mayor sea la precisión radiométrica, mejor será la interpretación de la imagen. Algunos autores estiman que alrededor de 16 niveles por color son convenientes para proporcionar un análisis adecuado (Trucker, Townshend, & Goff, 1985) (Chuvienco, 1990).

#### **2.1.1.4. Resolución temporal**

Se la puede describir como el ciclo necesario del sensor para adquirir información de la superficie terrestre de la misma posición. Depende de características de posición de la plataforma como: altura, velocidad, además se incluyen características del sensor como: ángulo de observación y abertura. La frecuencia de cobertura dependerá del tipo de órbita que posea cada satélite, ya que los satélites geoestacionarios tienen periodos mucho más cortos que los de órbita polar (Chuvienco, 1990).

#### **2.1.2. Tratamiento digital**

Este procedimiento busca corregir los errores que posee cada pixel en la precisión de su ubicación espacial o en cuanto a la información espectral de los ND que componen los pixeles, estas correcciones se la realiza con información lo más cercana posible obtenida al momento de la adquisición de la imagen. Los grandes grupos de correcciones que se realizan son: correcciones radiométricas, en las cuales se elimina errores que posea la información de cada pixel y correcciones geométricas en las que se elimina errores de posicionamiento de la imagen

(Chuvieco, 1990).

Una imagen satelital se encuentra expuesta a ser modificada por algunas fuentes de error como: distorsiones de la plataforma, distorsiones producidas por la rotación terrestre, distorsiones provocadas por el sensor, distorsiones provocadas por la atmosfera (Chuvieco, 1990).

#### **2.1.2.1. Correcciones radiométricas**

Se definen como una serie de procedimientos que buscan modificar los niveles digitales para acercarlos a los valores reales que habría si se realizaría una recepción ideal (Chuvieco, 1990). Las correcciones radiométricas que se deben realizar para eliminar distorsiones provocadas por la atmosfera, por mal funcionamiento del sensor o conversión de ND a radiancia y reflectancia para evaluar parámetros físicos son los siguientes:

- **Restauración de líneas o píxeles perdidos:** se lo debe realizar cuando la imagen presenta líneas o píxeles sin información, estas líneas son de carácter visual por lo que se presentan de color blanco o negro sobre la imagen. Este proceso está dirigido a mejorar artificialmente el aspecto de la imagen (Chuvieco, 1990).
- **Corrección del bandeo de la imagen:** este problema se da por una mala calibración de los detectores que forman un sensor, este es un problema simultaneo en la imagen el cual se registra cada un cierto número de líneas, para corregir este problema basta con recomponer el histograma de cada detector, calculando independientemente la frecuencia para cada una de las líneas, considerando que están bien calibrados los detectores, los histogramas deberían ser parecidos (Chuvieco, 1990).

- **Corrección atmosférica:** este problema se presenta debido a la presencia de aerosoles y vapor de agua dispersa en la atmosfera. Este tipo de mejoras son de mayor importancia cuando se están analizando variables físicas del terreno. Este procedimiento consiste en realizar una corrección del histograma por sus valores mínimos (Chuvieco, 1990).
- **Conversión de los ND a parámetros físicos:** para obtener ND que ayuden a la caracterización específica de un tipo de cubierta es necesario tener medidas en campo para poder realizar una relación directa de las variables antes aludidas con los niveles digitales (Chuvieco, 1990).

#### **2.1.2.2. Correcciones Geométricas**

Las transformaciones geométricas en una imagen satelital tienen como objetivo modificar la posición de (x, y) de los píxeles, sin alterar la información presente en los niveles digitales. Las imágenes resultantes pueden ser superpuestas con otras que se encuentren correctamente georreferenciadas, cada una con su propio sistema de referencia ya sea coordenadas geográficas y planas. Las correcciones geométricas pueden realizarse de dos maneras: a partir de la información de las características orbitales del satélite para corregir errores sistemáticos provenientes de la rotación terrestre y de la inclinación orbital, y la segunda alternativa consiste en utilizar como referencia otra imagen que ya se encuentra corregida. En cualquiera de los casos estos procedimientos constan de tres fases: localizaciones de puntos comunes de la imagen, cálculo de las funciones y transformaciones entre las coordenadas de la imagen y las del mapa, transferencia de la ubicación de los ND originales a la nueva posición basada en la transformación previa (Chuvieco, 1990). El procedimiento para realizar las correcciones geométricas de una imagen es el siguiente:

- **Establecimiento de puntos de control:** es la fase en donde se localiza una serie de puntos en campo los cuales sirven como observaciones comunes a todas las imágenes a los cuales pertenezcan estos puntos, la calidad del posicionamiento de la imagen estará determinada en función de la precisión con la que se localicen los puntos. La planificación de los puntos de control depende de tres aspectos: número de puntos, localización y su distribución. El número de puntos dependerá de la complejidad de la imagen y por ende del tipo de ecuación que se utilice. Matemáticamente son necesarios tres puntos para una función de primer grado, seis para una de segundo grado y diez para una de tercer grado. Se pretende seleccionar puntos no sujetos al dinamismo temporal para criterio de localización de los puntos. En cuanto a la distribución debe ser uniforme en toda la imagen, teniendo en cuenta áreas con distintas altitudes, siempre y cuando sean identificables en la imagen (Chuvieco, 1990).
- **Cálculo de las funciones de transformación:** una vez seleccionados los puntos de control estos son utilizados en una función matemática relacionando las coordenadas de la imagen con las del mapa, de esta manera se realiza el cálculo y ajuste de la nueva imagen. Como parte del procedimiento se debe calcular el error medio cuadrático del ajuste de tal manera que se conozca la precisión con la que cada punto se posiciono sobre la imagen con la opción de conservar todos los puntos de control o eliminar el o los puntos que generen un error superior al marcado inicialmente (Chuvieco, 1990).
- **Transferencia de los ND originales a la posición corregida:** posterior a la generación de una función que permita ajustar los niveles digitales, se obtiene como resultado una nueva matriz vacía en la que se encuentra la posición de cada pixel orientada correctamente en el mapa, esta nueva matriz debe ser llenada con los ND en la ubicación que le corresponde a

cada pixel. Debido a que se presentan problemas por la alteración de la geometría de cada pixel en esta fase, se ha propuesto tres métodos que permiten realizar esta corrección: vecino más próximo la cual superpone los ND en el pixel más cercano de la nueva matriz, interpolación bilineal que realiza un promedio de los 4 pixeles más cercanos, convolución cubica en el cual se considera los ND de los 16 pixeles más cercanos como resultado se obtiene mayor calidad en el efecto visual, pero involucra un proceso de cálculo más complicado (Chuvienco, 1990).

### 2.1.3. Constelación de satélites PlaneScopet e imágenes de alta resolución

Para realizar la clasificación supervisada en zonas rurales, la metodología propuesta en “Fundamentos de Teledetección” (Chuvienco, 1990) señala que es conveniente utilizar imágenes de alta resolución ya que se obtiene una mejor discriminación de los objetos debido a que se encuentran espacios heterogéneos bien definidos.

Las imágenes PlanetScope son obtenidas y previamente procesadas en el espacio a partir de un grupo de 120 satélites catalogados como CobeSat 3U con dimensiones de 10cm por 10cm por 30cm de los cuales es posible obtener imágenes diarias de todo el planeta cubriendo superficies de 150 millones de km<sup>2</sup>/día (Planet Imagery, 2016). Algunas de las características del sensor como de la plataforma se presentan en la tabla 4.

**Tabla 4.**  
*Constelación PlanetScope y Especificaciones del Sensor*

Características del Satélite	Descripción
Altitud de la orbita	400 km (51.6° de inclinación)
Latitud máxima y mínima de cobertura	±52
Hora de paso por el Ecuador	9.30-11.30



Bandas Espectrales	Blue 455 - 515 nm Green 500 – 590 nm Red 590 – 670 nm NIR 780 – 860 nm
Tamaño del pixel	3m
Swath Width	24.6 km * 16.4 km
Cobertura máxima por orbita	8100 km
Tiempo de revisita	Diario
Capacidad de captura de imágenes	150 millones de km <sup>2</sup> /día
Rango dinámico de la cámara	12 bits

Fuente: “Planet Imagery Product Specification: PlanetScope & Raideye” (Planet Imagery, 2016)

Los productos de PlanetScope que están disponibles de todo el planeta se presentan a continuación.

### Tabla 5.

*Niveles de procesamiento de las imágenes PlanetScope*

Nombre	Descripción	Nivel del Producto
<b>PlanetScope Escena Básica</b>	La radiancia se encuentra escalada a la parte superior de la atmosfera por el sensor. Este tipo de productos están orientados a usuarios con conocimiento en el procesamiento de imágenes y correcciones geométricas ya que no se encuentra en ninguna proyección cartográfica, sin embargo, posee las correcciones radiométricas y del sensor en los metadatos.	Nivel 1B
<b>PlanetScope Orto-Escena</b>	Estos productos se encuentran orto-rectificados, su radiancia esta escalada a la parte superior de la atmosfera por el sensor y posee una proyección cartográfica en base al encuadre de la escena. Es adecuado para aplicaciones analíticas y visuales	Nivel 3B
<b>PlanetScope Orto-Cuadro</b>	Estas imágenes poseen las correcciones radiométricas y del sensor en los metadatos, están orto-rectificadas y poseen una proyección UTM	Nivel 3A

Fuente: “Planet Imagery Product Specification: PlanetScope & Raideye” (Planet Imagery, 2016)

#### 2.1.3.1. Imágenes PlanetScope Nivel 3B

Las imágenes Orto-Escena obtenida de los satélites PlanetScope son recopiladas como una

serie de escenas superpuestas, las cuales en función de la necesidad de los usuarios son recortadas para usos particulares, obteniendo imágenes de acuerdo a la zona que se solicite. Las escenas poseen una geolocalización precisa con una proyección cartográfica, son procesadas en el sensor para eliminar distorsiones causadas en el terreno y la atmosfera, la resolución espectral es de 4 bandas las RGB y NIR. Para la corrección geométrica que se realiza en las escenas se utiliza modelos digitales de 30 y 90 metros, además de puntos de control. Las imágenes PlanetScope Nivel 3B tienen un amplio campo en aplicaciones visuales y analíticas por su nivel de procesamiento, resolución espacial y espectral. Los atributos de las imágenes PlanetScope Nivel 3B se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6.**

*Atributos de las imágenes Orto-Escena PlanetScope*

<b>Atributos del Producto</b>	<b>Descripción</b>
<b>Formato y Componentes del producto</b>	Los componentes de las imágenes Orto-Escena son los siguientes: Archivos de Imagen – GeoTIFF Metadatos – GeoJSON y un XML con los metadatos
<b>Orientación del Producto</b>	Norte del mapa
<b>Encuadre del producto</b>	Base de la escena
<b>Profundidad de bits</b>	Visual: 8 bits Analítico (DN): 12 bits Analítico (Radiancia): 16 bits
<b>Tamaño del Producto</b>	Cada escena es de 24 km por 7 km
<b>Correcciones Geométricas</b>	Los efectos del sensor son corregidos por telemetría Orto rectificado por puntos de control (GCPs) y modelos digitales de elevación (DEMs) de 30 a 90 metros con un RMS menor a 10m
<b>Datum Horizontal</b>	WGS84
<b>Proyección del Mapa</b>	UTM
<b>Kernel de Resampleo</b>	Convolución Cubica

Fuente: “Planet Imagery Product Specification: PlanetScope & Raideye” (Planet Imagery, 2016)

Los productos que se obtienen de las imágenes nivel 3B PlanetScope son los siguientes:

- **Especificaciones del espectro visible de las imágenes Orto-Escena:** se encuentra orto-rectificado eliminando las distorsiones causadas por el terreno y de la perspectiva del sensor para tener la imagen de un disparo perpendicular al terreno, además se ha restaurado la geometría de la imagen. Los colores de la imagen han sido corregidos mediante una curva de color optimizándolos con el fin de obtener resultados bien perceptibles al ojo humano como se vería desde el satélite para fines de visualización, se han tenido en cuenta correcciones del ángulo solar teniendo como resultado imágenes georreferenciadas de acuerdo a su proyección cartográfica listas para ser utilizadas en un sistema de información geográfica (SIG) (Planet Imagery, 2016).
- **Especificaciones multiespectrales de las imágenes Orto-Escena:** se han procesado bajo las mismas consideraciones que los productos del espectro visible de las imágenes Orto-Escena y además se han realizado correcciones radiométricas para corregir errores generados por el sensor, obteniendo luminosidad identificable para el satélite. Este producto de las imágenes es muy conveniente para una amplia variedad de aplicaciones científicas, entre las que se destaca las clasificaciones de la cobertura del suelo (Planet Imagery, 2016).

#### **2.1.4. Clasificación digital**

Una clasificación digital de imágenes viene dada a partir del manejo de los niveles digitales ND obtenidos por el sensor y se la realiza mediante técnicas de teledetección en un ordenador electrónico, estos procedimientos pueden proporcionar un inventario cartográfico de los objetos identificados. La ventaja de este procedimiento es que se automatiza el mapeo de la cobertura del suelo hecha totalmente en campo, economizando recursos económicos, obteniendo resultados más eficientes mediante percepción remota. La metodología de análisis de imágenes

satelitales orientada a objetos se ha convertido en la más utilizada ya que se logra cubrir grandes extensiones de terreno a escalas mucho menores con imágenes de alta resolución (Chuvieco, 1990).

La clasificación de una imagen satelital se la puede realizar automáticamente sin insumos previos, o realizando un muestreo de puntos los cuales son introducidos en el procedimiento, además para la verificación de resultados se realiza a la par la recolección de puntos de verificación. La selección de los métodos de clasificación dependerá de los datos existentes y la finalidad del proyecto (Chuvieco, 1990).

Uno de los aspectos importantes al momento de trabajar con productos generados de una imagen satelital es la unidad mínima mapeable. Este factor representa la superficie mínima que se va a poder identificar en el terreno, por lo tanto, en la clasificación de coberturas corresponde a la mínima superficie de la parcela que se podrá identificar en el mapa (Mejía & Moncayo, 2012). La expresión matemática es la siguiente

$$UMM = UMV * Escala de trabajo \quad \text{Ec. 1}$$

#### **2.1.4.1. Clasificación supervisada**

Este procedimiento se lo realiza en función de las categorías de la leyenda que tenga como objetivo el proyecto, además se debe tener en cuenta que, para aplicar este método, el usuario debe tener conocimiento de la zona de estudio con el fin de poder identificar y comprobar la información que se visualiza en la imagen. Consta de tres fases: la fase de entrenamiento, la fase de distribución de los pixeles a cada una de las categorías, y la validación de resultados (Chuvieco, 1990).

La primera fase como su nombre lo indica sirve para entrenar al ordenador en el

reconocimiento de las clases generadas a partir de un muestreo en campo otorgándole ND determinados a cada campo, las muestras pueden ser archivos vectores en forma de puntos o polígonos, este procedimiento se lo debe reproducir para todas las categorías que se busque identificar en la imagen (Chuvienco, 1990).

Posteriormente se deben calcular las estadísticas de cada categoría identificando el nivel de relación que existen entre los ND de cada categoría. A partir de este procedimiento se puede evidenciar si se realizó una correcta selección de los campos de entrenamiento, debido a que las áreas no son homogéneas y cada objeto presenta niveles digitales diferentes, el sistema realiza un promedio de los componentes que posea cada pixel, por lo que se dan clases híbridas las cuales son susceptibles a confusiones si no se realiza una correcta selección de las categorías. Por este motivo lo más óptimo es tener más de dos clases (Chuvienco, 1990).

Para realizar la selección del número de muestras a utilizar se requiere la siguiente ecuación:

$$n = m + 1 \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde  $n$  corresponde al número de muestras de cada categoría y  $m$  es el número de bandas que integran el análisis. Sin embargo, el número de muestras debe ser igual o mayor al calculado. En zonas urbanas se presenta el problema de que las zonas son muy heterogéneas incrementando el ruido en la escena a medida que la resolución espacial es mayor, sin embargo, en zonas agrícolas y forestales existe una mayor definición de las zonas por lo que es más conveniente usar imágenes de alta resolución (Chuvienco, 1990).

#### **2.1.4.2. Clasificación no supervisada**

Esta metodología tiene como fin la clasificación de los espectros presentes en la imagen, no es necesario realizar una visita o muestreo en campo ya que el trabajo del usuario está

relacionado con la interpretación de las clases resultantes. El procedimiento requerido para realizar este tipo de clasificaciones consiste en tres pasos: selección de las variables que intervienen en el análisis, selección de un criterio para medir la similitud y la selección de un criterio para agrupar las clases similares (Chuvieco, 1990).

La clasificación se la realizara de acuerdo a las bandas seleccionadas, de donde se obtendrán los valores espectrales de cada pixel, relacionando a los pixeles que posean los mismos ND. Para esto se debe tener en cuenta inicialmente dos criterios, la similitud entre pixeles y las condiciones para el proceso de agrupamiento (Chuvieco, 1990).

El método de clasificación no supervisada ha sido considerado como exploratorio ya que resulta conveniente para determinar las características estadísticas entre clases, la cual sirve para abordar la fase de clasificación de la imagen (Chuvieco, 1990).

## **2.2. Fundamento Teórico del Balance Hídrico**

### **2.2.1. Introducción al Balance Hídrico**

El balance hídrico se lo realiza mediante una ecuación en la que se tiene en cuenta la oferta y demandas naturales y antrópicas dentro de una unidad hidrográfica con el fin de conocer la cantidad de agua que se maneja en un determinado periodo de tiempo. El termino balance busca establecer un equilibrio entre todos los recursos obtenidos a partir del ciclo hidrológico, en el cual se consideran los recursos hídricos que ingresan y salen de un sistema (Carchi, 2015).

Esta herramienta permite darle un manejo adecuado a los ecosistemas de una cuenca mediante practicas sostenibles, utilizando la cantidad superávit obtenida en épocas lluvia para compensar el déficit que se presenta en épocas de sequía. También es comúnmente utilizado como base para implementar sistemas de riego con el apoyo de flujos de acumulación y en

zonas urbanas es utilizado en el diseño de drenajes superficiales o subterráneos mediante canaletas, tuberías o pozos. Además, representa una variable muy importante al momento de hacer estudios de cambio climático ya que al tener información de diferentes periodos de tiempo se puede determinar las variaciones del régimen natural. Muy comúnmente es calculado a una escala temporal mensual y es representado utilizando histogramas con los niveles de evaporación y precipitación (Carchi, 2015).

Las entradas que proporciona el ciclo hidrológico corresponden a la lluvia en todos sus estados, ya sea líquida (precipitación vertical), sólida (nieve o granizo) y en forma de neblinas (precipitación horizontal); mientras que las salidas corresponden a la evapotranspiración y escorrentía superficial y subsuperficial (Carchi, 2015).

Los símbolos y unidades que se utilizan para este tipo de estudios se presentan en la tabla 7. Han sido obtenidos de la “Guía Internacional de investigación y métodos – Métodos de cálculo del balance hídrico” (UNESCO, 1981), la cual contempla otras publicaciones hidrológicas ya realizadas y estándares internacionales.

**Tabla 7.**

*Símbolos y unidades convencionales para un Balance Hídrico*

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidades</b>
<b>a</b>	Parte de una superficie	ha
<b>A</b>	Superficie (de una cuenca)	ha
<b>E</b>	Evapotranspiración	mm
<b>g</b>	Aceleración debida a la gravedad	m/s <sup>2</sup>
<b>I</b>	Caudal de Riego	mm
<b>n</b>	Nº de términos de una serie	-
<b>P</b>	Precipitación real recibida en la superficie del suelo	mm
<b>Q</b>	Caudal total	mm
<b>S</b>	Coefficiente de almacenamiento, expresado como profundidad	mm
<b>T</b>	Periodo del Balance Hídrico	-
<b>T<sub>r</sub></b>	Tiempo convencional del estudio	-

<b>V</b>	Almacenamiento de agua, expresado como un volumen	m <sup>3</sup>
<b>v</b>	Término residual o error de cierre de la ecuación del balance hídrico	mm

Fuente: “Guía Internacional de investigación y métodos - Métodos de cálculo del balance hídrico” (UNESCO, 1981)

El planteamiento de la ecuación del balance hídrico según “Guía internacional de investigación y métodos - Métodos de cálculo del balance hídrico” (UNESCO, 1981) queda de la siguiente manera:

$$P = Q_{SI} + Q_{UI} + E + Q_{SP} + Q_{UO} + \Delta S \quad \text{Ec. 3}$$

Donde las variables expresadas son las siguientes:

- Precipitación en todos sus estados recibida en la superficie del suelo o coberturas vegetales (P).
- Los caudales de agua superficiales y subterráneos recibidos dentro o fuera de la cuenca ( $Q_{SI}$  y  $Q_{UI}$ ).
- Evapotranspiración (E).
- Salidas de agua superficial y subterránea del sistema ( $Q_{SP}$  y  $Q_{UO}$ ).
- Deficit o superhabit ( $\Delta S$ ).

