

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES**

**"MODELACIÓN CARTOGRÁFICO - HIDROLÓGICA DE LA
CUENCA ALTA DEL RÍO TAHUANDO PARA EL MANEJO DEL
RECURSO HÍDRICO MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG"**

Tesis previa a la obtención del Título de:

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Autora: Tatiana Lizeth Ruiz Reyes

Director: Ing. Oscar Rosales

Ibarra – Ecuador
2016

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

TEMA:

"MODELACIÓN CARTOGRÁFICO - HIDROLÓGICA DE LA
CUENCA ALTA DEL RÍO TAHUANDO PARA EL MANEJO DEL
RECURSO HÍDRICO MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG"

Tesis previa a la obtención del Título de:

INGENIERA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

APROBADO:

MSc. Oscar Rosales

Director

PhD. Xavier Zapata

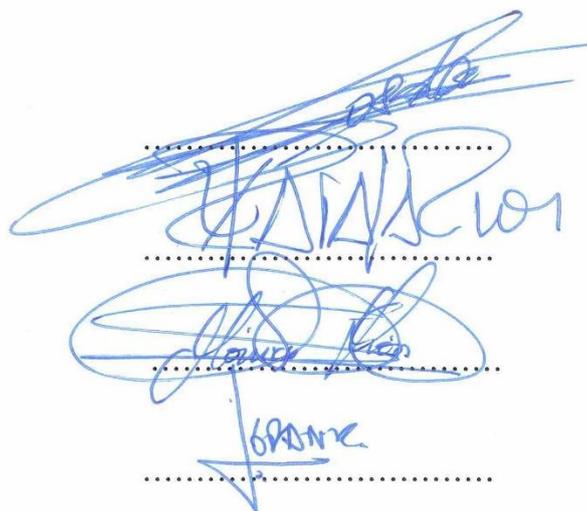
Asesor

MSc. Mónica León

Asesora

Ing. Jorge Granja

Asesor



The image shows three blue ink signatures on dotted lines. The top signature is the most prominent and appears to be 'Oscar Rosales'. The middle signature is less legible but seems to be 'Xavier Zapata'. The bottom signature is also less legible but appears to be 'Mónica León'. There is a fourth signature below the others, which is 'Jorge Granja', but it is not on a dotted line.

Ibarra – Ecuador
2016

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Manifiesto que la presente obra es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto es original y que soy el titular de los derechos patrimoniales; por lo que asumo la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldré en defensa de la Universidad Técnica del Norte en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 14 días del mes de julio de 2016



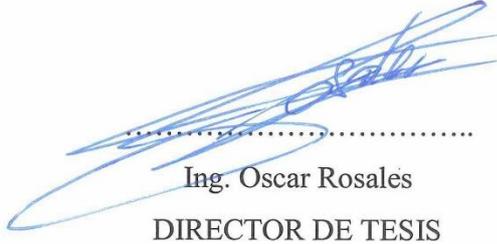
Firma

Tatiana Lizeth Ruiz Reyes

C.I.: 100386597-7

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Tatiana Lizeth Ruiz Reyes, bajo mi supervisión.



.....
Ing. Oscar Rosales
DIRECTOR DE TESIS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Tatiana Lizeth Ruiz Reyes, con cédula de identidad Nro. 1003865977, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autora de la obra o trabajo de grado denominado: **MODELACIÓN CARTOGRÁFICO - HIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TAHUANDO PARA EL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte. Ibarra, a los 14 días del mes de julio de 2016.



Firma

Tatiana Lizeth Ruiz Reyes
C.I.: 100386597-7



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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad. Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
Cédula de identidad:	100386597-7		
Apellidos y nombres:	Ruiz Reyes Tatiana Lizeth		
Dirección:	Otavalo - Barrio San Eloy		
Email:	tattysliz.ruiz.r@gmail.com		
Teléfono fijo:	062927845	Teléfono móvil:	0987365772

DATOS DE LA OBRA	
Título:	“MODELACIÓN CARTOGRÁFICO - HIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TAHUANDO PARA EL MANEJO DEL RECURSO HÍDRICO MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG”
Autor:	Ruiz Reyes Tatiana Lizeth
Fecha:	14 de julio de 2016
Solo para trabajos de grado	
Título por el que opta:	Ingeniera en Recursos Naturales Renovables
Director:	Ing. Oscar Rosales

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Tatiana Lizeth Ruiz Reyes, con cédula de ciudadanía Nro. **100386597-7**; en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 14 de julio de 2016.