Por lo tanto, para conocer como esta el manejo de los ecosistemas sobre la regulación del ciclo hidrológico y que el Rio Tahuando nace en la zona sur oriental de la cuenca la ecuación se presenta de la siguiente manera:

$$P = E + Q_{SP} + Q_{UO} + \Delta S \quad \text{Ec. 4}$$

De tal manera se descarta únicamente las entradas de agua pertenecientes a otros sistemas.

De acuerdo al tipo de extracción que existe dentro de la cuenca del Río Tahuando, la



demanda antrópica de los puntos concesionados obtiene el recurso de las salidas correspondientes a los caudales superficiales y subsuperficiales ( $Q_{sp}$  y  $Q_{uo}$ ) o también conocidos como infiltración y esorrentía por tanto la expresión matemática para realizar el Balance Hídrico incluida la demanda antrópica según el estudio de “Elaboración de un balance hídrico de la cuenca del río Machangara” (Carchi, 2015) se presenta de la siguiente manera:

$$Q_{SP} + Q_{UO} - D_A = \Delta \quad \text{Ec. 5}$$

En la que se incluye el  $D_A$  y  $\Delta$  que corresponden a la demanda antrópica y la disponibilidad de agua. El flujo restante pasa por la ciudad de Ibarra hasta unirse con la unidad hidrográfica del río Mira como un caudal superficial aportante. Además, en este sistema se encuentra ubicado un punto concesionado denominado Guaraczapas con un caudal de 158 l/s el cual abastece con agua de consumo doméstico a la ciudad de Ibarra (SENAGUA-Ibarra, 2018).

### 2.2.2. Ciclo Hidrológico

Es un proceso espontaneo en el que el agua se desplaza en todos sus estados de manera recurrente. El ciclo hidrológico inicia con la precipitación de agua en forma de lluvia, granizo o nieve sobre las capas continentales y los océanos con un volumen anual de 40000 km<sup>3</sup> y 385000 km<sup>3</sup> respectivamente, los cuales se obtienen a partir de los procesos de evaporación del agua que se encuentra en los mares o sobre la tierra además de la transpiración de todas las coberturas vegetales que corresponde a un volumen anual global de 425000 km<sup>3</sup>. El agua que cae sobre la corteza continental, comienza su desplazamiento y acumulación a lo largo del relieve del planeta en forma de esorrentía superficial o subsuperficial beneficiando a los habitantes por donde pasa, posteriormente vuelve hacia los mares. (Ordoñez, 2011).

La distribución de vapor de agua atmosférico tiene una disminución que va desde los 50 mm en las zonas ecuatoriales en donde se presenta una mayor temperatura, hasta los 5 mm sobre las regiones polares en donde se existe una menor disminución de las concentraciones de vapor debido a las temperaturas bajas. La precipitación que cae sobre la superficie continental es continuamente reciclada por la re-evaporación. El volumen de agua que aportan los océanos corresponde a  $71000 \text{ km}^3$  dando lugar a un flujo total anual de  $111000 \text{ km}^3$  en forma de vapor de agua en la atmosfera (Mook, 2000).

Mediante la aplicación de la fórmula de Balance Hídrico es posible conocer la cantidad de agua que se está consumiendo en los procesos biológicos de un ecosistema y la que es de dominio del hombre. La cantidad de agua procedente de escorrentía superficial y subsuperficial a nivel mundial es de  $40000 \text{ km}^3$  (266 mm). Los principales usos que le da el ser humano al recurso hídrico captado por escorrentía son: domestico, industrial, y agrícola. Actualmente se consume alrededor de  $5000 \text{ km}^3$  del caudal superficial de agua dulce para estos fines. (Mook, 2000).

La irregular distribución del recurso ha dado como consecuencia que el ser humano busque alternativas para poder manejar el agua teniendo en cuenta la ubicación de los asentamientos humanos y las épocas climáticas. La mayor parte de agua dulce se genera en zonas tropicales ecuatoriales en donde se ubica un tercio de la humanidad, mientras que el resto de la población mundial se encuentra esparcida fuera de los trópicos. Además, dos tercios del agua que genera un aporte al desarrollo de las actividades antrópicas proviene de inundaciones y solo el restante es obtenido de forma natura por la escorrentía. Lo cual ha impulsado proyectos de transporte y almacenamiento del recurso, con los que se ha venido modificado el ciclo hidrológico mundial

(Mook, 2000).

### **2.2.3. Cuenca hidrográfica**

Es conocida como una unidad hidrográfica, clasificada como un sistema abierto el cual se encuentra delimitado por una divisoria de aguas llamada Divortum Aquarium generada por la parte más alta de las montañas. El sistema montañoso de acuerdo a las características de la pendiente conducirá las aguas que se condensan sobre la superficie del terreno dando origen a flujos de agua los cuales se irán acumulando conforme vayan descendiendo por los niveles de la cuenca (Mestre, Jiménez, & Pimentel, 2015). Una cuenca hidrográfica va a estar compuesta por tres niveles:

- La zona de captación o cuenca Alta: en la parte más alta de estas áreas se forma la divisoria de aguas, la cual pertenece a la porción altimétrica más elevada de la cuenca, además da lugar a los primeros escurrimientos una vez que la recarga hídrica del suelo a llegado a su máxima capacidad (Mestre, Jiménez, & Pimentel, 2015).
- La zona de almacenamiento o cuenca Media: este nivel corresponde a la transición que existe entre cuenca alta y baja, en este lugar se dan procesos de concentración y transporte de agua, sedimentos, contaminantes y materia orgánica dando origen a la erosión del suelo. En esta zona será determinante la pendiente y la forma de la cuenca, ya que a mayor pendiente existirá una mayor probabilidad de erosión (Mestre, Jiménez, & Pimentel, 2015).
- La zona de descarga o cuenca Baja: aquí desembocan todas las acumulaciones de agua ingresando al río principal, el cual posteriormente desembocara en océanos, lagos o como aportantes de otros ríos. Además, corresponde a una zona donde existen ecosistemas muy

importantes para usos agrícolas y se evidencian los impactos de toda la cuenca (Mestre, Jiménez, & Pimentel, 2015).

En estas demarcaciones hídricas existen ecosistemas en donde se desarrollan procesos físicos, biológicos y antrópicos, proporcionando un hogar para varias especies, dotando de servicios ambientales, sociales y culturales a las poblaciones que desarrollen sus actividades dentro de este territorio (Mestre, Jiménez, & Pimentel, 2015). También se las puede clasificar de acuerdo a las características rurales o urbanas de la cuenca:

#### **2.2.3.1. Cuencas naturales**

Este tipo de sistemas como su nombre lo indica son extensiones donde el suelo y cobertura vegetal se encuentra en su estado natural, generando los procesos de salida del recurso hídrico por medio de la interceptación, escurrimiento superficial y subsuperficial y evapotranspiración, sin embargo cada una de estas variables está caracterizada por la latitud, el clima y el tipo de bioma (UNESP, 2017).

Los tipos de biomasa que presentan mayor cantidad de retención corresponden a los bosques y zonas de páramo debido a que el suelo donde crecen este tipo de coberturas vegetales presenta un menor grado de compactación lo que da como resultado en una mayor tasa de infiltración. Particularmente los páramos funcionan como una esponja la cual proporciona agua constante y limpia incluso en época de sequía (Mena & Hofstede, 2006)

#### **2.2.3.2. Cuencas en áreas rurales**

Son cuencas en donde existe gran actividad antrópica y particularmente extensas zonas de cultivo, lo que da como resultado alteraciones en la calidad y el régimen del agua dependiendo

también del tipo de especie plantada que exista. Además, en grandes extensiones de suelo donde se realizan prácticas agrícolas aumenta la erosión y se generan pérdidas excesivas en la humedad de suelo y su retención de agua, presentando como necesidad incrementar la demanda de agua de riego en estas zonas. Otra de las consecuencias por actividades agrícolas tiene que ver con los aportes de nutrientes como nitrógeno y fósforo, generando mayor eutrofización de los cuerpos de agua y afectando a la composición del suelo. El tipo de contaminación que se da en estas zonas pueden ser de dos tipos: la contaminación difusa que está relacionada directamente con actividades de cultivo y la contaminación puntual que se da debido a la forma de manejo de los desechos en ganadería (UNESP, 2017).

### **2.2.3.3. Cuencas hidrográficas urbanas**

Esta denominación se les da a las unidades hidrográficas en donde se encuentran grandes manchas urbanas y a medida que estas crecen los impactos ambientales relacionados con la cantidad y calidad del agua que maneja la población también van en incremento

Dentro de los impactos cuantitativos del agua generados zonas urbanas se evidencia los siguientes: reducción en los procesos de infiltración debido a la capa asfáltica y edificaciones, aumento en el caudal generado por escorrentía, reducción de la transpiración producida por la cobertura vegetal modificando el ciclo hidrológico y las características climáticas de la zona, reducción del escurrimiento subsuperficial, reducción de los caudales de los ríos generados por la cuenca aumentando la concentración de contaminantes (UNESP, 2017).

### **2.2.4. Características fisiográficas de una cuenca hidrográfica**

Para caracterizar a una cuenca se debe tener en cuenta sus componentes fisiográficos. Algunas de estas características e índices son los siguientes:

### 2.2.4.1. Área de la cuenca

Se determina a través de mapas digitalizados mediante la proyección de la línea divisoria de aguas (Divortum Aquarium) sobre el plano horizontal, se expresa en hectáreas (ha) o kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) y sirve para definir el potencial de generación de escurrimiento de la cuenca (UNESP, 2017). A continuación, en la tabla 8 se presenta los rangos del área y las denominaciones tiene cada tipo de cuenca.

**Tabla 8.**

*Rangos del área de la cuenca*

Área (km)	Descripción
Menores a 50	Pequeñas
51 a 150	Medianas
Mayores a 150	Grandes

Fuente: “Universidad Nacional Agraria” (Gámez, 2009)

### 2.2.4.2. Longitud del río principal

Se lo puede calcular a partir de mapas planimétricos teniendo como punto de inicio el nacimiento del río hasta la zona de descarga de la cuenca, que será el punto más extremo del río (UNESP, 2017).

### 2.2.4.3. Perfil longitudinal

Se los puede representar mediante planos altimétricos en donde se determine la variación de alturas a lo largo del río principal (UNESP, 2017).

### 2.2.4.4. Pendiente de la cuenca

La declividad representa una variable importante en procesos de modelación y su expresión matemática se da a razón de las diferencias altitudinales entre el punto de inicio y final del cauce principal sobre la longitud, se la expresa en porcentaje. Este cálculo se lo puede realizar

con un sistema de información geográfico (SIG) mediante un modelo digital del terreno (MDT) (UNESP, 2017). Los rangos de pendiente y su clase se presentan a continuación en la tabla 9.

**Tabla 9.**  
*Rangos de pendientes*

<b>Pendiente media, %</b>	<b>Tipo de terreno</b>
0-2	Plano
2-5	Suave
5-10	Accidentado medio
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente accidentado
25-50	Escarpado
Mayor a 50	Muy escarpado

Fuente: "Universidad Nacional Agraria" (Gómez, 2009)

#### **2.2.4.5. Índices de forma**

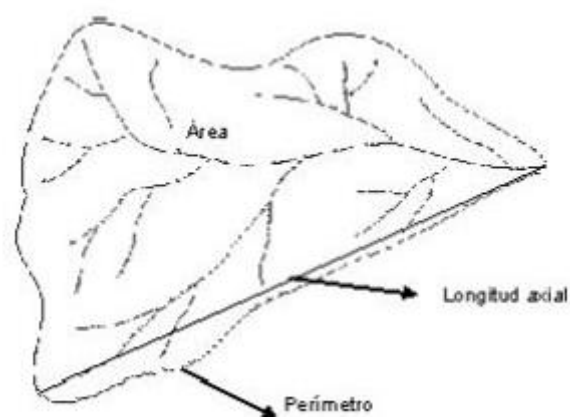
El índice de forma desempeña un papel fundamental en la clasificación de cuencas hidrográficas, ya que a medida que su forma sea más redondeada presenta mayor tendencia a inundarse, mientras que si tiene una forma rectangular su probabilidad es mucho más baja. La probabilidad de inundación también depende de la extensión de los drenajes tributarios, ya que en cuencas circulares las extensiones de estos serán similares y con longitudes cortas, por lo que su concentración será mucho mayor, mientras que en cuencas rectangulares se da una menor concentración debido a que sus tributarios son mucho más extensos. Para caracterizar una cuenca de acuerdo a su forma se puede utilizar el índice de compacidad o el factor de forma (UNESP, 2017).

#### **2.2.4.6. Fator de forma ( $k_f$ )**

Se calcula mediante la razón entre el área de la cuenca (A) y la longitud del axial ( $L_o$ ) de la cuenca al cuadrado (UNESP, 2017).

$$k_f = \frac{A}{(L_o)^2} \quad \text{Ec. 6}$$

La longitud axial como se muestra en la figura 7, corresponde a la distancia entre el punto de desfogue y el punto más alejado de la cuenca



**Figura 7.** Longitud axial.

Fuente: (Ecoforest, 2019)

A continuación, se presentan los rangos del factor de forma en la tabla 10:

**Tabla 10.**

*Rangos del factor de forma*

<b>Factor de forma</b>	<b>Descripción</b>
Menores a 0.22	Muy alargada
0.22-0.3	Alargada
0.3-0.32	Ligueramente alargada
0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45-0.6	Ligueramente ensanchada
0.6-0.8	Ensanchada
1-1.22	Muy ensanchada
Mayores a 1.22	Redonda

Fuente: "Universidad del Azuay" (Sellers, Buján, Corbelle, & Miranda, 2017)

#### **2.2.4.7. Coeficiente de circularidad o compacidad (Índice de Gravelius) ( $k_c$ )**

La expresión matemática representa la razón entre el perímetro de la cuenca (P) y una



circunferencia con la misma área de la cuenca (A). Se lo calcula de la siguiente manera (UNESP, 2017).

$$k_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde las variables son el perímetro y área de la cuenca en km y km<sup>2</sup> respectivamente. Si su factor es entre 1 a 1.25 presenta una forma circular, si esta entre 1.26 y 1.5 tendrá una forma oval redonda, mientras que si su valor esta entre 1.51 a 1.75 será rectangular

#### 2.2.4.8. Densidades

La densidad de drenajes permite evaluar la eficacia en el escurrimiento superficial, ya que se puede comparar este índice en cuencas de una región con tamaños diferentes. Es comúnmente utilizada en trabajos de regionalización y transposición entre unidades hidrográficas teniendo en cuenta el relieve y las características geológicas (UNESP, 2017). La densidad de una cuenca se la puede dividir en dos grupos:

#### 2.2.4.9. Densidad de drenaje (DD)

Corresponde a la razón entre la sumatoria de la longitud de los cauces internos y el área de la cuenca (UNESP, 2017).

$$DD = \frac{\sum L}{A} \quad \text{Ec. 8}$$

A continuación, en la tabla 11 se presentan los rangos de densidad de drenaje y su clasificación:

**Tabla 11.**  
*Rangos de densidad de drenaje*

Densidad de Drenaje (km/km <sup>2</sup> )	Descripción
--	-------------

Menores a 1	Baja
1 - 2	Moderada
2 - 3	Alta
Mayores a 3	Muy alta

Fuente: "Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental" (Guisela , Mariela, & Lopez, 2016).

#### 2.2.4.10. Densidad de corrientes

Representa la división entre el número total de corrientes y el área de la cuenca (UNESP, 2017).

$$DC = \frac{Nc}{A} \quad \text{Ec. 9}$$

#### 2.2.4.11. Tiempo de concentración

Esta variable describe el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca lleguen a formar parte del río principal y desemboken a la siguiente unidad hidrográfica, teniendo como base al tiempo que se demora el agua de lluvia en recorrer la distancia entre el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de la cuenca (Ibañes, 2019).

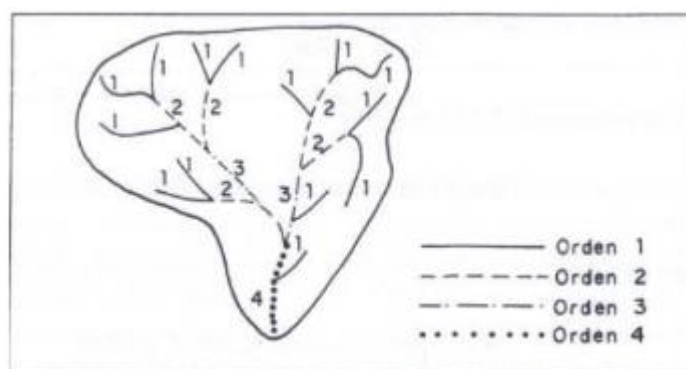
Entre los métodos más utilizados se destaca a la ecuación de U.S. Corps of Engineers, ya que tiene aplicaciones a cuencas naturales con tiempos de concentración entre  $0.2h < t_c < 24h$ , definiéndolo como el tiempo medio que tardan las gotas de lluvia en llegar al desagüe de la cuenca (López, 2006)

$$t_c = 0.3 * \left[ \left( \frac{L}{J^{\frac{1}{4}}} \right)^{0.76} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

Donde L es la longitud del cauce principal en (km) y J corresponde a su pendiente media en (m/m)

### 2.2.4.12. Orden de drenaje

Esta variable permite clasificar a las redes de drenaje de una cuenca hidrográfica. La metodología más utilizada es la de Horton la cual consiste en otorgar el grado de primer orden a los cauces menos identificales que son los que se encuentran más cercanos a las partes altas de la cuenca, posteriormente la unión de dos canales del mismo orden forman un nuevo cauce de orden  $i+1$ , mientras que si se encuentran dos canales de orden diferente el nuevo canal formado conservara el mayor de los dos, finalmente la cuenca tendrá el orden del río principal. Esta es la misma metodología que se utiliza en los sistemas de información geográfica (SIG) (UNESP, 2017). A continuación, en la figura 8 se presenta un ejemplo de clasificación mediante la clasificación de Horton



**Figura 8.** Orden de drenaje.

Fuente: (Moreno & Esquivel, 2015)

### 2.2.4.13. Pendiente media del cauce principal

Esta variable considera el desnivel entre los puntos extremos del cauce principal a razón de la longitud horizontal que exista entre dicho tramo, expresándose de la siguiente manera (UNESP, 2017):

$$S = \frac{H}{L} \quad \text{Ec. 11}$$

#### **2.2.4.14. Lugar de descarga**

Según el punto de descarga se puede clasificar a las cuencas hidrográficas de dos maneras endorreicas cuando el punto de descarga es dentro de la cuenca en un lago o embalse y exorreicas si el punto de descarga se encuentra en los límites de la cuenca (Gámez, 2009).

#### **2.2.4.15. Sinuosidad**

Corresponde a la expresión matemática de la razón de la longitud del cauce principal y la longitud del valle (Guisela , Mariela, & Lopez, 2016).

$$S = \frac{L}{L_v} \quad \text{Ec. 12}$$

### **2.3. Manejo adecuado de cuencas andinas y del recurso hídrico**

Las cuencas andinas que poseen en la zona de alta montaña ecosistemas de páramo representan zonas de vital importancia para poblaciones urbanas y rurales debido a los servicios ambientales que brinda teniendo como los principales el almacenamiento y regulación de agua, además de la retención del carbono, los cuales son de gran relevancia para controlar el cambio climático (Bievre, 2017).

Sin embargo, existen algunas actividades, en su mayoría las relacionadas con agricultura y ganadería que afectan al regular ciclo hidrológico de la zona, teniendo como consecuencia el colapso de la estructura del suelo y disminuciones en la cantidad y calidad de los recursos hídricos (Bievre, 2017).

Algunas de las alternativas que se han realizado en estudios similares son las siguientes: zonificación y conservación de las zonas de páramo, teniendo bien definidas las zonas de conservación y las zonas de producción (Hodstede, Segarra, & Mena, 2003).

En Ecuador una de las alternativas para la conservación de ecosistemas generadores de agua ha sido incluirlas dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas”. Para las zonas que no se encuentran categorizadas como SNAP se busca proponer programas enfocados hacia un manejo sustentable debido a su vulnerabilidad de transformarse en sistemas agropecuarios (Hodstede, Segarra, & Mena, 2003).

Gracias a la iniciativa tomada en 1998 de un programa de conservación a nivel nacional llamado “Proyecto Páramo” apoyando directamente a ONGs locales, en la administración de diferentes áreas protegidas desarrollando planes de manejo se implementaron iniciativas sustentables basados en: eliminación de la quema, ordenamiento territorial, reforestación de zonas bajas de páramo con especies nativas, introducción de camélidos como las alpacas, además se introdujeron proyectos de ecoturismo comunitario, programas de conservación de fuentes de agua mediante pago por servicios ambientales (Hodstede, Segarra, & Mena, 2003). Otra de las alternativas propuestas en estudios internacionales con el fin de mantener una regulación hídrica adecuada para el ciclo hidrológico es la conservación de espacios naturales cercanos al páramo en donde existan ecosistemas de humedales naturales (Bievre, 2017).

Mediante una nueva Ley Orgánica de Recursos hídricos, Usos y aprovechamiento del agua, además de inversiones en infraestructura y propuestas para una nueva cultura de conservación de los recursos hídricos y sus ecosistemas generadores se planea garantizar el acceso al agua en cantidad y calidad. Esta iniciativa pretende tener una tasa de déficit hídrico menor al 10% (SENAGUA, 2017).

### **2.3.1. Estrés hídrico general de una cuenca hidrográfica**

Representa un indicador del manejo sostenible del uso de los recursos hídricos, el cual mide

la presión producida por actividades antrópicas para los recursos naturales de agua dulce. Se define como la diferencia entre todos los recursos hídricos extraídos de la disponibilidad de la cuenca, generando un déficit o superávit del mismo. A nivel mundial la tasa de déficit es de 13%. Mientras que 32 países mantienen la tasa promedio de estrés hídrico, alrededor de 32 países se encuentran con un estrés que va del 25% al 70% entrando en un estado de escasez y 22 países superan estos porcentajes teniendo graves consecuencias por falta de agua. El estrés hídrico es un problema global que afecta a la sostenibilidad de los recursos ecosistémicos limitando la calidad de vida, el desarrollo social y económico de todas las personas. (ONU-AGUA, 2018).

Las alternativas recomendadas en “Progresos en el nivel de estrés hídrico: valores de referencia mundiales para el indicador 6.4.2 de los ODS” (ONU-AGUA, 2018) son: el aprovechamiento de las aguas residuales, propiamente del agua de lluvia y de la desalinización, ya que la reutilización de aguas residuales provenientes de la industria y la agricultura son poco aprovechadas. Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible se presenta el ODS 6 en el cual se plantea el manejo sostenible del recurso hídrico al 2030 para asegurar el abastecimiento de agua dulce a todos los sectores haciéndole frente a la escasez actual (ONU, 2018).

La metodología para el cálculo del estrés hídrico propuesto por la ONU está definida como la razón de la cantidad total de agua extraída de agua (TFWW) y la diferencia entre el total de recursos renovables de agua dulce (TRWR) menos las necesidades de caudal ambiental o caudal ecológico (EFR) (ONU-AGUA, 2018):

$$\text{Estrés Hídrico (\%)} = \frac{TFWW}{TRWR - EFR} * 100 \quad \text{Ec. 13}$$

Otro de los factores que se deben tener en cuenta es el consumo natural de agua por especies nativas o plantadas de la zona, ya que existen ecosistemas que se encargan de recargar y purificar el recurso hídrico (Zonas con potencial de recarga hídrica), por lo que es conveniente protegerlos con el fin de conservar salvaguardar la resiliencia del ser humano y del medio ambiente (ONU-AGUA, 2018).

### **2.3.2. Zonas con potencial de recarga hídrica**

Se define el termino de recarga como la incorporación de agua a un acuífero procedente de fuera del contorno que lo limita, la recarga se genera a partir de la condensación del agua de las nubes, teniendo como resultado la lluvia, sin embargo, dentro de una cuenca hidrográfica el agua aportante a estos ríos se va a dar por procesos de infiltración o esorrentía. Las zonas donde existe un alto potencial de recarga son sitios donde la capacidad de infiltración es alta y donde el coeficiente de escurrimiento es mayor (Custodio, 1998).

La expresión matemática para determinar el potencial de recarga hídrica de una zona es la siguiente:

$$ZR = [0,27(Pend) + 0,23(Ts) + 0,12(Tr) + 0,25(Cve) + 0,13(Us)] \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

ZR: Zona de recarga

Pend: Pendiente

Ts: Tipo de suelo

Tr: Tipo de roca

Cve: Cobertura vegetal permanente

Us: Usos del suelo

A continuación, en la tabla 12 se presentan los rangos para la clasificación del mapa de Zonas de potencial Recarga Hídrica

**Tabla 12.**

*Potencial de recarga hídrica*

<b>Posibilidad de recarga</b>	<b>Rango</b>
Muy alta	4,1 - 5
Alta	3,5 - 4,09
Moderada	2,6 - 3,49
Baja	2 - 2,59
Muy baja	1 - 1,99

Fuente: “Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba” (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

Los factores propuestos en la “Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua” (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009) para determinar las zonas de recarga hídrica son:

### **2.3.2.1. Pendiente y microrrelieve**

El relieve de manera general puede clasificarse en tres grupos: cóncavos en donde el agua se acumula en el lugar más bajo y empieza su desplazamiento horizontal, planos y semiplanos donde existe un mayor tiempo de concentración dando como resultado un mejor proceso de infiltración y recarga hídrica, y convexos en donde el agua sigue varias trayectorias acelerando los procesos de erosión del suelo y disminuyendo la recarga. De la misma manera teniendo en consideración la pendiente, las zonas donde existe mayor pendiente debido a la escorrentía superficial se modifican las condiciones del suelo, mientras que en lugares con pendientes suaves se favorece la infiltración. A continuación, en la tabla 13 se presenta la ponderación de acuerdo a la pendiente y microrelieve:

**Tabla 13.**

*Potencial de recarga hídrica según su pendiente y relieve*



Microrelieve	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Plano a casi plano, con o sin rugosidad	0 - 6	Muy alta	5
Moderadamente ondulado o cóncavo	6 - 15	Alta	4
Ondulado/cóncavo	15 - 45	Moderada	3
Escarpado	45 - 65	Baja	2
Fuertemente escarpado	> 65	Muy baja	1

Fuente: “Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba” (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

### 2.3.2.2. Tipo de suelo

El análisis de los tipos de suelo es muy importante para conocer la capacidad de infiltración que tiene el suelo, ya que este es un factor importante para la determinación de zonas de recarga, los aspectos que se deben tener en consideración son: el fisuramiento, la porosidad, el tamaño de partículas y la textura. A continuación, en la tabla 14 se presenta la ponderación de acuerdo al tipo de suelo.

**Tabla 14.**

*Potencial de recarga hídrica según su tipo de suelo*

Textura	Posibilidad de recarga	Ponderación
Suelos Franco arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios	Muy alta	5
Suelos francos, con partes iguales de arena, limo y arcilla	Alta	4
Suelos franco limosos, con partículas de tamaño medio a finas	Moderada	3
Suelos franco arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas	Muy baja	1

Fuente: “Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo

Turrialba” (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

### 2.3.2.3. Cobertura vegetal permanente

La cobertura vegetal es otro de los factores que determina el potencial de recarga que tiene una zona. A diferencia de los suelos desnudos, en donde se encuentra una mayor concentración de cobertura vegetal existe una disminución en la velocidad de escurrimiento, por lo que el tiempo de retención es mucho mayor, permitiendo que exista una mayor infiltración y disminuya la probabilidad de erosión. Es por esto que las coberturas vegetales que son permanentes representan zonas con muy alta probabilidad de infiltración, mientras que las que tienen un menor porcentaje de porcentaje de cobertura vegetal permanente son consideradas de muy baja posibilidad de recarga. A continuación, en la tabla 15 se presenta la ponderación de acuerdo al tipo de suelo.

**Tabla 15.**

*Potencial de recarga hídrica según su tipo de cobertura vegetal permanente*

Cobertura vegetal permanente (porcentaje)	Posibilidad de recarga	Ponderación
> 80	Muy alta	5
70 - 80	Alta	4
50 - 70	Moderada	3
30 - 50	Baja	2
< 30	Muy baja	1

Fuente: “Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba” (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

### 2.3.2.4. Tipo de roca

La evaluación del tipo de roca permite determinar si las fuentes de recursos hídricos dentro de una cuenca son del tipo superficial en el caso de que la roca sea poco permeable, o profunda de aguas subterráneas formando acuíferos para las zonas donde la roca sea muy permeable. Las características que se evalúan para saber si un tipo de roca tiene mayor o menor potencial de

recarga hídrica son: la porosidad y permeabilidad. Las rocas que favorecen la recarga corresponden a las suaves con macroporos, fallas y fracturas. A continuación, en la tabla 16 se presenta la ponderación de acuerdo al tipo de roca.

**Tabla 16.**

*Potencial de recarga hídrica según su tipo de roca.*

<b>Rocas</b>	<b>Posibilidad de recarga</b>	<b>Ponderación</b>
Rocas muy permeables, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados.	Muy alta	5
Rocas permeables constituidas por agregados medianos o cristales, con poros interconectados	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, con una regular conexión entre poros	Moderada	3
Rocas duras, poco permeables, moderadamente compactadas.	Baja	2
Rocas muy duras, impermeables, cementadas o compactadas	Muy baja	1

Fuente: “Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba” (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

### **2.3.2.5. Uso del suelo**

Esta variable es una de las más cambiantes, debido a los ciclos edafológicos de las especies y a la dinámica de los sistemas productivos de los humanos. Por este motivo se ha buscado clasificar los usos que se le da al suelo, los criterios que se han considerado es que existen cultivos o especies que afectan las características del suelo, favoreciendo procesos como la evaporación, la compactación y el escurrimiento superficial de aguas residuales de procesos de agricultura y ganadería, dificultando la recarga. A continuación, en la tabla 17 se presenta la ponderación de acuerdo al tipo de suelo.

**Tabla 17.**

*Potencial de recarga hídrica según su el uso del suelo*

Uso del suelo	Posibilidad de recarga	Ponderación
Bosques nativos donde se ven los estratos: árboles, arbustos y hierbas	Muy alta	5
Sistemas agroforestales, bosques plantados	Alta	4
Terrenos cultivados con obras de conservación del agua	Moderada	3
Terrenos cultivados sin obras de conservación del agua	Baja	2
Terrenos agropecuarios intensivos	Muy baja	1

Fuente: “Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba” (Matus, Faustino, & Jiménez, 2009).

### 2.3.3. Caudal de la cuenca

El caudal en una red de drenajes esta dado por el agua que escurre de la precipitación de manera superficial o subsuperficial, a una ligera profundidad, la cual tiene su acumulación a medida que se desplaza de manera horizontal por la pendiente de la cuenca hasta llegar al cauce principal (Gonzalez & Ortegon, 2016). Para la determinación matemática se tiene como referencia las ecuaciones del volumen promedio de precipitaciones anuales y el volumen escurrido para el mismo periodo, donde se debe tener en consideración el coeficiente de escorrentía, el área de la cuenca y la precipitación promedio anual, dando como resultado la siguiente expresión (Sandoval & Aguilera, 2014).

$$Q_o = \frac{31.71 * C * P * A}{10^6} \quad \text{Ec. 15}$$

El coeficiente de escorrentía está definido como el cociente entre el total de agua escurrida entre la precipitación durante el mismo periodo de tiempo y puede tomar valores comprendidos entre  $0 \leq C \leq 1$  (Guzmán, 2017).

$$C = \frac{E}{P} \quad \text{Ec. 16}$$

Para conocer el coeficiente de escorrentía general de una cuenca se debe aplicar el cálculo del coeficiente ponderado (Martínez, 2005).

$$C_p = \frac{C_1 * A_1 + C_2 * A_2 + C_3 * A_3 + \dots + C_n * A_n}{A_t} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde el coeficiente ponderado representa la sumatoria de el coeficiente de una superficie de un ecosistema por su área dividido entre el área total de la cuenca

### 2.3.3.1. Caudal Ambiental

Es considerado al caudal mínimo de una cuenca, y representa a las condiciones mínimas de disponibilidad de agua que puede soportar un ecosistema para que las especies animales o vegetales puedan sobrevivir y se mantengan en equilibrio. La expresión matemática tiene en consideración la precipitación promedio durante un periodo de tiempo y el área sobre la que esta cae (Sandoval & Aguilera, 2014).

$$Q_{min} = \frac{P * A}{10^6} = Q_{eco} \quad \text{Ec. 18}$$

## 2.4. Hipótesis

El estudio del balance hídrico incluyendo la demanda antrópica servirá para comprobar el uso adecuado y sostenible del Recurso hídrico en la parroquia Angochagua.

## 2.5. Caracterización de variables y equipos de monitoreo

Para el cálculo del balance hídrico en cuencas hidrográficas a una escala estacional o mensual es necesario tener datos medidos en campo sobre la variación del volumen de agua de

las variables seleccionadas, de acuerdo a las necesidades de la zona. Para la zona de estudio se ha determinado tener mediciones de: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración; además se desea tener un balance considerando el consumo natural y antrópico por lo que se determinó utilizar información de consumo de agua concesionada dentro de la unidad hidrográfica.

### **2.5.1. Precipitación**

Normalmente la precipitación es la única fuente de ingreso de agua al suelo que tiene una cuenca. Las observaciones pueden obtenerse a partir de pluviómetros, entre más corto sea el tiempo se debe contar con un mayor número de equipos instalados, con el fin de recoger un valor más próximo y de mayor cobertura al real. El principal objetivo de un pluviómetro es proporcionar información de precipitación en un punto y la precipitación media de toda la zona de estudio (UNESCO, 1981).

#### **2.5.1.1. Pluviómetros**

Un pluviómetro está definido como un equipo que mide la cantidad de agua atmosférica que cae en un espacio de terreno, y en un tiempo determinado, descartando otras variables del ciclo hidrológico como infiltración, escurrimiento o evapotranspiración. Este equipo proporciona información de precipitación a una escala de tiempo larga o corta, dependiendo de su capacidad. La unidad de medida es en mm y es equivalente a litros de agua que caen en un metro cuadrado (OMM, 1994). La clasificación de pluviómetros para el monitoreo en una unidad hidrográfica es la siguiente:

- **Pluviómetros Ordinarios:** corresponden a equipos de medición diaria, además de proporcionar observaciones de nieve y estado de tiempo

- Pluviómetros Registradores: permite el monitoreo y control de ríos dentro de cuencas hidrográficas, la escala de tiempo depende de la capacidad del equipo y de la finalidad que persiga el proyecto
- Totalizadores: corresponde a pluviómetros analógicos de los cuales se puede obtener información acumulada mensual de precipitación



*Figura 9.* Pluviometro totalizador.

#### **2.5.1.2. Instalación de un pluviómetro**

Con el fin de tener resultados lo más reales se debe considerar los obstáculos, por lo que es conveniente ubicarlo en zonas abiertas, deberá tenerse en cuenta que la pendiente no sea tan fuerte y más aún si coincide con la dirección del viento, la boca del pluviómetro deberá estar lo más cerca al suelo para evitar la alteración de los resultados por la velocidad de viento y salpicaduras, la altura recomendable es de 30 cm. De no ser posible ubicarlo a esta altura se recomienda ubicarlo a 1 metro. Para la medición se puede utilizar una probeta graduada, una varilla graduada (Bocanegra & Cuervo, 2015).

Con el fin de tener información mensual acumulada dentro de las categorías de los pluviómetros se determinó utilizar 4 totalizadores y una estación pluviométrica registradora. A

pesar de que cada pluviómetro tiene una cobertura de 250 km<sup>2</sup> se ha decidido realizar la distribución de esta manera para poder monitorear valores de cuenca alta, media y baja (OMM, 1994)

### 2.5.1.3. Cálculo de la precipitación media sobre una zona

El valor promedio de precipitación sobre una cuenca, con variaciones pequeñas se la calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad \text{Ec. 19}$$

Donde P representa la precipitación media de la zona, n el número de estaciones y Pi representa el valor obtenido con cada equipo durante el mismo periodo de tiempo. Esta ecuación representa la media aritmética y permite utilizar la información proporcionada por todos los pluviómetros instalados (UNESCO, 1981). En la tabla 18 se presentan los coeficientes de evapotranspiración para cada cultivo

### 2.5.2. Evapotranspiración

La evapotranspiración está formada por dos componentes: la evaporación que se da sobre la superficie del terreno y la transpiración de las especies vegetales, los cuales respectivamente corresponden a un proceso físico y biológico (UNESCO, 1981). Estos procesos que ocurren simultáneamente son determinados por factores como la radiación solar, ya que en las primeras etapas de crecimiento de un cultivo este perderá agua en su mayoría por evaporación, pero cuando la planta cubre totalmente el suelo el proceso principal que genera una demanda de agua es la transpiración. Otros de los factores que determinan los niveles de agua evaporada son: la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad de viento debido a que estos



factores determinaran la cantidad de agua que se evapora sobre una superficie determinada. Las unidades de medida de la evapotranspiración son en milímetros (mm), la cual representa litros de agua que se evaporan sobre un metro cuadrado en una unidad de tiempo. La evapotranspiración abarca tres subclasificaciones determinadas por las condiciones del ambiente del cultivo (FAO, 2017).

- **Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>):** Definida como la evapotranspiración que se da en un cultivo de referencia con condiciones y características específicas, este término fue implementado con el fin de conocer la demanda de evapotranspiración de la atmosfera, independientemente de la especie plantada y del manejo que se le dé, este término descarta la influencia causada por los factores del suelo y las necesidades de agua para cada especie y su estado de crecimiento. Los factores que determinan los niveles de agua evaporada para esta categoría son únicamente parámetros climáticos (FAO, 2017).
- **Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>):** Corresponde a la evapotranspiración que tiene un cultivo en condiciones óptimas, teniendo en cuenta la fertilización en suelos amplios, con el suficiente espacio de desarrollo para cada planta y suficiente agua. Dando como resultado la evapotranspiración de una máxima producción bajo las condiciones climáticas existentes. La evapotranspiración de un cultivo se la puede calcular mediante datos atmosféricos determinando inicialmente la ET<sub>o</sub> para corregirlo mediante un coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) obteniendo así la evapotranspiración que se da en un cultivo específico (FAO, 2017).

**Tabla 18.**

*Coficiente de cultivo bajo condiciones estándar*

Especie	Coefficiente de cultivo
<b>Pajonal</b>	0,9
<b>Aliso</b>	0,97
<b>Pastizal</b>	0,95
<b>Pino</b>	1,15
<b>Polylepis</b>	1,12
<b>Cultivo promedio</b>	1,05

Fuente: "Evapotranspiración del cultivo "Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos"" (FAO, 2017).

- **Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET<sub>caj</sub>):** Los factores que obligan a calcular este tipo de evapotranspiración son los que limitan el crecimiento de la especie en condiciones óptimas como: presencia de plagas, enfermedades a la planta, salinidad o baja fertilidad del suelo y el exceso o déficit de agua. Estos valores disminuirán considerablemente la evapotranspiración de la planta aun en condiciones estándar, debido a la poca oxigenación de la planta, reduciendo la transpiración. Se lo calcula mediante un coeficiente de estrés hídrico (K<sub>s</sub>) aplicado a la evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar, o se puede ajustar directamente el K<sub>c</sub> con los limitantes que presente el cultivo (FAO, 2017).

### 2.5.2.1. Método del Tanque evaporímetro

Existen dos tipos de tanque evaporímetros clasificados por la FAO, los tanques de tipo A los cuales deben ser ubicados sobre una plataforma de 15 cm sobre el suelo, y los tanques de Colorado que deben ser enterrados en el suelo. Estos equipos permiten medir la cantidad de agua que se ha evaporado mediante observaciones del cambio de nivel dentro de un tanque circular. Estos tanques poseen un gancho y una mira con los cuales se puede determinar la cantidad de agua que ha disminuido en un periodo de tiempo. Además, integran en sus

mediciones alteraciones por efecto de la radiación solar, la velocidad de viento y la humedad relativa del ambiente, por lo que es conveniente realizar un ajuste teniendo en cuenta estas variables (FAO, 2017). La expresión matemática para conocer la evapotranspiración de referencia es:

$$ET_o = K_p E_{pan} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde la evapotranspiración de referencia es igual al coeficiente del tanque evaporímetro por la evaporación del tanque evaporímetro

Para el cálculo del coeficiente del tanque evaporímetro se deben tener en cuenta los factores ambientales que alteran los resultados obtenidos con el tanque. Dentro de las ecuaciones propuestas por la FAO en “Evapotranspiración del cultivo "Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (FAO, 2017), la que aplica para el caso de estudio es la que hace referencia a los tanques de clase A situada en cultivo verde circundante (FAO, 2017).

$$K_p = 0,108 - 0.0286u_2 + 0.0422 \ln(Borde) + 0.1434 \ln(HR_{media}) - 0,000631[\ln(Borde)]^2 * \ln(HR_{media}) \quad \text{Ec. 21}$$

Donde  $K_p$  es el coeficiente del tanque,  $U_2$  es la velocidad de viento promedio,  $HR_{media}$  es la humedad relativa media (%),  $Borde$  es la distancia al borde de la superficie del cultivo o pasto (FAO, 2017).