AUTORA:


.....
Ruiz Reyes Tatiana Lizeth

C.I.: 100386597-7

ACEPTACIÓN:


.....
Ing. Betty Chávez

JEFE DE BIBLIOTECA

DEDICATORIA

Esta investigación va dedicada a la persona que me dio la oportunidad de vivir, creyó en mí, hizo todo para yo pudiera lograr mis sueños y alcanzar mis metas, por motivarme, por estar siempre pendiente de mí y darme ánimo cuando más lo necesité, a mi madre Silvia Ruiz, quien ha sido ejemplo de lucha, constancia, esfuerzo y mucho valor.

A mis compañeros de vida, de juegos y de lucha, a mis hermanos: Jhonni, Cristhoper, Irvin, Carlos y Kevin quienes han sido junto a mi madre la razón para no decaer y esforzarme cada día más.

A ustedes con todo mi amor como muestra de agradecimiento y finalización de un sueño cumplido y una meta alcanzada, los mismos que no hubiesen sido posibles sin la confianza, el amor y apoyo brindado.

Tatty Ruiz

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Técnica del Norte, que ha sido mi segundo hogar, donde me he formado como profesional y a la cual representare con mucha ética y orgullo.

A mi director de tesis Magíster Óscar Rosales, docente de la FICAYA, quien con su conocimiento, paciencia y dedicación, ayudó a culminar con éxito la investigación.

A mis asesores PhD. Xavier Zapata, Magister Mónica León e ingeniero Jorge Granja, gracias a su guía, consejos, sugerencias, aportes y ayuda brindada he logrado culminar esta investigación de una manera adecuada.

A mis compañeros y amigos de Universidad con quienes compartí momentos inolvidables, gracias por los consejos, el apoyo y la ayuda brindada.

A mi familia, mi madre Silvia, mis hermanos: Jhonni, Cristhoper, Irvin, Carlos y Kevin a mi abuelita y segunda madre Lasteña, a mis tíos y tías, a mis primos y primas y a mi novio Leandro, de quienes nunca faltó una palabra de motivación o un consejo, quienes creyeron en mí y apoyaron mis sueños y mis metas, queriendo siempre mi bienestar y felicidad.

A todos ustedes gracias infinitas.

Tatty Ruiz

RESUMEN

Se realizó la modelación cartográfica - hidrológico de la cuenca alta del río Tahuando para el manejo del recurso hídrico mediante la aplicación de herramientas SIG. Para esto se identificaron los problemas del área de estudio en base a los reconocimientos de trabajo de campo. Se identificaron las áreas de recarga hídrica y se determinó el balance hídrico para conocer la cantidad del recurso hídrico con fines aprovechamiento, usando los datos del Sistema Nacional de Información, tales como: uso del suelo y cobertura vegetal, modelo digital de elevación, zonas de vida, tipo de suelos, e información meteorológica de los anuarios del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). La identificación de las áreas de recarga hídrica se realizó mediante la metodología elaborada por el Centro Agronómico Tropical de Investigación. Esta consistió en aplicar la técnica de álgebra de mapas con información cartográfica de la pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, tipo de roca y uso del suelo. En la investigación determinó que la cuenca alta del río Tahuando con un (64,45%) se considera como una buena productora de agua por las posibilidades de recargas moderadas altas y muy altas presentes en el área de estudio. Además los resultados del balance hídrico determinaron que hay un excedente de agua en todos los meses. Se realizó el coeficiente satisfactorio con los datos simulados y medidos en campo aplicando la fórmula de corrección y regresión lineal, obteniendo un valor de 0,95 demostrando que hubo un buen ajuste entre los datos simulados y medidos. En base a los resultados obtenidos se realizó la propuesta de estrategias de manejo de la cuenca alta del río Tahuando, determinando dos estrategias de manejo, la primera es la elaboración, implementación y socialización de planes de manejo y la segunda la implementación de un programa de educación ambiental, estas estrategias se plantearon con el fin de alcanzar un manejo adecuado de la cuenca.