### 2.5.3. Infiltración

La infiltración corresponde a un factor importante del ciclo hidrológico el cual puede darse teniendo en cuenta la permeabilidad o capacidad de infiltración del suelo, el tiempo de retención

en una superficie, la cual estará relacionada a la pendiente, además del tipo de cultivo, humedad del ambiente, velocidad de viento, horas de radiación solar y temperatura media en el ambiente. Pero principalmente el factor que determina la cantidad de agua infiltrada en una parcela es el régimen de riego o de lluvias de la zona. Los procesos que se dan durante la infiltración son: la retención como humedad en el suelo de acuerdo a la capacidad de almacenamiento que este posea, alimentación a acuíferos subterráneos dependiendo de las características del tipo y uso del suelo, roca, pendiente, cobertura vegetal y finalmente el escurrimiento subsuperficial, el cual posteriormente alimentara al cauce principal.

Algunas de las características que afectan particularmente el proceso de infiltración son principalmente causados por la cantidad y calidad de lluvia, la cual cae sobre una superficie. A menudo las gotas de lluvia contienen sales y material en suspensión las cuales obstruyen los poros del suelo afectando su composición, entre más intensas y permanentes sean las lluvias se produce su saturación en menor tiempo destruyendo la estructura superficial del suelo (Duarte & Diaz, 2005).

Para la aplicación de métodos directos es necesario determinar zonas representativas de donde se necesite obtener información, es en milímetros (mm) teniendo en cuenta que un mm representa un litro por metro cuadrado ( $L/m^2$ ) los equipos utilizados para obtener información precisa son lisímetros de drenaje (Duarte & Diaz, 2005).

#### **2.5.4. Escurrimiento**

Se denomina como escurrimiento al desplazamiento en función de la pendiente por la gravedad que tiene el agua. El escurrimiento superficial se da particularmente cuando un suelo se encuentra saturado o la velocidad de saturación es demasiado rápida lo que impide que se dé

un proceso de infiltración. Con los mismos factores que afectan la infiltración, pero de manera contraria se da la escorrentía superficial. Los recursos hídricos generados por procesos de escorrentía corresponden a la suma del caudal superficial y subsuperficial acumulado en la parte baja de una cuenca hidrográfica hasta unirse al cauce principal. Existen lisímetros que de acuerdo al diseño estructural del mismo, ayudan en la medición del escurrimiento superficial y al cálculo del balance hídrico. Las unidades de medida son en mm teniendo en cuenta que la unidad representa un litro por metro cuadrado (Duarte & Diaz, 2005).

### 2.5.5. Lisímetro

Es un recipiente cubico o cilíndrico galvanizado y hueco de 1 m<sup>2</sup> cuya altura depende de las características de las raíces del cultivo, debe encontrarse descubierto. Con el propósito de tener la compactación original del suelo es recomendable instalarlo sin remoción de suelo. Para su instalación debe tenerse en cuenta puntos específicos representativos de la zona, pendientes suaves y de preferencia que se encuentren sobre el cultivo que se desea observar (Cajamarca, 2017). Dentro de la clasificación de los lisímetros se tiene los siguientes:

- **Lisímetro volumétrico:** estos equipos también llamados de drenaje poseen un recipiente el cual está conectado a la salida de agua de la caja lisimétrica, en su mayoría son del tipo analógicos. Dentro de esta clasificación se los puede subdividir en con succión o sin succión, la diferencia entre estos dos es que como su nombre lo indica en los lisímetros con succión se extrae el agua de los recipientes mediante un mecanismo diseñado para este propósito, mientras que los que los otros no (Cisne, 2017).
- **Lisímetro de pesada:** los lisímetros de pesada son mucho más costosos que los volumétricos ya que además de poder medir la cantidad de agua que genera el caudal de escorrentía permite

realizar observaciones de evapotranspiración debido a que se encuentra apoyado sobre un sistema hidráulico o en ocasiones una balanza de precisión (Vasquez, 2013)

#### **2.5.6. Estación meteorológica**

El objetivo de una estación meteorológica es obtener datos atmosféricos en un intervalo de tiempo determinado, los cuales son almacenados por la estación para posteriormente ser transferidos a un sistema computacional. La información que proporcionan son velocidad y dirección de viento mediante un anemómetro, presión atmosférica mediante un barómetro, temperatura y humedad, lluvia medido con un pluviómetro (Davis Instruments, 2014).

## CAPITULO 3

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Parámetros morfométricos

Estos parámetros permiten conocer la relación que existe entre la cobertura vegetal, la regulación hídrica y el manejo que se le da a la microcuenca. Los parámetros a calcular son los siguientes:

1. Área de la microcuenca
2. Tipo de descarga
3. Pendiente de la microcuenca
4. Factor de forma
5. Coeficiente de circularidad
6. Densidad de corriente
7. Cota máxima y mínima del río
8. Pendiente del río
9. Tiempo de concentración

#### 3.2. Identificación de uso y cobertura de suelo

El proceso de actualización de cartografía de uso de suelo se la realizo en cuatro pasos:

1. Muestreo

2. Tratamiento a las imágenes satelitales
3. Clasificación y la post clasificación
4. Validar los resultados.

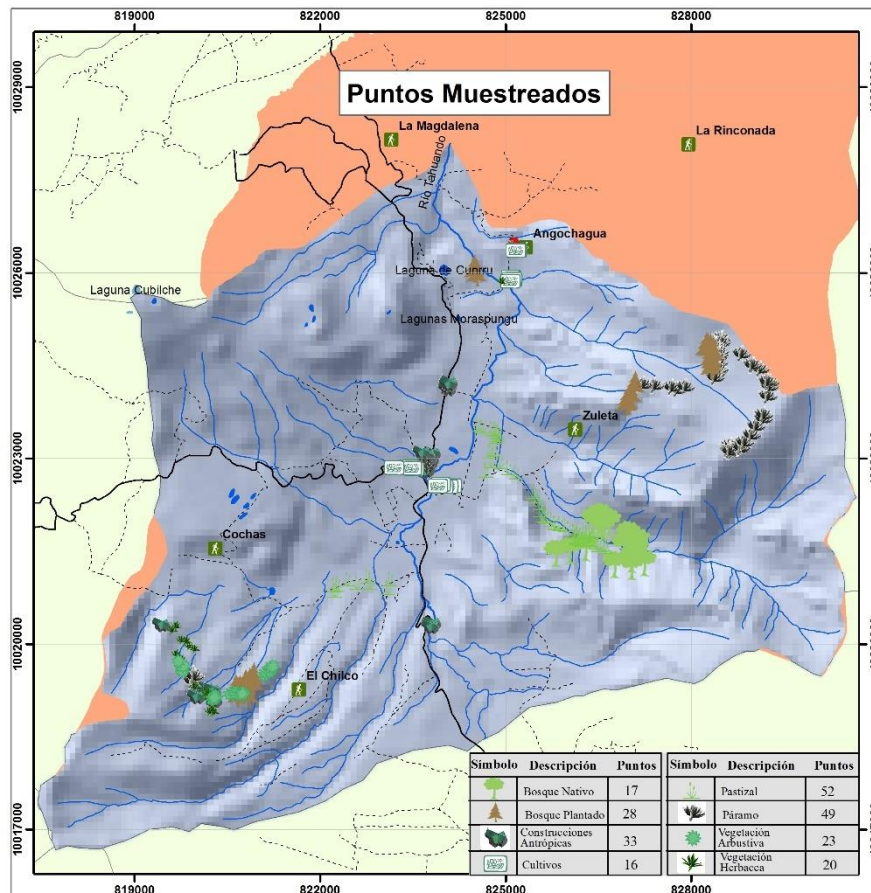
### **3.2.1. Muestreo**

El muestreo en campo es el levantamiento de puntos GPS Garmin 17 N de las coberturas propuestas por el documento “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional 1:25000 – Sistemas productivos” (IEE, 2014), de acuerdo al nivel II, las coberturas son: el páramo, bosque nativo, bosque plantado, cultivos, construcciones antrópicas, pastizal, vegetación arbustiva y vegetación herbácea.

El número de muestras necesarias para cada cobertura fue de 5 mínimo en base a la ecuación 2, sin embargo, se decidió tomar más muestras para homogenizar las áreas de entrenamiento de cada una.

A continuación, en la figura 10 se presenta la distribución espacial de los puntos muestreados para cada clase.





**Figura 10.** Puntos muestreados.

Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

### 3.2.2. Preparación de la imagen satelital

En cuanto a las imágenes satelitales se utilizó una imagen PlanetScope nivel 3B del 2017, se realizó un ajuste mediante un factor para transformar los niveles digitales (ND) en información sobre la atmosfera (TOA). Esta transformación se la realiza por que los sensores satelitales comprimen la información obtenida de la radiancia de los objetos y en este proceso se simplifica el valor que posee cada pixel volviendo más fácil de almacenar a la imagen satelital. Por lo que es necesario convertir la información que viene en las imágenes satelitales mediante un factor multiplicativo que se encuentra en los metadatos de la misma. La escena que cubre el área de estudio está compuesta por tres imágenes de las cuales se debe realizar la

transformación de ND a TOA para cada una de las bandas. A continuación, se presenta la tabla 19 con los factores de conversión de cada banda

**Tabla 19.**

*Factor de conversión de ND a TOA*

<b>Imagen</b>	<b>Banda</b>	<b>Factor</b>
<b>Imagen 1</b>	Banda 1	$2.03574335 \cdot e^{-5}$
	Banda 2	$2.1570491 \cdot e^{-5}$
	Banda 3	$2.40933754 \cdot e^{-5}$
	Banda 4	$3.62030724 \cdot e^{-5}$
<b>Imagen 2</b>	Banda 1	$2.03677131 \cdot e^{-5}$
	Banda 2	$2.15813832 \cdot e^{-5}$
	Banda 3	$2.41055415 \cdot e^{-5}$
	Banda 4	$3.62213534 \cdot e^{-5}$
<b>Imagen 3</b>	Banda 1	$2.03790309 \cdot e^{-5}$
	Banda 2	$2.15923157 \cdot e^{-5}$
	Banda 3	$2.41177528 \cdot e^{-5}$
	Banda 4	$3.62397022 \cdot e^{-5}$

Fuente: Metadatos de la imagen satelital

Finalmente se realizó un mosaico de las tres imágenes para tener una sola escena, además se realizó un recorte del nuevo ráster generado con el perfil de la zona de estudio, para que el tiempo de procesamiento sea mucho más rápido.

### **3.2.3. Clasificación y post clasificación de la imagen satelital**

Para la etapa de entrenamiento se utilizaron las muestras tomadas en campo creando regiones de interés (ROI) para cada clase. Esta herramienta tiene la particularidad de permitir al usuario importar o dibujar sobre el mapa la información de manera vectorial, ya sean puntos líneas o polígonos.

El método utilizado para la clasificación fue “Maximum Likelihood” el cual determina la probabilidad de que el ND de un pixel pertenezca a una determinada clase. Este procedimiento se aplica para todos los pixeles de la imagen comparándolas con cada una de las clases y se le

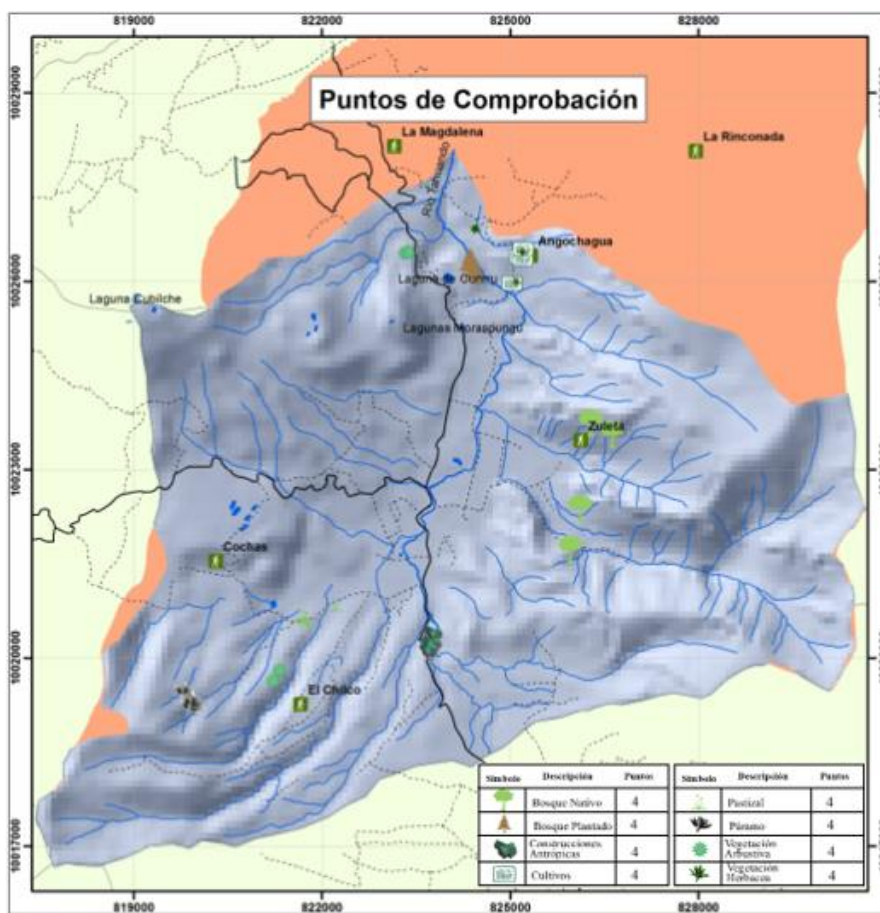
asigna el valor de la clase a la que tenga mayor probabilidad de pertenencia (Quitós, 2009). Este método de clasificación además de ser el que proporcione resultados más cercanos a la realidad, tiene la particularidad de que evalúa los grados de variancia dentro de una clase, por lo tanto, presenta una exactitud más alta que otros clasificadores (GLOBESAR, 2008).

La escala normalizada de trabajo para una imagen satelital de tres metros es de 1:12000, sin embargo, aplicando la ecuación 1, la unidad mínima mapeable es de 0.2304 ha la cual va a ser la parcela mínima que podrá visualizarse en la imagen.

Para las operaciones de post clasificación las herramientas que dieron resultados más adecuados son: Sieve Classes y posteriormente un filtro de mayoría. La herramienta sieve classes permite eliminar pixeles aislados, teniendo en cuenta los criterios de que exista conectividad entre los ocho pixeles más cercanos, y que el tamaño mínimo sea de cuatro. Para el filtro de mayoría se utilizó un kernel de 9\*9, el cual sirve para homogenizar las áreas entre clases.

#### **3.2.4. Validación de resultados**

De la muestra tomada inicialmente se utilizaron cuatro puntos por cada clase que no fueron tomados en cuenta para la clasificación. A continuación, en la figura 11 se presenta los puntos que fueron utilizados para verificar los resultados de la clasificación



**Figura 11** Puntos de Comprobación.

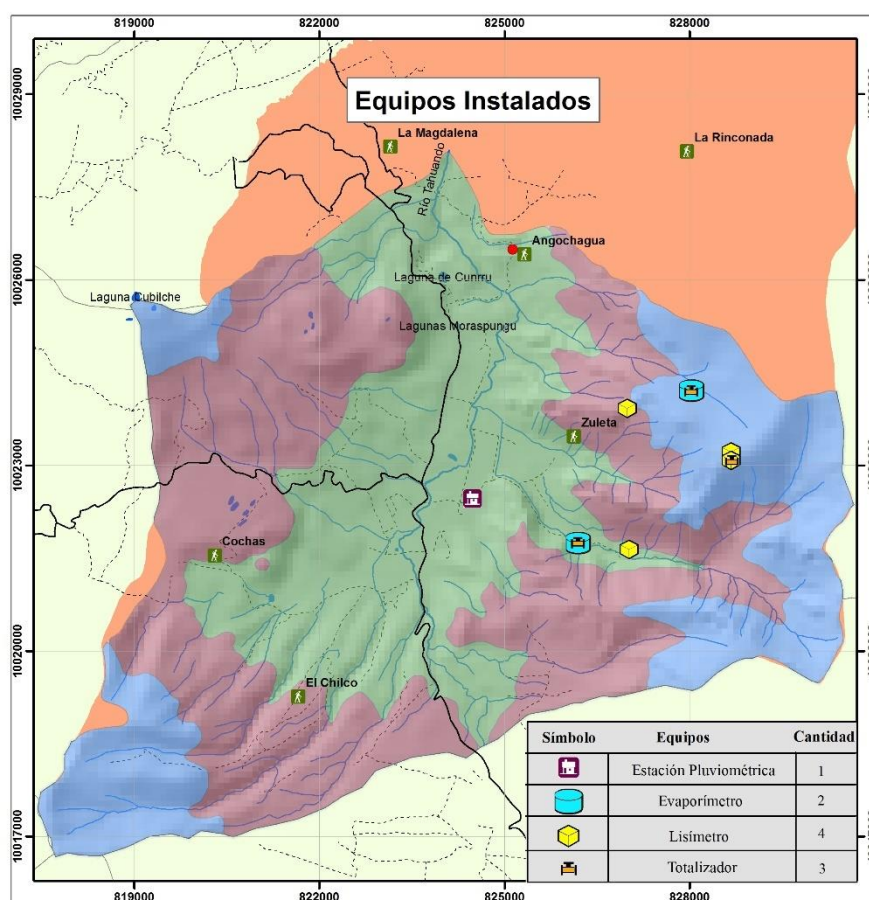
Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

### 3.3. Cuantificación del balance hídrico con demanda natural

Para la determinación del balance hídrico tomando en cuenta la oferta y demanda antrópica se instalaron: tres totalizadores, dos evaporímetros tipo A, cuatro lisímetros para infiltración y escorrentía, y una estación meteorológica pluviométrica. Los totalizadores son analógicos y se encuentran distribuidos en la parte alta, media y baja. Los evaporímetros de tipo A se encuentran ubicados en la parte baja de la cuenca y el segundo se encuentra entre la cuenca alta y media, debido a su precisión y alcance. Los lisímetros fueron instalados en la zona de páramo la cual corresponde a la cuenca alta, el siguiente se encuentra en una zona de bosque plantado, uno en pastizal y el ultimo en cobertura de bosque nativo. La estación pluviométrica se

encuentra instalada en la parte suroeste de la cuenca, con el fin de obtener información de las características atmosféricas características de la zona de estudio. La instalación de los equipos tiene como propósito recolectar datos de precipitación, infiltración, escorrentía, y evapotranspiración.

A continuación, en la figura 12 se presenta la ubicación de los equipos



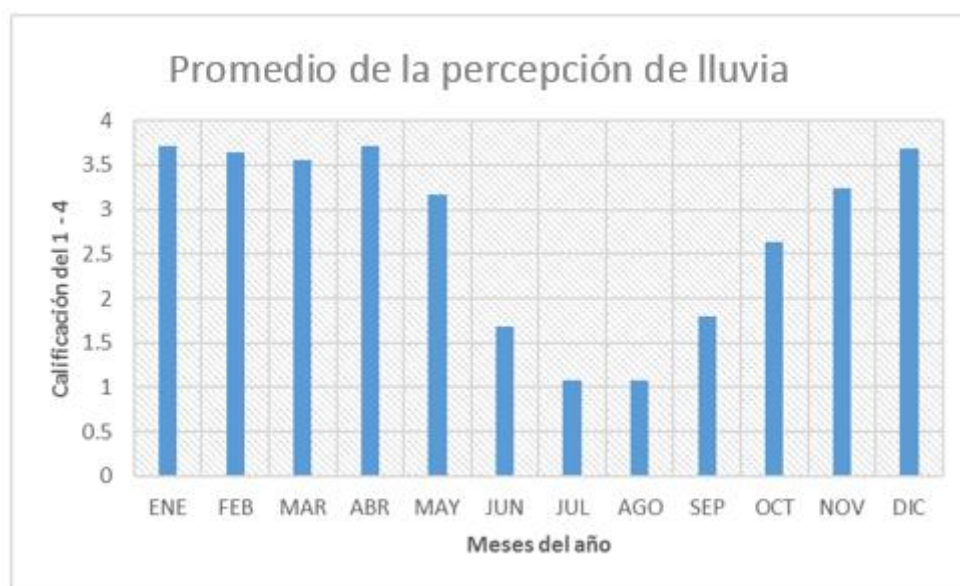
**Figura 12** Ubicación de equipos.

Fuente: SNI; IGM (2013); Junta Parroquial Angochagua

### 3.3.1. Régimen de lluvia

La precipitación anual oscila entre los 1000 mm a 2000 mm según “Plan de desarrollo y ordenamiento territorial” (Sandoval H. , 2015). Los meses de invierno son desde febrero hasta mayo en donde existe un aumento en los niveles de precipitación en la zona de estudio. La

deficiencia formal Con el fin de conocer la realidad actual en base a la experiencia de moradores de la zona se realizó una encuesta a 50 personas para conocer los meses en donde existe mayor presencia de lluvias. Los meses con valores iguales o cercanos a 4 son los meses donde se presenta más lluvia y los valores cercanos a 1 corresponden a los meses secos. Los resultados de esta encuesta se presentan en la figura 13.