SUMMARY

It has been made by “Cartographic y Hydrological Modelling for the basin of high place of Tahuando’s river” for the use of water resources by means of SIG tools. For the identification of the problem based and recognizance by field land study. Were identified water recharge areas and determinate an hydrological balance for going to know the amount of usable hydrological resources, using the data information from Information National System such as: land use and land cover, digital elevation model, soil type and weather information from the year books of Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). The identification of areas of hydric recharge was made by the developed methodology by The “Centro Agronómico Tropical de Investigación” This was to apply the technique of algebras’ map with cartographic information of the slope, soil type , vegetation cover and rock type and land use. The investigation determined that the high basin of the Tahuando’s river with a 64.45% it’s considered as a good producer of water by the possibilities of high and very high moderate refills present in the study area. In addition the results of the hydric balance determined that there is a surplus of water in every moth. Was performed a satisfactory coefficient using simulated data and measured in the field using *correction formula* and *lineal regression* , obtaining value of 0,95 demonstrating that there was a good fit between simulated and measured data. Based on the results of the proposed management strategies held the high basin of the Tahuando’s river, determining management two strategies, the first is the development, implementation and socialization of management plans and the second the implementation of an environmental education program, these strategies were proposed in order to archive an adequate management of the basin.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1 General:	4
1.2.2 Específicos:.....	4
1.3 Formulación de pregunta directriz	4
CAPÍTULO II.....	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA Y MARCO LEGAL.....	5
2.1 Marco Legal.....	5
2.1.1 Constitución de la República del Ecuador	5
2.2.1 Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017	7
2.2.2 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.....	8
2.2.3 Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre	9
2.2 Ciclo hidrológico en la cuenca hidrográfica.....	10
2.2 Áreas reguladoras de agua en las cuencas hidrográficas	11
2.3 Áreas de recarga hídrica	12
2.4 Modelación cartográfico – hidrológica	13
2.5 Determinación de balance hídrico de la cuenca	14
2.7 Estrategias de manejo para cuencas hidrográficas	15
CAPÍTULO III	16
3 MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.2 Materiales y equipos	16
3.2 Metodología.....	17
3.2.1 Caracterización biofísica del área de estudio	17
3.2.2 Identificación de áreas de recarga hídrica	21
3.2.3 Realización el modelo hidrológico	31
3.2.3 Precipitación	34

3.2.4 Evapotranspiración potencial (ETp)	34
3.2.5 Escurrimiento Superficial	35
3.2.5 Precipitación efectiva	37
3.2.5 Retención real de humedad del suelo	38
3.3 Validación del modelo hidrológico	42
3.3.1 Aforo de caudal con molinete electrónico	42
3.4 propuesta de estrategias de manejo	45
CAPITULO IV	47
1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
4.1 Resultados.....	47
4.1.1 Caracterización Biofísica del Área de Estudio	47
4.1.2 Identificación de Áreas de Recarga Hídrica	56
4.2 Modelo hidrológico de la cuenca alta con fines de simulación de escorrentía superficial.	61
4.2.1 Precipitación	61
4.2.2 Evapotranspiración potencial	62
4.2.1 Escurrimiento superficial.....	62
4.2.3 Precipitación efectiva	65
4.2.4 Retención real de humedad en el suelo	66
4.2.5 Evapotranspiración efectiva	69
4.2.6 Balance hídrico considerando diferentes variables	72
4.3 Validación del modelo hidrológico con datos obtenidos en campo	74
4.3.1 Aforo de caudal	74
4.3.2 Infiltración de agua.....	77
4.3.3 Uso de suelo y cobertura vegetal.....	78
4.3.4 Textura del suelo	79
4.4 Propuesta de estrategias de manejo de la cuenca alta del río Tahuando	79