**Figura 13** Meses de mayor precipitación y sequía.

Elaboración: Yáñez M, 2019

Fuente: Moradores de la Parroquia Angochagua

El procesamiento de esta información permite ubicar que los meses de precipitación regular son de febrero a mayo. Las referencias bibliográficas indican que se debe instalar tres totalizadores en cada uno de los niveles de la cuenca y una estación meteorológica con el fin de especializar los niveles de precipitación, teniendo en cuenta la variable altitudinal en base al estudio de “Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional” (Espinoza, y otros, 2010).

### 3.3.2. Régimen de evapotranspiración

La determinación de la evapotranspiración de la cuenca se la realizó mediante la medición

de dos evaporímetros y una estación meteorológica. La ubicación de los evaporímetros fue propuesta bajo el criterio de que se encuentren bien distribuidos entre las coberturas vegetales y los niveles de cuenca. Los datos obtenidos con la estación meteorológica tienen la finalidad de proporcionar datos de humedad relativa y velocidad de viento de la zona para poder ajustar la evaporación del tanque y tener la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), posteriormente se ajustó mediante los coeficientes de cultivo (k<sub>c</sub>) para tener como resultado la evapotranspiración de un cultivo de referencia bajo condiciones estándar.

### **3.3.3. Régimen de infiltración**

Para medir la cantidad de agua que se infiltra en cada una de las zonas que funcionan como sistemas productivos, se decidió ubicar los lisímetros de la siguiente manera: dos en páramo, uno en bosque plantado, uno en bosque nativo y uno en pastizal. Teniendo en consideración esta distribución debido a que en las coberturas faltantes como son vegetación arbustiva, y vegetación herbácea se presentan características similares a las que se tuvo en consideración para la instalación de los equipos. Además, otra de las variables determinantes para la instalación fue que la pendiente sea de tipo moderada. Para el diseño de los equipos se tuvo en consideración que cubra un metro cuadrado de superficie, con 60 centímetros de profundidad para que el agua obtenida por infiltración sea la sobrante del consumo de las especies vegetales (MECN - INB, 2015). Finalmente se buscó que tenga dos funcionalidades, medir la escorrentía y la infiltración

### **3.3.4. Régimen de Escorrentía**

Con el fin de conocer la cantidad de agua que sale del sistema se utilizó como variable de los mapas las zonas de recarga hídrica, ya que de acuerdo a su definición corresponden a zonas

homogéneas entre clases que aportan un caudal exterior a un acuífero, en este caso provenientes de ecosistemas en las que se tiene en cuenta al tipo de suelo, roca, cobertura vegetal, pendiente y uso del suelo (Rodríguez & Pérez, 2014). Por este motivo se tomó en consideración las zonas de recarga hídrica para la espacialización de a esorrentía. El tipo de medición fue directa mediante un lisímetro diseñado para medir esorrentía e infiltración.

### **3.3.5. Caudal de la cuenca**

Para la determinación del caudal general de la cuenca se tomó en consideración las variables infiltración y esorrentía y el periodo para el cual fueron propuestas las mediciones.

Sin embargo, con el fin de validar los resultados obtenidos se obtuvo un caudal calculado para el cual se utilizó información proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la estación meteorológica (M0105) al ser la más cercana a la cuenca y presentar características atmosféricas similares a la unidad hidrográfica del río Tahuando. Para la determinación del caudal calculado se utilizó la ecuación 15 donde el coeficiente de esorrentía fue ponderado teniendo en consideración el tipo de cobertura vegetal, el tipo de pendiente y la Taxonomía del suelo y para la intensidad de lluvia se utilizó información de la estación meteorológica de los años 2010 al 2015.

### **3.3.6. Zonas de recarga hídrica**

Para generar las zonas de potencial recarga hídrica se utilizó información en formato vector de tipo de suelo, roca, cobertura vegetal, pendientes, y uso de suelo asignándole las ponderaciones propuestas en el capítulo (2.3.2), con este nuevo campo se rasterizo cada shape y finalmente se utilizó la ecuación 14 en donde se introdujo la información de cada una de estas variables.



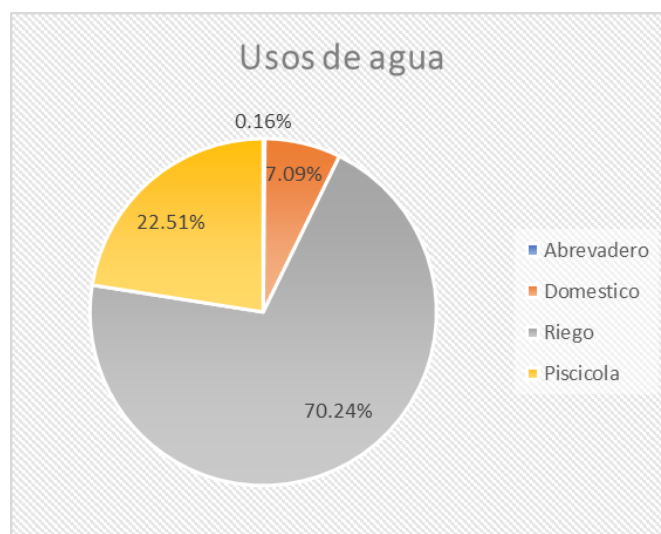
### **3.3.7. Balance hídrico con demanda natural**

Para obtener el balance hídrico de toda la cuenca, considerando las entradas y salidas naturales del sistema hidrológico, se rasterizó la información en formato vector y se utilizó la ecuación 4. Las zonas que se utilizaron para la asignación de los datos obtenidos en campo son los siguientes: se asignó la información de precipitación a los diferentes niveles de cuenca, la evapotranspiración al estar relacionada con las zonas que componen los sistemas productivos de la zona se utilizó la cobertura vegetal, finalmente se relacionó la información de escorrentía e infiltración con el mapa de zonas de potencial recarga hídrica.

### **3.4. Demanda Antrópica de agua e identificación de usos que tiene el recurso**

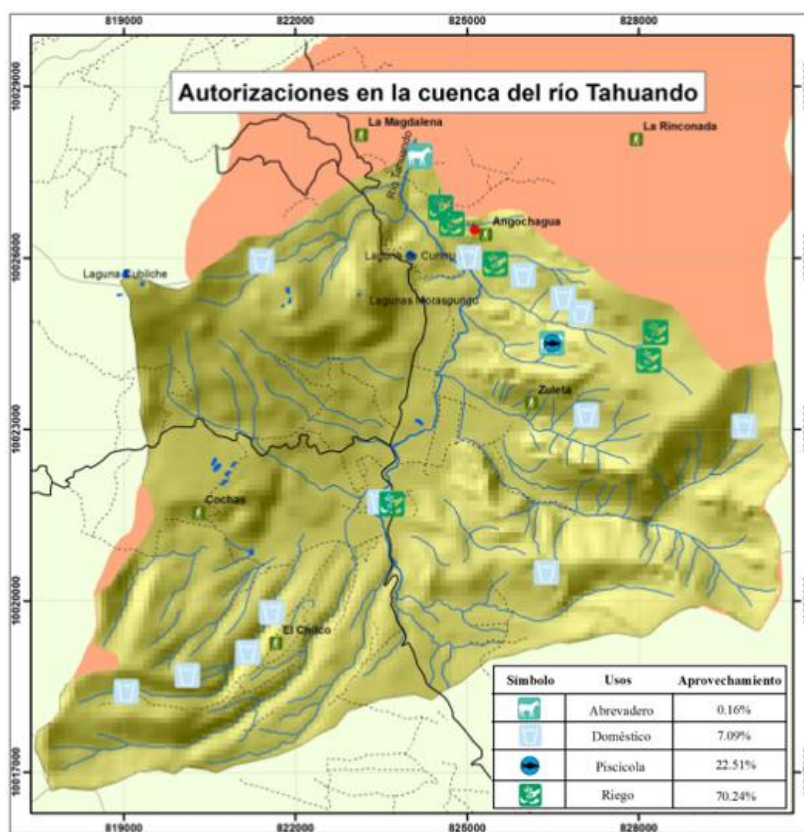
El registro de los puntos concesionados de agua generada por los ecosistemas dentro del territorio nacional lo realiza la Secretaría Nacional del Agua. La SENAGUA está encargada de la autorización del uso del recurso hídrico, además del registro y clasificación del tipo de uso y la cantidad de agua necesaria en las actividades catalogadas dentro del banco de autorizaciones.

Para el presente estudio se solicitó las autorizaciones actualizadas que estén registradas dentro de la Junta Parroquial Angochagua a la Demarcación Mira de la SENAGUA. Los 26 usos registrados dentro de la unidad hidrográfica perteneciente a Angochagua son: abrevaderos, doméstico, riego y piscícola. Y se detallan a continuación en la figura 14



**Figura 14.** Porcentaje de aprovechamiento de agua.

A continuación, se presenta la ubicación espacial de las concesiones autorizadas por la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA)



**Figura 15.** Ubicación de las autorizaciones de agua.

### 3.4.1. Estrés hídrico

Para la determinación del estrés hídrico se utilizó la ecuación 13 propuesta en el documento “Progresos en el nivel de estrés hídrico: valores de referencia mundiales para el indicador 6.4.2 de los ODS” (ONU-AGUA, 2018), donde la variable de extracción de agua dulce corresponde a las autorizaciones de consumo para los diferentes tipos de usos, la precipitación acumulada fue considerada como el total del recurso, y para la determinación del caudal ambiental se consideró la ecuación 18. Con el fin de poder espacializar estas variables se tomó como referencia la información cartográfica de los niveles de la cuenca.

## CAPITULO 4

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados

##### 4.1.1. Parámetros morfométricos de la microcuenca

La unidad hidrográfica posee una superficie de 88.99 km<sup>2</sup> clasificada como una cuenca mediana, con una pendiente escarpada de 31.09%, tiene una forma circular, ligeramente ensanchada con poca probabilidad de erosión, pero propensa a crecientes durante la época lluviosa, de acuerdo a la longitud de los cauces tiene una densidad de drenaje moderada, disminuyendo la probabilidad de que el suelo sea erosionable, con un tipo de descarga exorreica. En la tabla 20 se presenta la el resumen de los parámetros morfométricos de la cuenca de estudio

**Tabla 20.**

*Características de la cuenca*

<b>Parámetros morfométricos</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Clasificación</b>
Área de la microcuenca	88.99 km <sup>2</sup>	Clasificación mediana
Tipo de descarga	Exorreica	
Pendiente de la microcuenca	31.09%	Escarpada
Factor de Forma	0.54	Ligeramente ensanchada
Coefficiente de circularidad	1.31	circular

El rio Tahuando posee una longitud de 10.51 km y se encuentra distribuida a razón de 1.5 drenajes por km<sup>2</sup> su cota superior es de 3000 m y la inferior de 2680 m ambas ubicadas en la cuenca baja posee una pendiente de 3.05 % y un orden 5 de drenaje, además tiene una

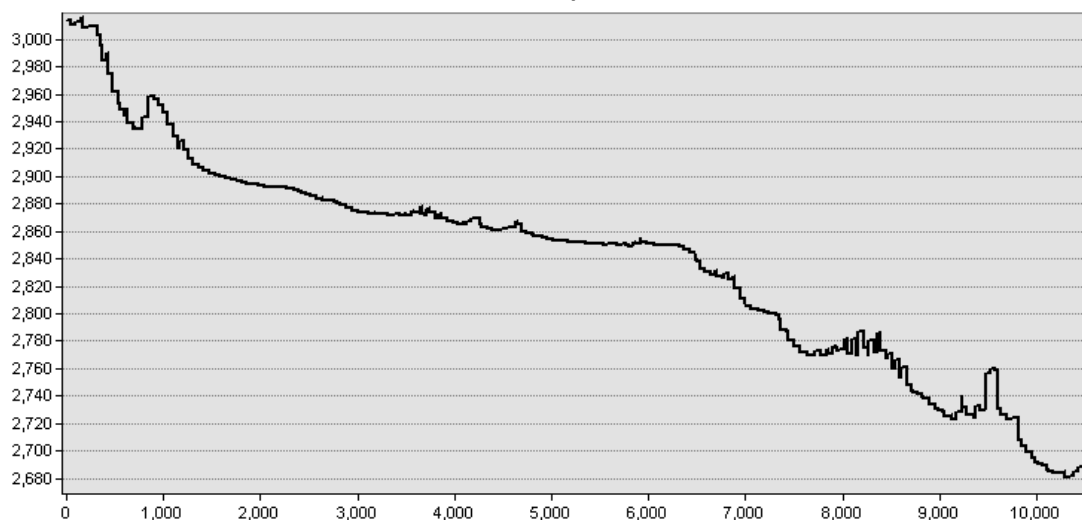
sinuosidad de 1.3 clasificándolo como moderado lo cual disminuye su velocidad. En la tabla 21 se presentan las características del río Tahuando

**Tabla 21.**

*Características del río Tahuando*

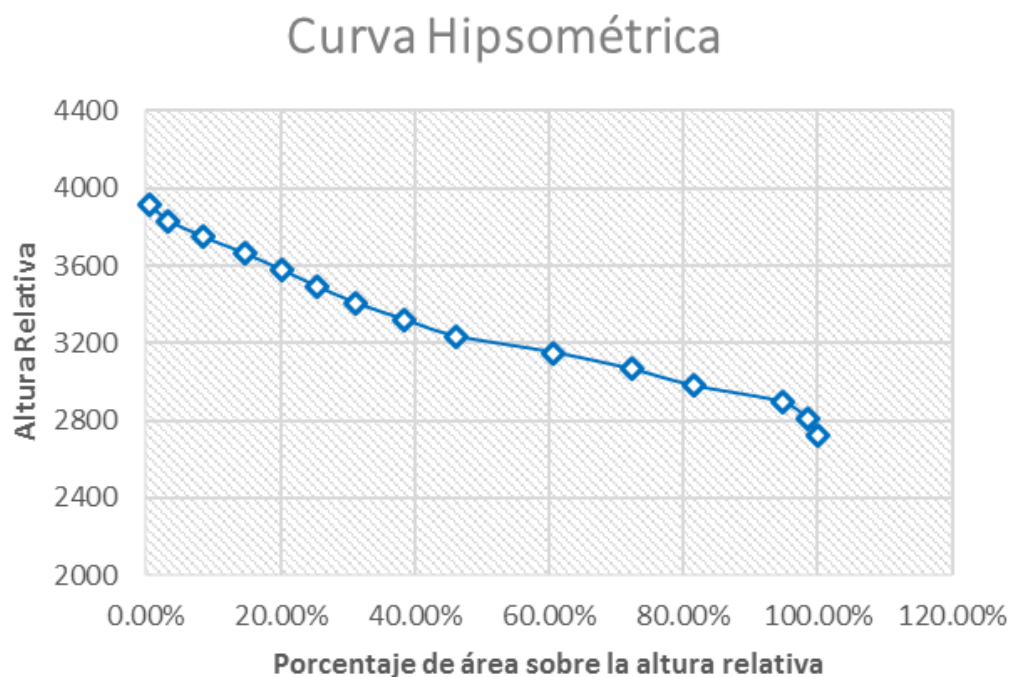
Parámetros morfométricos		
Parámetro	Valor	Clasificación
Densidad de corriente	1.52	1.52 drenajes por km <sup>2</sup>
Cota máxima del río Tahuando	3000 m	
Cota mínima del río Tahuando	2680 m	
Pendiente del cauce	3.05%	
Tiempo de concentración	3h 28min	

El perfil del río muestra que durante los primeros tres kilómetros tiene una pendiente del 4%, posteriormente los siguientes tres kilómetros la pendiente es mínima, casi plana, y finalmente su pendiente aumenta 5%.



**Figura 16** Perfil del río Tahuando.

Además, en el análisis de la altura relativa y el porcentaje de área sobre ella se tiene una curva hipsométrica con características similares a las de una cuenca en fase de madurez la cual se presenta en la figura 17, la cual se encuentra en equilibrio con respecto a los procesos de erosión o sedimentarios



**Figura 17.** Curva hipsométrica de la cuenca.

#### **4.1.2. Clasificación del Mapa de Uso y Cobertura del Suelo**

La clasificación de la imagen satelital para el Mapa de Uso y Cobertura del Suelo fue aplicado a las zonas de páramo, bosque nativo, pastizal, vegetación arbustiva, vegetación herbácea, bosque plantado, cultivos y construcciones, en la cual la matriz de confusión dio como resultado que 5 de los 32 puntos seleccionados al azar para la comprobación de la clasificación se encontraban en zonas a las que no pertenecían, por lo que el porcentaje de pixeles bien clasificados fue de 84.375% el cual se detalla en la figura 18. Sin embargo, una vez realizada la post clasificación solo uno de los pixeles perteneciente a pastizal se encontraba

confundido en la zona de vegetación herbácea.

Overall Accuracy = (27/32) 84.3750%  
Kappa Coefficient = 0.8207

Class	Ground Truth (Pixels)				
	bosq_nat	b_plant	construccione	cultivo	paramo
Unclassified	0	0	0	0	0
Bosque_nativo	3	1	0	0	0
Bosque_planta	1	3	0	0	0
Construccione	0	0	4	0	0
Cultivos	0	0	0	3	0
Páramo	0	0	0	1	4
Pastizal	0	0	0	0	0
V_arbustiva	0	0	0	0	0
V_herbacea	0	0	0	0	0
Total	4	4	4	4	4

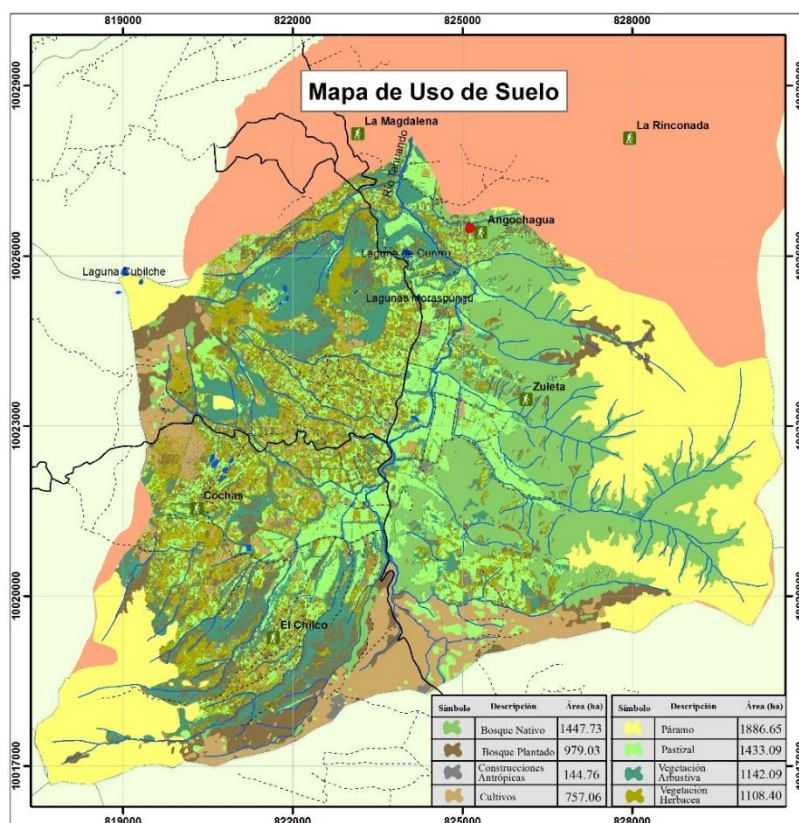
  

Class	Ground Truth (Pixels)			Total
	pastizal	v_arb	veg_herb	
Unclassified	0	0	0	0
Bosque_nativo	0	0	0	4
Bosque_planta	0	0	0	4
Construccione	0	0	0	4
Cultivos	0	0	0	3
Páramo	0	0	0	5
Pastizal	2	0	0	2
V_arbustiva	0	4	0	4
V_herbacea	2	0	4	6
Total	4	4	4	32

**Figura 18.** Matriz de confusión.

En cuanto a la extensión de las áreas clasificadas, la zona con mayor superficie fue la de páramo, con una extensión de 18.87 km<sup>2</sup> que representa el 21.20% de la cuenca, y la menor fue la zona de construcciones con un área de 1.45 km<sup>2</sup> que corresponde al 1.63% de la unidad hidrográfica.