4.4.1 Datos generales de la propuesta.....	80
4.4.2 Diagnóstico y problema.....	80
4.4.3 Objetivos de la propuesta	84
4.4.4 estrategias de ejecución	84
CAPÍTULO V	90
5. Conclusiones y recomendaciones	90
5.1 Conclusiones.....	90
5.2 Recomendaciones	91
CAPITULO VI	92
6.1 Bibliografía.....	92
CAPÍTULO VII.....	95

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3. 1 Descripción de materiales y equipos incluidos en la investigación.....	16
Cuadro 3. 2 Ficha de caracterización biofísica y variables en el campo.....	20
Cuadro 3. 3 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de pendiente del suelo.....	22
Cuadro 3. 4 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según su textura.....	23
Cuadro 3. 5 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal.....	23
Cuadro 3. 6 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.....	24
Cuadro 3. 7 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso de suelo.....	24
Cuadro 3. 8 Ponderación de recarga hídrica según el modelo propuesto	26
Cuadro 3. 9 Puntos de comprobación de áreas de recarga hídrica.....	27
Cuadro 3. 10 Clasificación para determinación de la textura al tacto.....	29
Cuadro 3. 11 Cuadro de estimación de escurrimiento del servicio de conservación de estados (1964).....	37
Cuadro 3. 12 Relación entre textura y pedregosidad del suelo de brokker (1984).....	39
Cuadro 3. 13 Puntos estratégicos para la medición de caudal con molinete electrónico...	42
Cuadro 3. 14 Ficha para el registro de datos de los aforos líquidos superficiales	44
Cuadro 4. 1 Coordenadas de los puntos de la microcuenca alta del río tahuando, datum wgs 84, zona 17 sur.	48
Cuadro 4. 2 Cobertura vegetal de la cuenca alta del río tahuando	49
Cuadro 4. 3 Uso del suelo de la cuenca alta del río tahuando.....	50
Cuadro 4. 4 Zonas de vida de la cuenca alta del río tahuando	51
Cuadro 4. 5 Especies de flora más representativas de la cuenca alta de río tahuando.....	53
Cuadro 4. 6 Especies de fauna más representativas de la cuenca alta de río tahuando.....	54
Cuadro 4. 7 Tipos de suelo de la cuenca alta del río tahuando	55
Cuadro 4. 8 Tipos de clima de la cuenca alta del río tahuando.....	55
Cuadro 4. 9 Subcuencas de la cuenca alta del río tahuando.....	56
Cuadro 4. 10 Áreas de recarga hídrica en la cuenca alta del río tahuando.....	57
Cuadro 4. 11 Precipitación interpolada del año 2009 al 2013	61
Cuadro 4. 12 Evapotranspiración potencial interpolada desde el año 2009 al 2013.....	62

Cuadro 4. 13 Datos de escorrentía del año 2009.....	63
Cuadro 4. 14 Datos de escorrentía del año 2010	63
Cuadro 4. 15 Datos de escorrentía del año 2011	64
Cuadro 4. 16 Datos de escorrentía del año 2012.....	64
Cuadro 4. 17 Datos de escorrentía del año 2013.....	65
Cuadro 4. 18 Precipitación efectiva calculada	66
Cuadro 4. 19 Balance hídrico mensual 2009	68
Cuadro 4. 20 Retención real de humedad en el suelo.	69
Cuadro 4. 21 Evapotranspiración efectiva calculada del año 2009 al 2013.....	70
Cuadro 4. 22 Comparación de la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración efectiva (mm).....	70
Cuadro 4. 23 Cálculo de excedente de agua desde el año 2009 al 2013	71
Cuadro 4. 24 Comportamiento del balance hídrico en la cuenca alta en mm del periodo 2009 al 2013	72
Cuadro 4. 25 Caudales aforados en la cuenca alta del río tahuando	74
Cuadro 4. 26 Comparación de datos aforados en campo y datos calculados en laboratorio	75
Cuadro 4. 27 Caudales calculados en la cuenta del río tahuando y la cuenca alta del río tahuando	77
Cuadro 4. 28 Comprobación de infiltración de agua en la cuenca alta del rio tahuando...	78
Cuadro 4. 29 Textura del suelo	79
Cuadro 4. 30 Elementos del foda analizados para la cuenca alta del río tahuando.....	82
Cuadro 4. 31 Propuesta de estrategia de manejo de la cuenca alta el río tahuando realizada con el análisis del foda.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1	Representación general el ciclo hidrológico con sus principales componentes.	11
Figura 3. 1	Delimitación del área de estudio en el software arcgis 10.2.....	18
Figura 3. 2	Puntos de comprobación de áreas de recarga hídrica en la cuenca alta del río tahuando	28
Figura 3. 3	Determinación de textura del suelo al tacto	29
Figura 3. 4	Determinación de textura del suelo en la cuenca alta del río tahuando	30
Figura 3. 5	Uso de infiltrómetro mec para medir la infiltración del suelo en la cuenca alta del río tahuando	31
Figura 3. 6	Estaciones meteorológicas usadas para la interpolación.....	33
Figura 3. 7	Puntos de toma de caudal con molinete electrónico en la cuenca alta del río tahuando	43
Figura 3. 8	Aforo de caudal en época lluviosa en el puente de angochagua.....	45
Figura 3. 9	Aforo de caudal en época seca en el puente de angochagua.....	45
Figura 4. 1	Ubicación de la cuenca alta del río tahuando.....	48
figura 4. 2	Porcentaje de áreas de recarga hídrica identificadas en la cuenca alta del río tahuando.....	57
figura 4. 3	Área de recarga hídrica moderada en zuleta.....	58
figura 4. 4	Área de recarga hídrica baja en cochas.....	59
figura 4. 5	Área de recarga hídrica baja en angochagua.....	59
figura 4. 6	Área de recarga hídrica muy baja en angochagua (bosque de eucalipto).....	60
figura 4. 7	Capa raster de cantidad potencial de retención de agua.....	67
figura 4. 8	Variables analizadas en el balance hídrico.....	73
figura 4. 9	Bosque en crecimiento de pino en la cuenca alta del río tahuando.....	78
figura 4. 10	Prueba de textura de suelo.....	79

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los elementos más importantes para que la vida en el planeta se desarrolle y mantenga, por lo que a nivel mundial en los últimos años se han realizado varios estudios y se ha puesto un indiscutible interés para la gestión adecuada de este valioso recurso, creando y reformando normativas legales, además de establecer varios convenios para poder controlar el uso y la distribución adecuada del agua. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2010) menciona que existen más de 400 acuerdos sobre cuencas hidrográficas compartidas, la mayoría de ellos entre los países ribereños.

El World Resources Institute (como citó Echavarría, 1999), menciona que el 26% del volumen de agua dulce mundial está en Centro y Sur América, a pesar de ser sólo el 16% del área terrestre mundial, pero no es aprovechado por todos sus ciudadanos y el recurso está siendo amenazado en su calidad y en la capacidad regeneradora de sus fuentes. Mientras que la Secretaria General de la Comunidad Andina (Comunidad Andina, 2010) menciona que “en la región andina se estima que el 78% de la extracción de aguas de fuentes naturales, superficiales y subterráneas se destina para el riego en el sector agrícola, el 13% para el uso doméstico y el 9% restante para el uso industrial”.

Debido a los problemas existentes que no solo se dan en Ecuador, sino también a nivel mundial sobre el uso, la calidad, cantidad y distribución del agua se ha planteado el manejo del recurso hídrico considerándolo de suma importancia, como menciona la Red internacional para el desarrollo de capacidades en la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (CAP-NET, 2008) donde expresa que “la gestión sostenible de los recursos

hídricos es una meta importante que se está adoptando a nivel nacional e internacional en un intento por tratar la escasez de agua, la inequidad, la polución y muchos otros problemas hídricos”.