La mayor parte de la cuenca alta se encuentra cubierta por zonas de páramo, en la cuenca media predomina la presencia de bosque nativo, mientras que en la parte occidental hay zonas de vegetación herbácea, plantaciones forestales, pastizales y cultivos, finalmente en la cuenca baja en su mayoría no existe la presencia de especies nativas y el mosaico de ecosistemas que presenta esta zona es de construcciones, pastizales, vegetación herbácea, vegetación arbustiva y cultivos. En la figura 19 se presenta el mapa de uso de suelo



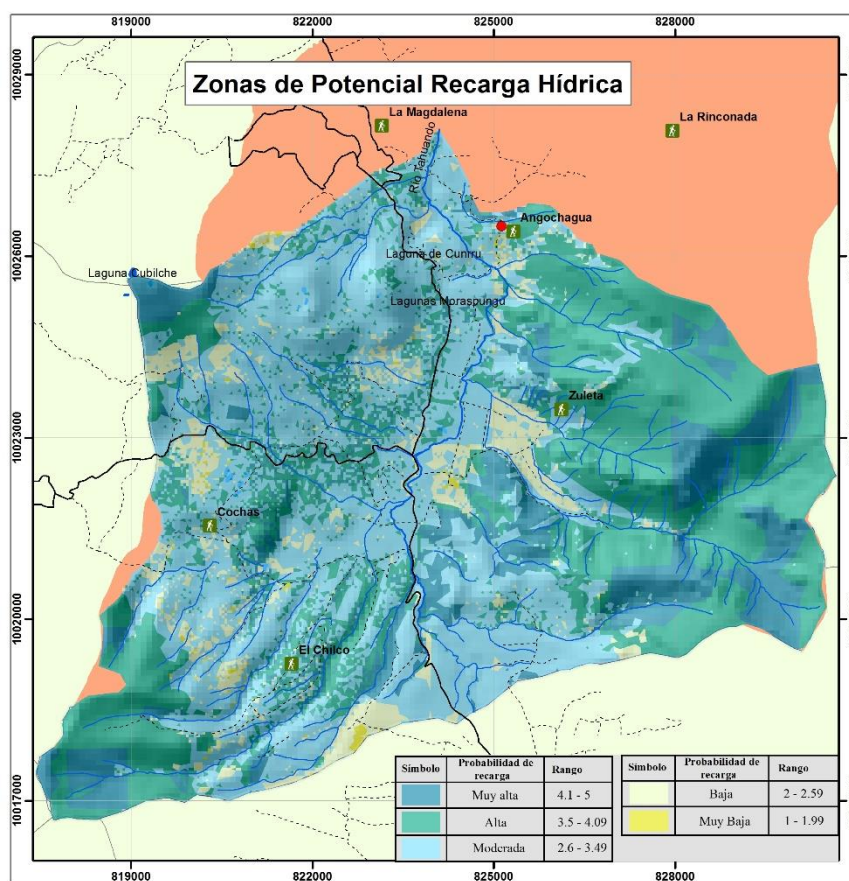
*Figura 19.* Mapa de Uso de Suelo.

#### 4.1.3. Zonas de Potencial Recarga Hídrica

La primera clase de las zonas potencial recarga hídrica considerada como de muy baja probabilidad se encuentran en ecosistemas de cultivos, pastizal y construcciones con una superficie de 0.36 km<sup>2</sup> que representa el 0.4 % del área total. La segunda zona tiene baja probabilidad de recarga, se encuentran principalmente en zonas de pastizal y en pequeñas áreas de cultivos, cubre una superficie de 6.63 km<sup>2</sup> igual al 7.45 % del total de la cuenca. La tercera categoría ya con una categorización de moderada probabilidad cubre en su mayoría zonas de bosque natural o plantaciones forestales, sin embargo, también existen áreas dentro de la cuenca baja donde se encuentra el centro de la población, es la superficie con mayor extensión dentro de las cinco zonas de recarga hídrica, tiene 37.73 km<sup>2</sup> que representan el 42.41 % del territorio.



La cuarta clase posee una alta probabilidad de recarga hídrica debido a que los lugares donde se encuentra ubicado son zonas naturales y de poca intervención, las coberturas principales que se encuentran en esta zona son las de bosque nativo y de páramo, posee una superficie de 31.79 km<sup>2</sup> que representa el 35.74 % de la cuenca. Finalmente, la última clase considerada como de muy alta probabilidad de potencial recarga hídrica, cubre principalmente zonas de páramo, sin embargo, se pueden identificar pequeños remanentes en cuenca baja, debido a que también existen suelos favorables para el proceso de infiltración y escurrimiento superficial, posee una extensión de 12.45 km<sup>2</sup> que representa el 14 % del territorio. A continuación, en la figura 20 se presentan las Zonas de Potencial Recarga Hídrica.



**Figura 20.** Zonas de Potencial Recarga Hídrica.

#### 4.1.4. Precipitación

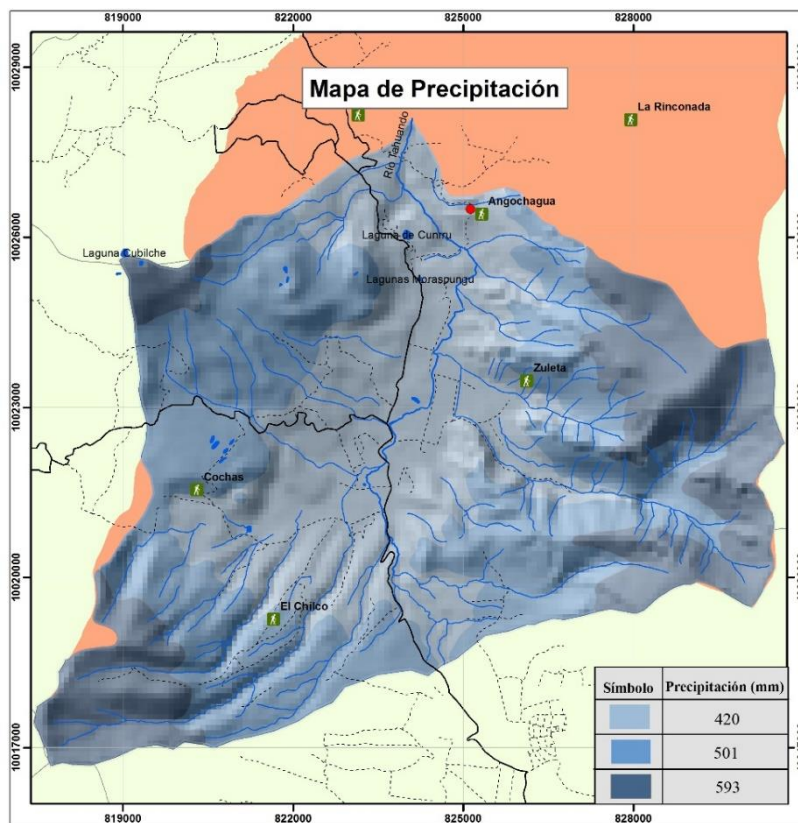
La precipitación tuvo variaciones desde 55.8 mm en la cuenca baja durante mes de febrero a 337.7 mm en la cuenca alta en la zona de páramo durante el mes de mayo. El régimen hídrico acumulado para la cuenca alta fue de 592.8 mm mientras que el menor valor se registró en la cuenca baja con 420.2 mm. La parte alta de la cuenca se encuentra cubierta principalmente por zonas de herbazal de páramo, arbustal siempreverde, bosque siempreverde montano alto del norte de la Cordillera Oriental de los Andes y existe la presencia de remanentes de bosque plantado. En la cuenca media los ecosistemas que se encargan de la regulación hídrica son: bosque siempreverde montano del norte de la Cordillera Oriental de los Andes, pastizales, zonas de plantaciones forestales y vegetación arbustiva. La cuenca baja se encuentra completamente cubierta de zonas intervenidas con presencia de cultivos, construcciones, pastizales, vegetación arbustiva y herbácea. En la tabla 22 se detallan las mediciones de precipitación

**Tabla 22.**

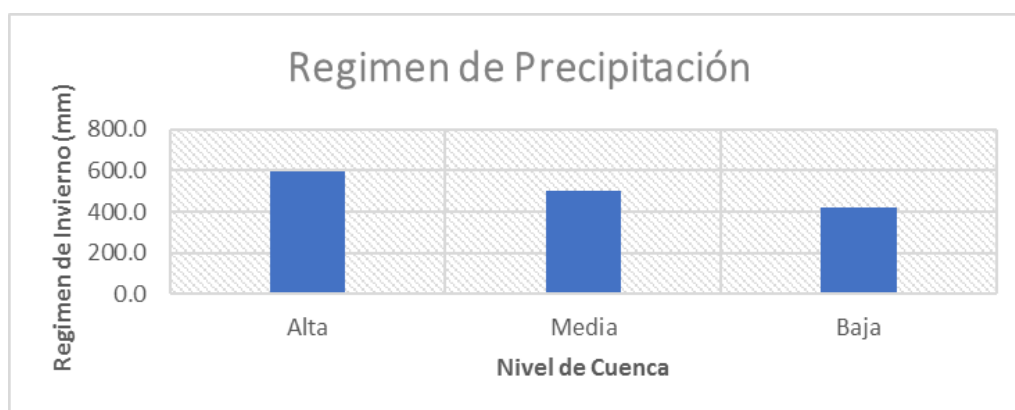
*Mediciones de precipitación*

Precipitación					
Nivel de Cuenca	Febrero (mm)	Marzo (mm)	Abril (mm)	Mayo (mm)	Régimen de lluvias (mm)
Alta	59.5	65.0	130.6	337.7	592.8
Media	57.0	62.0	96.8	284.8	500.7
Baja	55.8	43.8	121.3	199.2	420.2

Fuente: Yánez M, 2019



**Figura 21.** Régimen de precipitación.



**Figura 22.** Histograma del régimen de precipitación.

#### 4.1.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración fue espacializada mediante el Mapa de Uso y Cobertura de Suelo actualizado al 2017. La demanda de agua en función de la evapotranspiración tuvo un

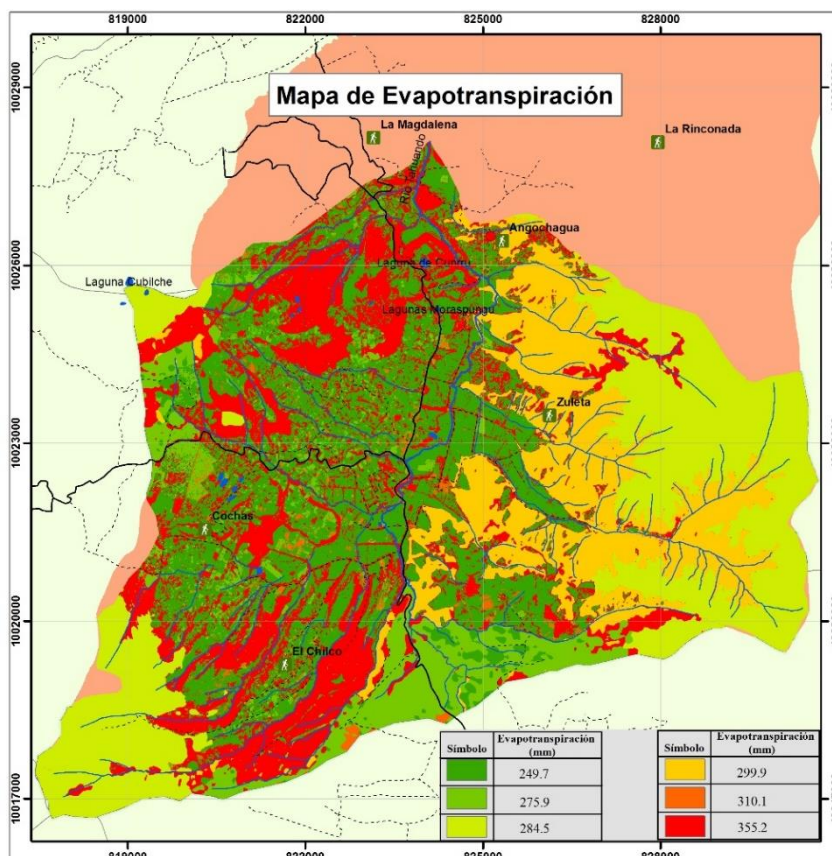
incremento de febrero a mayo, con valores que van desde 32.1 mm en los ecosistemas de páramo en febrero hasta 190.5 mm en mayo en los ecosistemas de bosque plantado. El consumo acumulado por la variable biofísica evapotranspiración, tuvo un mayor registro en las zonas de bosque plantado con 355.2 mm. En las zonas de construcciones antrópicas se tuvo en consideración únicamente la evaporación que se produjo. En la tabla 23 se presentan las mediciones de evapotranspiración.

En las zonas de bosque plantado existen especies de pino, polilepys, y eucalipto, la mayor parte se encuentra en la parte de la cuenca media, colindante con las zonas de páramo. El lugar que se encuentra mayormente intervenida por plantaciones forestales es la zona de páramo occidental, mientras que en el páramo oriental existen plantaciones de polilepys y pastizales. en la figura 23 se presenta el mapa del régimen de evapotranspiración

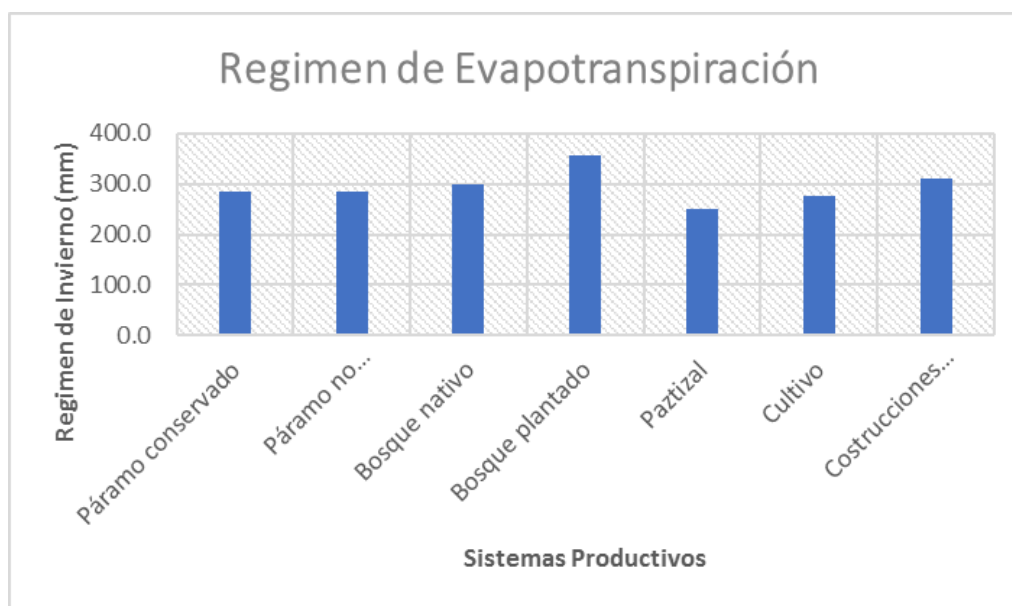
**Tabla 23.**

*Mediciones de evapotranspiración*

<b>Evapotranspiración</b>					
<b>Sistemas productivos</b>	<b>Febrero (mm)</b>	<b>Marzo (mm)</b>	<b>Abril (mm)</b>	<b>Mayo (mm)</b>	<b>Régimen de lluvias (mm)</b>
Páramo	32.1	59.6	40.1	152.6	284.5
Bosque nativo	35.7	70.2	65.4	128.6	299.9
Bosque plantado	40.1	74.5	50.1	190.5	355.2
Pastizal	33.9	62.9	42.3	110.5	249.7
Cultivo	37.4	69.5	46.8	122.2	275.9
Construcciones Antrópicas	36.9	72.6	67.6	133	310.1



**Figura 23.** Régimen de evapotranspiración.



**Figura 24.** Histograma del régimen de Evapotranspiración.

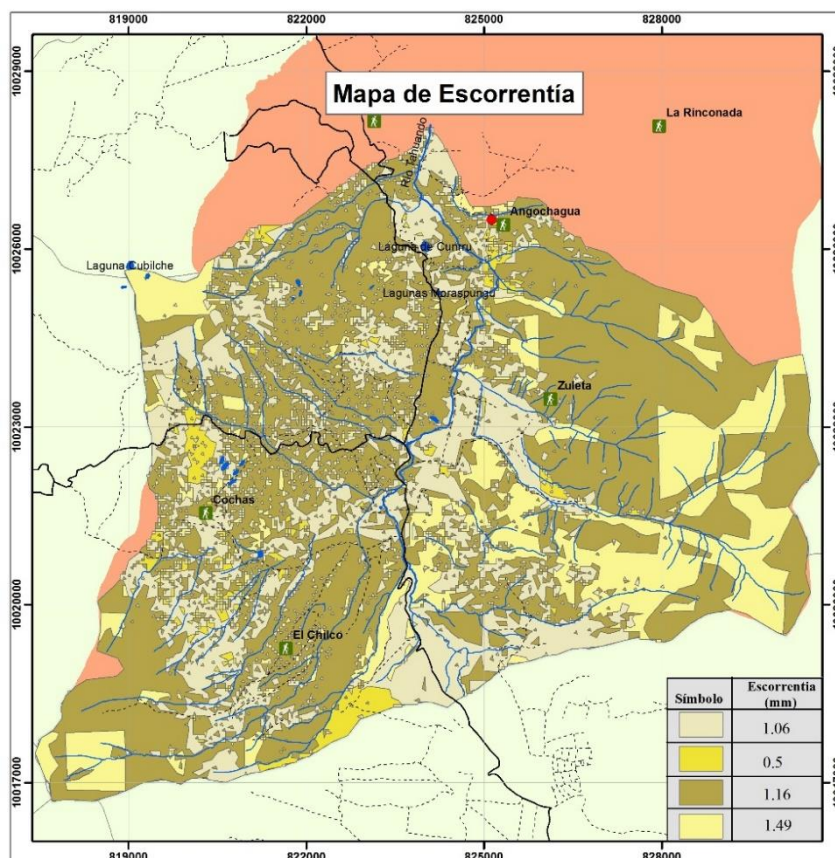
La información recolectada con la estación meteorológica instalada en la zona del bosque dentro de la hacienda Zuleta muestra que los meses con menor velocidad de viento y porcentaje de humedad corresponde al mes de marzo donde hubo un aumento significativo en la evapotranspiración de todas las coberturas vegetales para volver a estabilizar si incremento normal en los siguientes meses en la tabla 24 se presentan los factores atmosféricos

**Tabla 24.**  
*Factores Atmosféricos*

<b>Variable</b>	<b>Febrero</b>	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>
<b>Velocidad de viento (m/s)</b>	3.12	2.92	3.22	3.02
<b>Humedad Relativa (%)</b>	82.83	82.17	83.33	82.67

#### **4.1.6. Escorrentía**

La escorrentía superficial en función del régimen de lluvias presento un incremento mensual con registros en febrero de 0.1 mm en las zonas de páramo conservado llegando hasta el valor de 0.7 mm durante el mes de mayo. El régimen acumulado de la época de lluvia presento valores de escorrentía de 0.5 mm en la zona de bosque plantado, mientras que el valor más alto fue de 1.5 mm en la zona de páramo. para especializar las mediciones realizadas en campo se utilizó el mapa de zonas de potencial recarga hídrica, debido a que aquí se ven inmersas las variables de tipo de suelo, roca, vegetación y pendiente. En la figura 25 se presentan el mapa de escorrentía realizado con las mediciones hechas en campo y registradas en la tabla 25

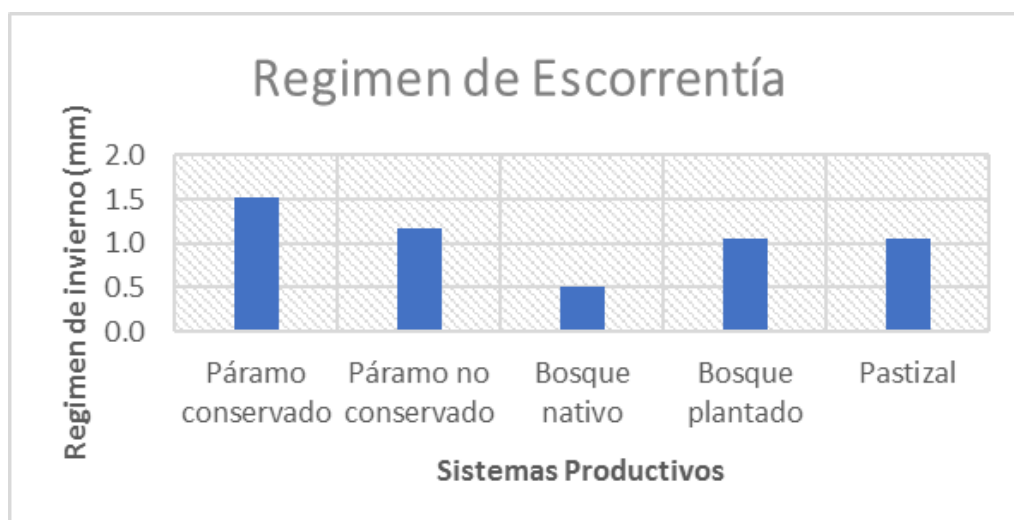


*Figura 25.* Régimen de escoorrentía.