En Ecuador se ha utilizado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta de apoyo, ya que estos ayudan a manejar grandes volúmenes de datos para realizar diferentes análisis espaciales, dando como resultado modelos integrados que han ayudado a perfeccionar el manejo de las cuencas hidrográficas. Por esto se consideró trabajos que se han hecho dentro y fuera del país para realizar el presente estudio, con el fin de generar modelos digitales del terreno de la cuenca y a partir de estos derivar las características del relieve y características hidrológicas sobre la función de la cuenca alta del río Tahuando, considerando como herramienta de apoyo el software ArcGIS 10.2.

Además de esto también se consideró importante saber las áreas de recarga hídrica que influyen en la cuenca alta del río Tahuando para ver la cantidad de agua disponible con fines de aprovechamiento, esto se basó en la metodología explicada en la Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica (Matus, Faustino y Jiménez, 2009) siendo la información obtenida posteriormente procesada en el software ArcGIS 10.2. Además se realizó el modelo hidrológico con fines de simulación de escorrentía superficial de la cuenca usando capas de información vectorial basándose en el estudio de Determinación de balances hídricos en micro cuencas y subcuencas (Torrinco, 2011).

En la cuenca alta del río Tahuando se han identificado diversos problemas entre ellos está la escasa información hidrológica y meteorológica, limitando investigaciones y actividades que contribuyan al desarrollo de proyectos importantes para los involucrados de esta zona. Esta también el conflicto por el uso del suelo, la Consultora Aguas del Ecuador (2008) menciona que hay avance de frontera agrícola en la cuenca del río Tahuando por el establecimiento de cultivos y sobrepastoreo en áreas de páramo.

La presencia de plantaciones con especies introducidas es otro de los problemas, se encontró plantaciones de eucalipto - *Eucalyptus sp*, ciprés - *Cupressuss empervirens* y pino - *Pinus radiata* (fotografía aérea, 1999) que en conjunto con la reducción de la cobertura

vegetal que en su mayor parte es degradada y la intervención humana es muy notoria como mencionó la Consultora Aguas del Ecuador (2008) pueden provocar importantes alteraciones que intervendrían en las funciones propias de la cuenca. Echavarría (1999) dice que la cobertura vegetal y el suelo cumplen la función de retener la lluvia y la humedad del aire, acumulando el líquido para disponerlo por intermedio de la vegetación al aire y/o alimentar cuerpos de agua como los acuíferos, nacimientos, quebradas, lagos y ríos.

Las aplicación de la metodología para la identificación de áreas de recarga hídrica y la determinación del balance hídrico son relevantes para la generación de información base que permite establecer estrategias aptas para el manejo adecuado de la cuenca. La información generada en la investigación contribuye a los usuarios directos e indirectos, especialmente a la Junta de Regantes de Angochagua y Rosas Pamba, así como también al GAD parroquial de Angochagua como aporte al mejoramiento del Plan de Ordenamiento Territorial.

1.2. Objetivos

Los objetivos planteados para la presente investigación se realizaron en base a los problemas y necesidades existentes en la cuenca alta del río Tahuando, considerando de importancia establecer el siguiente objetivo general y los objetivos específicos.

1.2.1 General:

- Realizar la modelación Cartográfico - Hidrológica de la cuenca alta del río Tahuando mediante herramientas SIG, para determinar la disponibilidad y manejo del recurso agua.

1.2.2 Específicos:

- Identificar las áreas de recarga hídrica en la cuenca alta para determinar la cantidad del recurso hídrico con fines de aprovechamiento.
- Realizar el Modelo Hidrológico de la cuenca alta con fines de simulación de escorrentía superficial.
- Validar el Modelo Hidrológico con datos obtenidos en campo.
- Proponer estrategias para el manejo del recurso hídrico.

1.3 Formulación de pregunta directriz

¿Es posible determinar la disponibilidad y manejo del recurso hídrico en base a la modelación cartográfica, de la cuenca alta del río Tahuando?

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA Y MARCO LEGAL

Dentro de la revisión de literatura se consideró el marco legal ecuatoriano, algunos artículos científicos y temas de tesis donde se analizó la metodología usada con el objetivo de tener una base bibliográfica y legal que ayude a culminar con éxito el presente estudio.

2.1 Marco Legal

En el Marco Legal Ecuatoriano se tomó en cuenta la Constitución de la República del Ecuador aprobada en el año 2008, el Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017, la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua aprobada en agosto de 2014 y la Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre aprobada en septiembre de 2004.

2.1.1 Constitución de la República del Ecuador

Dentro de la Constitución de la República del Ecuador se consideró el Título II que corresponde a los capítulos sobre los Derechos del Buen Vivir y los Derechos de la Naturaleza, además el Título IV que trata sobre el Régimen del Buen Vivir, correspondiente al capítulo sobre Biodiversidad y Recursos Naturales.

En el Título II: Derechos se consideró el Capítulo segundo sobre los Derechos del Buen Vivir con las secciones primera y segunda, además del Capítulo Séptimo sobre los Derechos de la Naturaleza.

Sección primera - Agua y alimentación.- el artículo 12 menciona que el derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.

Sección segunda - Ambiente sano.- en el artículo 14 se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la

sostenibilidad y el Buen Vivir, Sumak Kawsay. Además de declarar de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

Capítulo séptimo - Derechos de la naturaleza.- en el Capítulo Séptimo los artículos 71, 73 y 74 mencionan que la naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos. Además que el Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales.

También menciona que toda persona, comunidad, pueblo o nacionalidad podrá exigir a la autoridad pública el cumplimiento de los derechos de la naturaleza, así como también tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el Buen Vivir, pero estos no serán susceptibles de apropiación; su producción, prestación, su uso y aprovechamiento serán regulados por el Estado.

En el Título VII sobre el Régimen del Buen Vivir se tomó en cuenta el Capítulo segundo sobre la Biodiversidad y Recursos Naturales, a continuación se detalla las secciones consideradas:

Sección primera - Naturaleza y ambiente.- el artículo 395 menciona que La Constitución reconoce los principios ambientales por parte del Estado, donde garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras.

Además las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional. También garantizará la participación activa y

permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales.

Sección tercera - Patrimonio natural y ecosistemas.- los artículos 404 y 406 mencionan que el patrimonio natural del Ecuador único e invaluable comprende, entre otras, las formaciones físicas, biológicas y geológicas cuyo valor desde el punto de vista ambiental, científico, cultural o paisajístico exige su protección, conservación, recuperación y promoción. También regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación, y limitaciones de dominio de los ecosistemas frágiles y amenazados; entre otros, los páramos, humedales. La gestión se sujetará a los principios y garantías consagrados en la Constitución y se llevará a cabo de acuerdo al ordenamiento territorial y una zonificación ecológica, de acuerdo con la ley.

Sección sexta – Agua.- dentro de la sección sexta se consideraron los artículos 411 y 412 donde mencionan que el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. También regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La gestión del agua, planificación, regulación y control estarán a cargo de la autoridad que cooperara y coordinará para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico.

2.2.1 Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017

En el Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017 se consideró el Objetivo 7 que: Garantizar los derechos de la naturaleza y promueve la sostenibilidad ambiental, territorial y global.

Dentro de las Políticas y lineamientos del Patrimonio Hídrico se tomó en cuenta la política 7.6. Donde menciona: Gestionar de manera sustentable y participativa el patrimonio hídrico, con enfoque de cuencas y caudales ecológicos para asegurar el derecho humano al agua. Además se consideró los literales b, d y e que mencionan:

Desarrollar e implementar un inventario hídrico nacional dinámico, considerando las aguas superficiales y subterráneas, establecer mecanismos integrales y participativos de conservación, preservación, manejo sustentable, restauración y reparación integral de la

funcionalidad de las cuencas hidrográficas, fortaleciendo además el ordenamiento territorial con criterios de equidad social, cultural y económica, garantizando la provisión del agua para los usos socioeconómicos y respetando los caudales ecológicos.

2.2.2 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua

En la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua se tomó en cuenta los Capítulos II, III, V, VI y VII, a continuación se detalla cada uno de estos.