**Tabla 25.**

*Mediciones de escoorrentía*

Sistemas productivos	Escoorrentía				Régimen de lluvias (mm)
	Febrero (mm)	Marzo (mm)	Abril (mm)	Mayo (mm)	
Páramo	0.1	0.2	0.5	0.7	1.5
Bosque nativo	0.3	0.0	0.3	0.6	1.2
Bosque plantado	0.1	0.0	0.1	0.3	0.5
Pastizal	0.1	0.1	0.4	0.4	1.1
Cultivo	0.1	0.1	0.4	0.4	1.1



**Figura 26.** Histograma del régimen de Escorrentía.

Para la determinación del coeficiente de escorrentía se tomó como referencia las mediciones realizadas en el mes de mayo, donde el balance hídrico dio como resultado superávit de agua en todos los ecosistemas, de manera que estos se encontraban saturados. En la tabla 26 se detallan los coeficientes de escorrentía calculados para las coberturas vegetales. Además, al no tener instalado un equipo en zonas de construcción se decidió tomar el valor de 0.95 propuesto en el estudio “Análisis de la disponibilidad de los recursos hídricos en la microcuenca del río Blanco (nevado Cayambe), utilizando el modelo Oferta-demanda en ARCGIS” (Valencia, 2014). Los lugares donde se registró un mayor coeficiente de escorrentía teniendo en consideración la escorrentía superficial y la subsuperficial medida a los 60 cm de profundidad del suelo son en la zona de páramo con 0.63 y la menor en la zona de cultivos y pastizales con 0.36

**Tabla 26.**

*Coficiente de escorrentía calculado*

Sistemas productivos	Precipitación (mm)	Escorrentía (mm)	Coficiente de escorrentía
Bosque nativo	63	28.3	0.57



Pastizal	49.5	17.9	0.36
Cultivo	49.5	17.9	0.36
Bosque plantado	45.1	25.1	0.56
Vegetación arbustiva	45.1	25.1	0.56
Vegetación herbácea	49.5	17.9	0.36
Páramo	63	40.3	0.63
Construcciones antrópicas	Bibliográfico		0.95

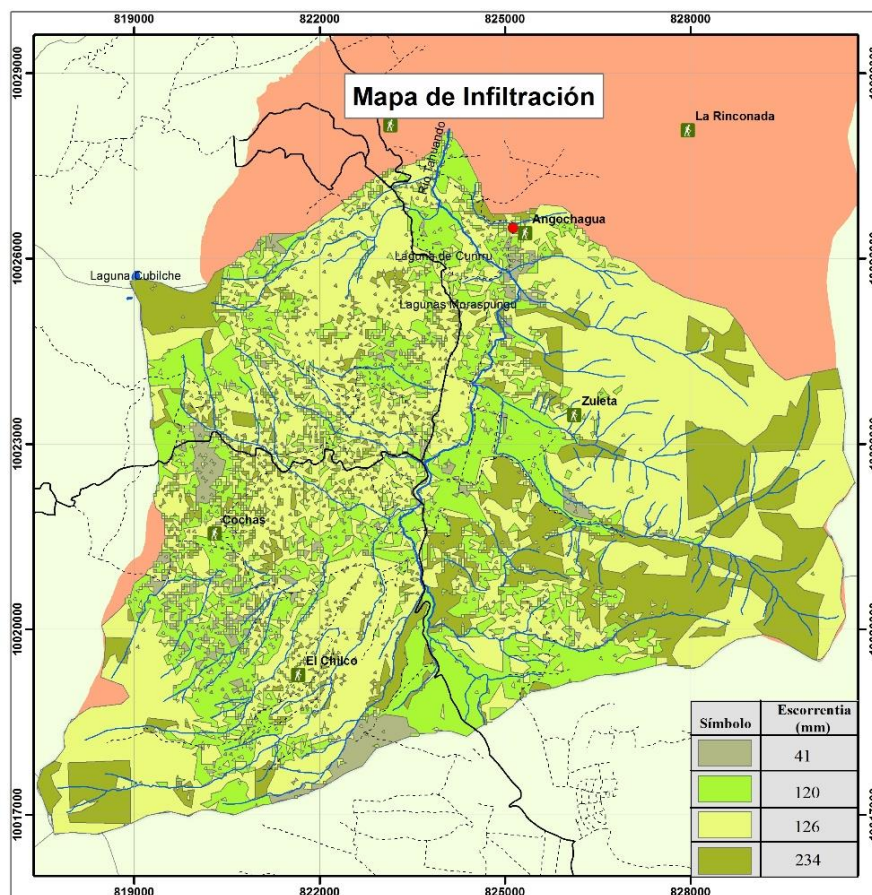
#### 4.1.7. Infiltración

Donde se presentó un mayor registro acumulado de infiltración es la zona de páramo con un total de 234.3 mm mientras que la zona de pastizal y cultivo llegaron a tener 41.1 mm durante el periodo de estudio. Además, el incremento de infiltración fue mensual en la zona de páramo, mientras que en el resto de ecosistemas se presentó un decremento durante el mes de marzo, finalmente para el mes de mayo todos los incrementos se regularizaron a excepción de las zonas de pastizal y cultivos, en donde se registró menor precipitación que el mes anterior. En la tabla 27 se presentan las mediciones de infiltración, los cuales fueron utilizados para realizar la figura 27

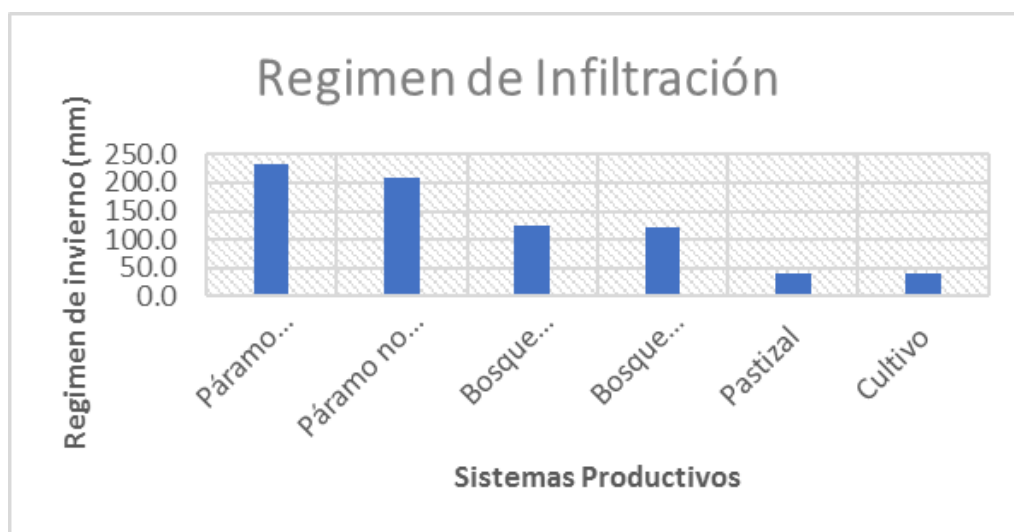
El páramo se encuentra ubicado en las zonas de mayor recarga hídrica, seguido por las áreas de bosque nativo, bosque plantado, pastizales y cultivos, en ese orden.

**Tabla 27.**  
*Mediciones de infiltración*

Sistemas productivos	Infiltración				Régimen de lluvias (mm)
	Febrero (mm)	Marzo (mm)	Abril (mm)	Mayo (mm)	
Páramo	27.4	29.0	63.1	114.8	234.3
Bosque nativo	13.0	3.4	45.1	64.2	125.6
Bosque plantado	8.1	6.1	40.5	65.4	120.2
Pastizal	6.9	0.2	19.4	14.6	41.1
Cultivo	6.9	0.2	19.4	14.6	41.1



**Figura 27.** Régimen de infiltración.



**Figura 28.** Histograma del régimen de Infiltración.

#### 4.1.8. Balance hídrico

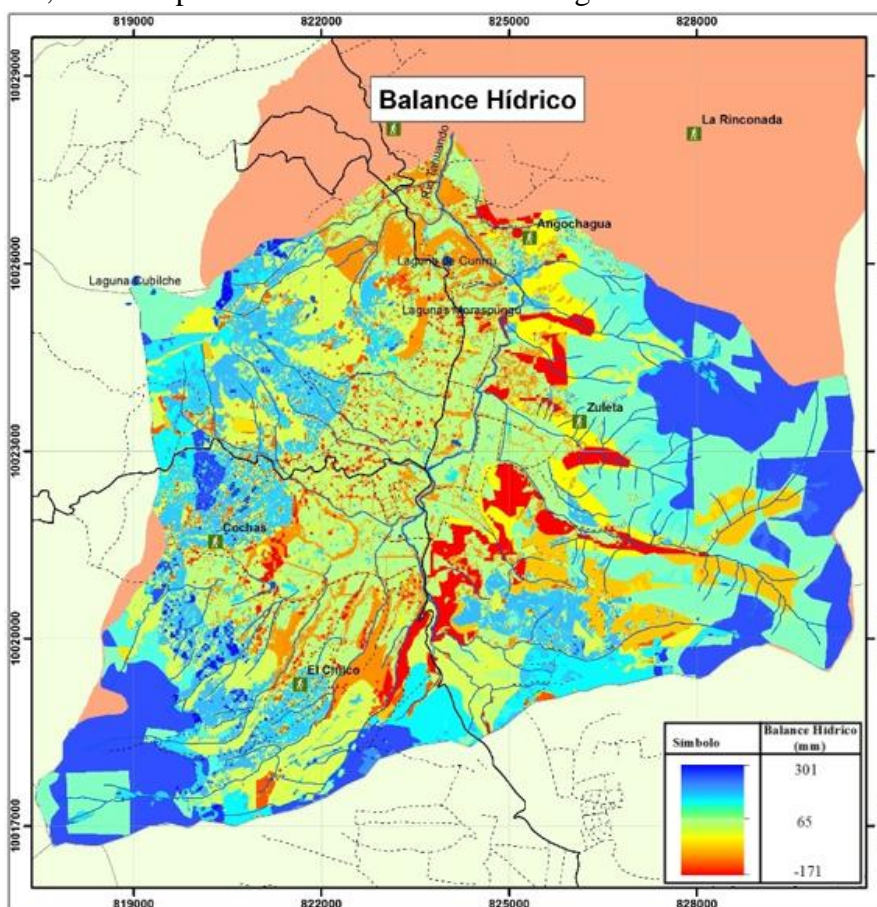
Los resultados del balance hídrico de acuerdo a las mediciones directas la zona con un mayor superávit de agua se encuentra dentro de la zona de conservación del páramo, durante el periodo de lluvias se tiene una acumulación de 99.3 mm de agua. El ecosistema con una menor acumulación es la de bosque plantado con 24.9 mm. El balance acumulado muestra que se dio un incremento en la cantidad de agua que se acumuló en cada ecosistema, sin embargo, durante el mes de marzo las salidas en todos los ecosistemas fueron mayores a los ingresos, los cuales fueron compensados por los meses siguientes. El balance más bajo se dio en los ecosistemas de pastizales y zonas de cultivo, donde el déficit llegó a -27.5 mm y el más alto fue durante el mes de mayo en el ecosistema de páramo con una acumulación de 69.6mm. Para la obtención de los resultados finales se reemplazó los datos tomados en campo de infiltración, escorrentía, evapotranspiración y precipitación en la ecuación 4 dando como resultado la tabla presentada a continuación.

**Tabla 28.**

*Balance hídrico con mediciones de campo*

<b>Balance Total</b>					
<b>Sistemas productivos</b>	<b>Febrero (mm)</b>	<b>Marzo (mm)</b>	<b>Abril (mm)</b>	<b>Mayo (mm)</b>	<b>Déficit/Superávit (mm)</b>
Páramo	14.4	-15.6	30.9	69.6	99.3
Bosque nativo	7.9	-22.0	19.8	20.5	26.1
Bosque plantado	8.8	-18.5	6.1	28.5	24.9
Pastizal	13.9	-27.3	50.0	59.1	95.8
Cultivo	10.4	-27.5	45.6	2.4	30.9

Todos los ecosistemas donde se tomaron datos en campo presentaron superávit en cuanto a sus reservas de agua, sin embargo, al momento de espacializar las variables para obtener un modelo de visualización general de la cuenca en forma de mapa, existen zonas a nivel de cuenca baja con déficit, como se presenta a continuación en la figura 29.



**Figura 29.** Mapa del Balance Hídrico.

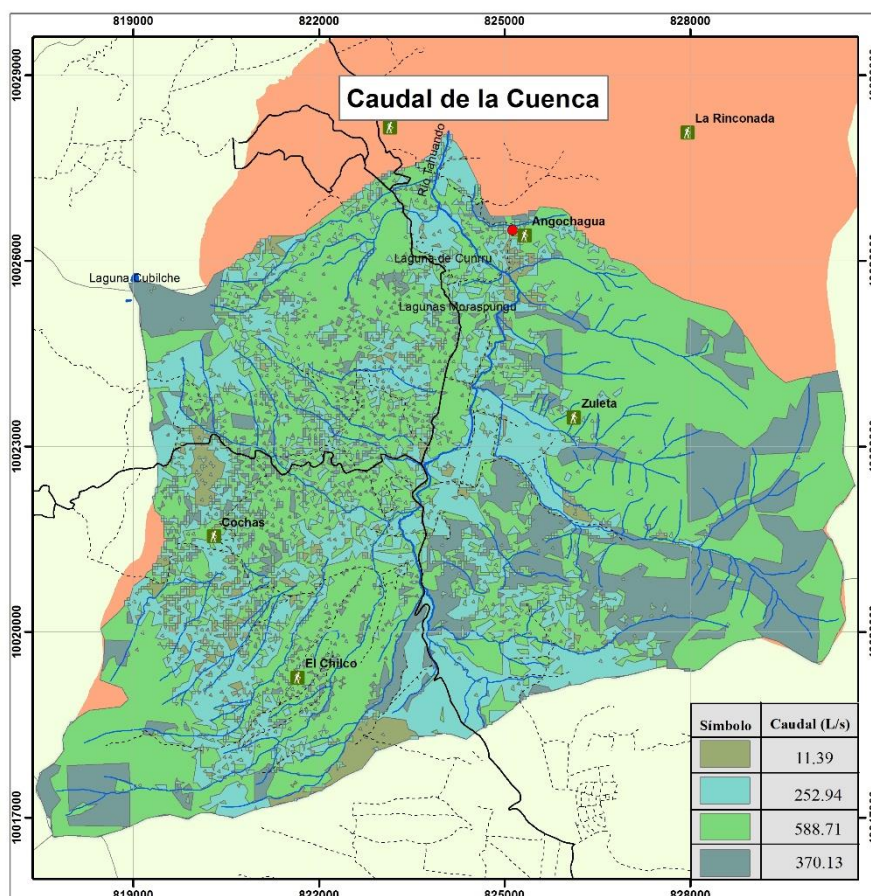
En su mayoría los ecosistemas naturales se encuentran con un superávit superior al promedio incluso las zonas intervenidas de la parte occidental de la cuenca, los valores más bajos se encuentran en cuenca baja en las zonas de cultivo o construcciones.

#### 4.1.8.1. Caudal de la cuenca

Para el caudal aprovechable de todos los usos que se le da al recurso hídrico en la cuenca, se tuvo en consideración la variable escurrimiento más la infiltración que corresponde a la

escorrentía subsuperficial.

El caudal obtenido mediante las mediciones de campo fue de  $1,22 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los lugares donde se produjo un mayor aporte de caudal corresponden a zonas de bosque nativo y páramo, ubicado entre la cuenca media y alta produciendo un caudal de  $388.71 \text{ L/s}$ , mientras las zonas donde se produjo un menor caudal se encuentran ubicadas a nivel de cuenca baja con un caudal de  $11.39 \text{ L/s}$ . Estos caudales son los que la cuenca está en capacidad de producir durante el periodo de estudio como se muestra en la figura 30.



**Figura 30.** Mapa del Balance Hídrico.

En la tabla 29 se detalla el caudal promedio de la cuenca. En el cálculo del caudal de la cuenca mediante información medida con estaciones meteorológicas se tuvo en consideración

la intensidad de lluvia promedio donde el caudal es de 1.28 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 29.**

*Caudal promedio de la cuenca*

<b>Coefficiente de escurrimiento ponderado</b>	<b>Intensidad de lluvia promedio (mm)</b>	<b>Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
0.51	889.67	88.99	1.28

#### 4.1.8.2. Balance hídrico incluyendo la demanda antrópica y estrés de la cuenca

El consumo total en la unidad hidrográfica es de 0.44 m<sup>3</sup>/s. Las áreas que tiene un proceso de escurrimiento superficial y subsuperficial son el páramo y bosque nativo ubicado en la parte sur oriental de la cuenca el cual en conjunto con las aportaciones de los otros ecosistemas generan un caudal de 1.22 m<sup>3</sup>/s. Finalmente el caudal mínimo que se encontraba circulando por el río Tahuando es de 0.78 m<sup>3</sup>/s, el cual se detalla en la tabla 30.

**Tabla 30.**

*Balance hídrico incluida la demanda antrópica*

<b>Caudal de escorrentía (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal de infiltración (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal consumido (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Balance total (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>0.01</b>	1.21	0.44	0.78

Además, los resultados de los aforos realizados en el desfogue de la cuenca, demostraron que el mes más bajo fue durante marzo ya que a pesar de tener un caudal muy parecido al de febrero posee 0.001 m<sup>3</sup>/s menos. Y el mes con mayor registro fue el de mayo con 3.29 m<sup>3</sup>/s. El caudal promedio durante el periodo de lluvias fue de 1.91 m<sup>3</sup>/s. Los caudales generados por escorrentía e infiltración se detallan en la siguiente tabla

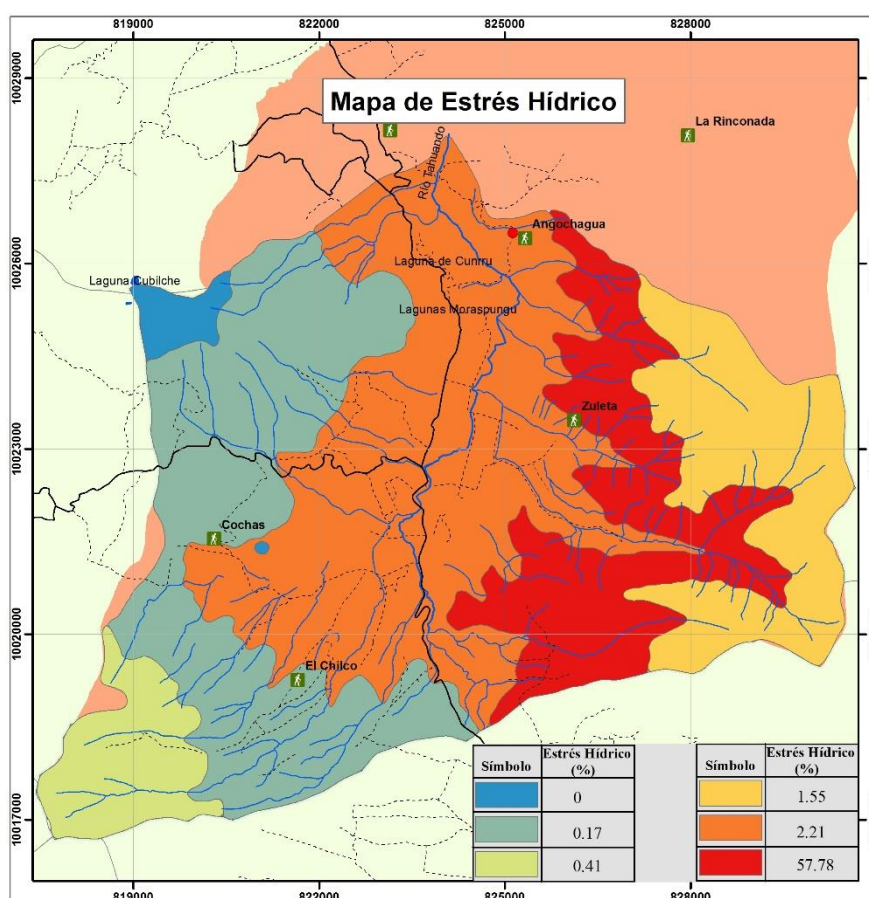
**Tabla 31.**

*Registros de aforos*

<b>Unidad Hidrográfica</b>	<b>Febrero (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Marzo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Abril (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Mayo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal Promedio (m<sup>3</sup>/s)</b>
----------------------------	----------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	--

<b>Río Tahuando</b>	1.032	1.031	2.270	3.292	1.91
---------------------	-------	-------	-------	-------	------

La cuenca media oriental que posee un nivel de estrés hídrico de 57.78 % es el lugar más crítico de la zona de estudio, y como valores más bajos son el remanente de páramo del Cubilche y la cuenca media occidental donde existen niveles de 0 % y 0.17 % de estrés, como se muestra en la figura 31.



*Figura 31.* Mapa de estrés hídrico.

## 4.2. Discusión de resultados

### 4.2.1. Actualización de cartografía de uso y cobertura del suelo

La actualización del mapa de uso y cobertura fue realizado con una imagen satelital Planet Scope nivel 3B de tres metros de acuerdo a lo recomendado en “Fundamentos de Teledetección

Espacial” (Chuvieco, 1990), el método de clasificación fue “Maximum Likelihood” ya que para determinar la probabilidad pertenecía de un pixel a cada una de las clases evalúa los grados de variancia que tiene el pixel todas las clases. Utilizando los puntos de comprobación, la precisión global del método de clasificación fue de 84.375 %. Este porcentaje representa el porcentaje de pixeles clasificados correctamente. Además, con los resultados del Coeficiente Kapa se puede decir que este método de clasificación proporciono el 82.07 % de mejores resultados para la matriz que los productos de otros clasificadores.

De acuerdo a los resultados de las áreas de los ecosistemas, existe gran interés de los moradores y en sí de las autoridades que manejan los limites políticos a los cuales pertenece esta microcuenca por la conservación de los espacios naturales ya que las áreas de mayor extensión son las de páramo y bosques naturales y las menores son las de cultivos y construcciones. Por este motivo se puede observar en la figura 16 que la expansión de la frontera agrícola no supera en su mayoría la cuenca baja. Sin embargo, en la parte occidental de la cuenca se puede observar que existen grandes extensiones de vegetación herbácea y pastizales, demostrando así que uno de los sistemas productivos de mayor ingreso para esta zona es la ganadería.

#### **4.2.2. Balance hídrico**

Como se puede ver en la figura 30 en el mapa de balance hídrico existen zonas donde se produce una mejor regulación del ciclo hidrológico, y son principalmente las que se encuentran en la cuenca alta, debido a que las entradas son mayores, la salida por evapotranspiración es baja proporcionando mayor caudal a las acumulaciones de agua aportantes al cauce principal, posteriormente los ecosistemas que se encuentran en la cuenca media con menor intervención



son lugares donde también existe una buena regulación hídrica, debido al tipo de suelo y la pendiente que hay en esta zona, sin embargo existen zonas donde el superávit de agua generado en la época de lluvias ha sido bajo en cuenca media, debido principalmente a las alteraciones de la cobertura vegetal nativa y a por la introducción de especies que poseen un mayor consumo por evapotranspiración. Finalmente, a nivel de cuenca baja el superávit es muy bajo e incluso en algunas partes no existe una compensación adecuada a la cantidad de agua que consumen las especies de la zona y evaporación de la humedad en el ambiente, provocando que su manejo no sea el más adecuado

#### **4.2.2.1. Entradas**

Los ingresos del recurso hídrico para esta unidad hidrográfica son a partir de la precipitación y se da de mejor manera a nivel de cuenca alta, ya que a medida que la altura disminuye la precipitación también. En los resultados obtenidos durante los meses de estudio de acuerdo a la Tabla 22, en la cuenca alta hay un régimen de lluvias acumulado de 592.8 mm mientras que en cuenca baja es de 420.2mm lo que representa una diferencia de 172.6 mm entre la cuenca alta y baja. En la parte oriental de la cuenca los ecosistemas que se ven beneficiados por las entradas de precipitación son principalmente los ecosistemas nativos, mientras que en la parte sur occidental al encontrar zonas de intervención a nivel de cuenca media, los ecosistemas que aprovechan los ingresos de agua corresponden a zonas de bosque plantado, pastizales, y cultivos.

#### **4.2.2.2. Salidas naturales**

La evapotranspiración es la variable de mayor consumo natural de las entradas de agua. Las zonas con mayor evapotranspiración son las de bosque plantado y vegetación arbustiva debido en gran parte al coeficiente de consumo para las especies de pino, eucalipto y polilepys. Durante

el mes de marzo se evidencio con la información recolectada con la estación meteorológica sobre humedad relativa y velocidad de viento un incremento significativo en la evaporación a diferencia del que se había presentado hasta el momento, debido principalmente a las características atmosféricas de ese mes. La evapotranspiración del mes de mayo corresponde a la más elevada de acuerdo a los registros presentados en la Tabla 23 con valores que llegan hasta los 190.5 mm evaporados a diferencia de febrero donde sus valores llegaron hasta 32.1 mm, esto se debe principalmente a que en este mes inicia el periodo seco donde la humedad relativa empieza a disminuir con valores de 82.67 % a diferencia del mes de abril donde se registró 83.33 %.

El escurrimiento superficial como la infiltración a poca altura (escurrimiento subsuperficial) dio mejores resultados en las áreas de alta y muy alta probabilidad de recarga hídrica, debido a que en esta zona existen suelos franco arenosos con muy rápida capacidad de infiltración, además se encuentra sobre áreas con pendientes que van entre 0 y 15 % y el tipo de uso del suelo de estas zonas en su mayoría son de conservación con un alto porcentaje de cobertura vegetal permanente. Las zonas para un mejor aprovechamiento en cuanto a servicios ambientales relacionados con el agua son las áreas de alta y muy alta probabilidad de recarga hídrica que se encuentran entre la cuenca media y alta, debido a que la precipitación es mucho mayor en estas zonas y los procesos de regulación hídrica son mejores.

#### **4.2.2.3. Caudal generado y salidas antrópicas**

El caudal generado por la cuenca está relacionado directamente con las variables infiltración y escorrentía, en su mayoría el agua se escurre de manera subsuperficial en la cuenca formando ojos de agua a poca profundidad la cual se desplaza de manera horizontal hasta llegar al cauce principal. Sin embargo, la mayoría de puntos concesionados se encuentran en la cuenca media

oriental, donde existen autorizaciones de consumo doméstico, piscícola, abrevaderos, pero principalmente los puntos de extracción de agua para riego en esta zona son los más alto dentro del total de caudales concesionados. Además, una de las concesiones de mayor beneficio en cuanto a consumo doméstico para la población de Ibarra es la procedente de las fuentes de Guaraczapas aportando con un consumo permanente de 145 l/s de acuerdo a los registros de la planta de tratamiento de la figura 32.

PLANTA DE TRATAMIENTO: GUARACZAPAS - Febrero - 2019

FECHA	HORA	CAUDAL (L/s)	LECTURA MACROMEDIDOR (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESERVA 1 (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESERVA 2 (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESERVA 3 (m <sup>3</sup> )	OTRO
1/1/2019	16:00	141.500	1077780				
2/1/2019	17:00	140.300	10766506				
3/1/2019		142.00	10728303				
4/1/2019		135.00	10793070				
5/1/2019		134400	10801904				
6/1/2019		135.500	10800415				
7/1/2019		132.700	10825030				
8/1/2019	17:00	134400	10836950				
9/1/2019	17:00	125910	10848535				
10/1/2019	17:00	134.900	10860219				

**Figura 32.** Registros del caudal que ingresa en la planta de tratamiento de Guaraczapas.

Elaboración: Planta de tratamiento de Guaraczapas

#### 4.2.2.4. Estrés hídrico

Debido a que las concesiones se encuentran acumuladas en la cuenca media oriental los niveles de estrés en esta zona serán mucho mayores a los que existan en otros lugares. Todos los porcentajes de estrés a excepción de la mencionada anteriormente se encuentran bajo el 13% el cual corresponde a la tasa promedio mundial de acuerdo al documento “Progresos en el nivel de estrés hídrico: valores de referencia mundiales para el indicador 6.4.2 de los ODS.” (ONU-AGUA, 2018), mientras que la cuenca media oriental al tener un estrés del 57.78 % está entrando a un estado de escasez. Los lugares con menores niveles de estrés es la zona de la

cuenca alta de la laguna del Cubilche y la cuenca media occidental ya que el aprovechamiento de las concesiones se encuentra mejor distribuido.

### **4.3. Comprobación de hipótesis**

El uso que se le está dando actualmente a la unidad hidrográfica que se encuentra ubicada dentro de los límites políticos de la Junta Parroquial Angochagua no es la adecuada, ya que existen dos problemas particulares que se encuentran colindando los ecosistemas de páramo. Con respecto a la zona de páramo oriental, la conservación de los ecosistemas naturales produce una buena regulación de los recursos hídricos teniendo mucho ingreso de agua por precipitación y niveles bajos de evapotranspiración y en conjunto al estar ubicados en zonas de alta y muy alta probabilidad de recarga hídrica, la cantidad de caudal generado por parte del escurrimiento superficial y subsuperficial es alta; pero la suma de los caudales concesionados en esta zona es de 400 L/s, el cual representa una cantidad de extracción del 57.78 % del total del agua que ingresa en esta zona. Por otro lado, en la zona de páramo occidental la frontera agrícola ya se encuentra a nivel de cuenca media, en donde se puede encontrar ecosistemas de pastizales, cultivos y plantaciones forestales la cual específicamente consume el 70.93 % del agua que cae en estas zonas. Por estos motivos a pesar de que la cuenca recibe gran cantidad de agua en forma de precipitación, los consumos tanto naturales como antrópicos provocan disminución en el almacenamiento de agua dentro de la cuenca y disminución de los caudales aportantes al cauce principal del río Tahuando

## CAPITULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

El uso de imágenes satelitales de alta resolución proporciono información más puntual y debido a que la zona de estudio pertenece a una cuenca natural, la clasificación resulto bastante heterogénea bien delimitada en donde se pueden observar claramente las zonas naturales conservadas, ya que existe poca presencia de otros ecosistemas a diferencia de las zonas de intervención, donde se puede evidenciar un mosaico con varios ecosistemas. El método de clasificación proporciono un resultado del 84.375 % de pixeles bien clasificados y proporciono el 82.07% de mejores resultados que otros clasificadores

La metodología de instalación de equipos de medición directa proporciono gran cantidad de información para identificar la manera actual del manejo de la unidad hidrográfica y la dinámica de las variables dependiendo de la altura donde se midan y de la secuencia de coberturas vegetales. La elaboración del balance hídrico mediante sistemas de información geográficos permite visualizar de manera espacial como se distribuyen las variables y las zonas de mayor riesgo de sequía. La cuantificación de la oferta permitió determinar que se debe conservar la parte media y alta de la cuenca, ya que es de donde proviene la mayor parte del recurso hídrico. La demanda natural y humana sirvió para conocer que tanto la parte occidental como oriental se encuentran afectadas. El balance hídrico total demostró que el almacenamiento de agua es mejor en las partes altas, y disminuye hasta llegar a las partes bajas de la cuenca debido a las características del uso de suelo y el aprovechamiento del agua

El estado actual de los recursos hídricos de cuenca no se encuentra en su totalidad bien distribuidos. De acuerdo a la figura 32 en la parte oriental de la cuenca existe estrés del hídrico 57.78% debido a la acumulación de concesiones en este sector, mientras que en la zona de páramo occidental la demanda en su mayoría se da a causa de plantaciones forestales provocando estrés hídrico por consumo natural y antrópico con un porcentaje del 0.41%. Estos procesos provocan a su vez una diferente distribución a escala temporal y espacial de los recursos hídricos que ingresen a este sector modificando los meses que son considerados como lluviosos o secos y la cantidad de lluvia que se pueda producir

## **5.2. Recomendaciones**

Para tener mejores resultados en el proceso de clasificación de una imagen satelital se recomienda recoger las muestras en medio de superficies extensas donde se encuentre la categoría a la que pertenezca cada punto. De igual manera el manejo de imágenes de alta resolución en zonas naturales proporciona información más específica de las coberturas que existan

En estudios hidrológicos donde se desee conocer la disponibilidad de agua y los sectores más productivos de este recurso es recomendable realizar el mapa de zonas de potencial recarga hídrica. Mediante el manejo de estos mapas y de las variables que se usan para calcularlo, se puede conocer las zonas que están aportando con mayor caudal y se puede distribuir de mejor manera los puntos de extracción de agua sin causar exceso de demanda solo en ciertos sectores.

El uso de equipos analógicos, al economizar el presupuesto para estudios similares permite contar con más de uno para tener varios registros y conocer si existe o no cambios representativos en cada sector.

Se debe aprovechar el caudal que ofrece la cuenca media y alta, sin saturar las fuentes ya

sea por consumo natural o antrópico. Por este motivo es recomendable extraer caudal no solo de una vertiente, sino de varias y transportar el agua por tuberías para que la disminución de caudal no genere grandes impactos específicamente en una zona.

Las especies de bosque plantado que existen en la cuenca tienden a generar un mayor consumo del agua que se escurre de la cuenca alta y que cae sobre la cuenca media donde se encuentran estos ecosistemas. Una de las alternativas para darme un mejor manejo a la unidad hidrográfica es la búsqueda de nuevas alternativas de plantaciones forestales, en las cuales se produzca menor consumo al actual. Pero la alternativa con la que se tendrían mejores resultados es cambiar el tipo de uso del suelo, ya que en época de sequía las zonas se encuentran con niveles de estrés hídrico más elevado consumiran toda el agua que entre produciendo una disminución del caudal del rio y una disminución en el caudal que llegue a los puntos autorizados para la extracción de agua

Se recomienda que se delimite la frontera agrícola, ya que en la zona de páramo occidental se encuentra, en la parte de cuenca media colindando con la cuenca alta y los recursos hídricos que se generan en la parte media y alta son los que abastecen a la parte baja, donde se encuentra mayor parte de los asentamientos humanos y los centros poblados.

Teniendo en consideración la calidad del agua es recomendable que a lo largo del cauce principal no existan construcciones y continúe corriendo por ecosistemas naturales, para evitar riesgos por contaminación de desechos domésticos

Es importante tener estudios de valoración económica de los servicios ambientales ya que en la zona de la cuenca media occidental al encontrarse intervenida por plantaciones forestales se puede proponer alternativas de conservación, con el fin de cambiar el uso del suelo y mejorar los procesos de regulación del, agua.

Es importante proponer proyectos que ayuden a la conservación de los páramos con el fin de darle un manejo económicamente sustentable, como el que se realiza en la parte oriental de la cuenca, donde se da la crianza de alpacas en sustitución de otros camélidos o bovinos, los cuales no afectan las características del suelo ni de la vegetación a comparación de otras especies y contribuyen al desarrollo económico.

Es importante mantener los espacios naturales de una cuenca, ya que a parte de los servicios ambientales que oferte, estos biomas son el hogar de varias especies animales o vegetales representativas que pueden desaparecer al no contar por lo menos con el caudal ambiental necesario para mantener en equilibrio sus procesos biológicos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bievre, B. (2017). El manejo del Páramo y los límites para el cultivo de papa: algunas reflexiones desde la experiencia del proyecto Páramo Andino. CONDESAN, 3.
- Bocanegra, D., & Cuervo, M. (2015). Manual de procedimientos del Pluviómetro ISCO 674 del laboratorio de servicios Públicos. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Cajamarca, R. (2017). Estudio del balance hídrico superficial de las cuencas hidrográficas, sector jadány zhidmad en el área de interceptación con el bosque y vegetación protectora aguarongo (BVPA). Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Carchi, E. (2015). Elaboración de un balance hídrico de la cuenca del río Machangara. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: Rialp, S.A.
- Cisne, A. (2017). Determinación de las necesidades Hídricas del cultivo de tomate de mesa, mediante el lisímetro volumétrico, en el sector el Porvenir perteneciente al sistema de riego Campana-Malacatos. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Custodio, G. (1998). Recarga a los cuiferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero.
- Davis Instruments. (2014). Manual del usuario Gateway y Node. USA: Davis Instruments.
- Duarte, O., & Diaz, E. (2005). Tecnología de Tierras y Aguas I. Argentina: UNER.
- Espinoza, J., Ronchail, J., Lavado, W., Carranza, J., Cochoneau, G., Oliveira, E., . . . Loup, J. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazónica y su relación con la variabilidad hidrológica regional. Geo-Atmosférica RPGA, 33.
- FAO. (2009). ¿Por qué invertir en ordenación de las cuencas hidrográficas? Roma.
- FAO. (2017). Evapotranspiración del cultivo "Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Estudio FAO riego y drenaje.
- FAO. (2018). Progresos en el nivel de estrés hídrico: valores de referencia mundiales para el indicador 6.4.2 de los ODS. Roma: FAO Y ONU-Agua. doi:CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Gámez, W. (2009). Texto Básico de Hidrología . Managua: Universidad Nacional Agraria.
- García, C. (2017). Regulación Hídrica bajo tres coberturas vegetales en la Cuenca del Río San Cristóbal. Colombia Forestal, 10(20), 21.
- GLOBESAR. (2008). Clasificación y extracción de la información. Canada: Natural Resources .

- Gonzalez, F., & Ortegon, J. (2016). Cálculo del caudal de la cuenca hidrológica de la quebrada Guaguaqui, del departamento de Boyacá, por el método racional. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Guisela, F., Mariela, F., & Lopez, Z. (2016). Método de análisis morfométrico de la red de drenaje de cuencas. Oxapamba: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Guzmán, A. (2017). Hidrología y sedimentología de la cuenca del río santa clara. Quito: ESPE.
- Hodstede, R., Segarra, P., & Mena, P. (2003). Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos. Global Peatland Initiative. Quito: EcoCiencia.
- Ibañez, S. (2019). Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica. España: Escuela técnica superior de ingeniería agronómica y del medio natural.
- Laporte, S. (2012). Conferencia del Estado de las Redes de Hidrometeorológicas en Costa Rica.
- López, M. (2006). Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Martínez, M. (2005). Estimación de variables hidrológicas. México: SAGAROA.
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba.
- MECN - INB. (2015). Plantas de los Páramos del distrito metropolitano de Quito, Ecuador. Quito-Ecuador: Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales de Instituto Nacional de Biodiversidad.
- Mejía, X., & Moncayo, P. (2012). Evaluación de métodos de clasificación de imágenes satelitales de moderada y alta resolución para la obtención de mapas de uso y cobertura del suelo basados en píxeles y orientados a objetos: Estudio de caso en sub escena de la parroquia Shushufindi, prov. Ecuador: ESPE.
- Mena, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. Botánica Económica de los Andes Centrales, 19.
- Mestre, E., Jiménez, A., & Pimentel, O. (2015). Manejo de Cuencas desde un enfoque ecosistémico. Cuencas de México(sin numero), 2-8.
- Mook, W. (2000). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Groningen: Centro de investigación Isotópica Groningen.
- OMM. (1994). Guía de Prácticas Hidrológicas. Organización Meteorológica Mundial.

- ONU. (2018). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. New York: Naciones Unidas.
- Ordoñez, J. (2011). Balance Hídrico Superficial. En Z. Novoa (Ed.), (pág. 7). Lima.
- Organización Meteorológica Mundial. (2014). Diagnostico y planificación del recurso hídrico en Costa Rica: Hacia una gestion integral de la conservación y el aprovechamiento del agua.
- Planet Imagery. (2016). Planet Imagery Product Specificatio: PlanetScope & RapidEye. U.S.A: Planet.
- Quitós, E. (2009). Clasificación de imágenes multiespectrales ASTER mediante funciones adaptativas. España: Universidad de Extremadura.
- Rodríguez, D., & Pérez, P. (2014). Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca Hidrográfica Guara, de Cuba. Aqua-LAC.
- Sandoval, H. (2015). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Ibarra: GAD Angochagua.
- Sandoval, W., & Aguilera, E. (2014). Determinación de Caudales en cuencas con poca información hidrológica. UNEMI.
- Sellers, C., Buján, S., Corbelle, E., & Miranda, D. (2017). Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador. CONFibSIG, 14.
- SENAGUA. (2017). Boletín Sector Hídrico. II Firi Internacional de alto nivel "El Agua nos une". Quito: UNASUR.
- SENAGUA-Ibarra. (2018). Banco de autorizaciones de la demarcacion de Mira. Ibarra: SENAGUA.
- Trucker, C., Townshend, J., & Goff, T. (1985). African land-cover classification using satellite data (Vol. 227). Science.
- UNESCO. (1981). Guía internacional de investigación y métodos - Métodos de cálculo del balance hídrico. Paris: Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura.
- UNESP. (2017). La Cuenca Hidrográfica. Brasil: Agencia nacional de aguas.
- Valencia, R. (2014). Análisis de la disponibilidad de los recursos hídricos en la microcuenca del río Blanco (Nevado Cayambe), utilizando el modelo Oferta-Demanda en ARGIS". Quito: EPN.
- Vasquez, J. (2013). Tasa diaria de evapotranspiración de una huerta de nogal pecanero con mediciones de la humedad del suelo. México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Division de Ingeniería Departamento de Riego y Drenaje.

Zufferey, P., Achig, L., & Cevallos, H. (2016). Plan de Manejo de microcuencas en la parroquia de Angochagua.