Capítulo II: Uso y Aprovechamiento del agua.- En la sección sobre subterráneo y acuífero, el artículo 118 menciona que los sistemas comunitarios, juntas de agua potable, juntas de riego y los usuarios del agua son corresponsables con el Estado de la protección, conservación y manejo del agua subterránea.

Capítulo III: Derechos de la naturaleza.- en la sección sobre los derechos de la naturaleza se consideró el Artículo 64 sobre la conservación del agua donde se dice que la naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación de las aguas con sus propiedades como soporte esencial para todas las formas de vida.

Además para la conservación del agua, se ha tomado en cuenta los literales a, b, c, d, y e que mencionan:

La protección de las cuencas hidrográficas, los ecosistemas, las fuentes, zonas de captación, regulación, recarga, afloramiento y cauces naturales de agua, preservando la dinámica natural del ciclo hidrológico y manteniendo el caudal mínimo ecológico como garantía de los ecosistemas y la biodiversidad. Además menciona la restauración y recuperación de los ecosistemas que hayan sufrido alteraciones por contaminación de aguas o erosión de suelo.

Capítulo V: Derechos colectivos de comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades.- en la sección derechos colectivos de comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades, artículo 72 dice que la participación de comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades en la participación para la conservación, protección y preservación apoyadas e impulsadas por el Estado.

Capítulo VI: Garantías preventivas.- en la Sección primera sobre el caudal ecológico y áreas de protección hídrica, artículo 77 menciona que el caudal ecológico de los cursos permanentes de agua en toda cuenca hidrográfica es intangible, donde toda persona usuaria o no, la autoridad única o instituciones respetaran la cantidad y calidad de agua requerida para la protección de la biodiversidad acuática.

Además en la sección segunda sobre los objetivos de prevención y control de la contaminación del agua en el artículo 79, los literales b, f, y g se dice que la autoridad única del agua, la autoridad ambiental nacional y los gobiernos autónomos descentralizados, trabajarán en coordinación para garantizar la conservación integral y cuidado de las fuentes de agua delimitadas y el equilibrio del ciclo hidrológico, evitando también la degradación de los ecosistemas y preservando la cantidad y mejora de la calidad del agua.

Capítulo VII: Obligaciones del estado para el derecho humano al agua.- en la sección segunda de los usos del agua se consideró el artículo 86 tomando en cuenta el literal c, donde se menciona que de conformidad con la disposición constitucional, la prioridad para los destinos o funciones del agua es el caudal ecológico.

2.2.3 Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre

En la Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre se tomó en cuenta los capítulos III y V, a continuación se detalla cada uno estos.

Capítulo III: De los Bosques y Vegetación Protectores.- sección de los bosques y vegetación protectora, artículo 6, literales b y c mencionan que se consideran bosques y vegetación protectores aquellas formaciones vegetales, naturales o cultivadas, que cumplan con estar situados en áreas que permitan controlar fenómenos pluviales torrenciales o la preservación de cuencas hidrográficas, especialmente en las zonas de escasa precipitación pluvial o que puedan ocupar cejas de montaña o áreas contiguas a las fuentes, corrientes o depósitos de agua.

Capítulo V: De las Plantaciones Forestales.- artículo 14, literales a y b mencionan que la forestación y reforestación previstas deben darse prioritariamente en cuencas de alimentación de manantiales, corrientes y fuentes que abastezcan de agua, también en áreas que requieran de protección o reposición de la cubierta vegetal, especialmente en las de escasa precipitación pluvial.

2.2 Ciclo hidrológico en la cuenca hidrográfica

El ciclo hidrológico es un proceso complejo que empieza cuando se mueve el agua en nuestra atmósfera desde un depósito o reservorio a otro a través de diferentes procesos, cada uno de estos influyen en el funcionamiento de la cuenca hidrográfica ya que esta es considerada como un área de captación natural de agua, los elementos con mayor intervención son: la evaporación, la infiltración, la precipitación y la escorrentía. (Ordoñez, 2011). Además puede haber alteración en el ciclo hidrológico si cada uno de los elementos que conforman la cuenca hidrológica se ve alterado, ya que estos crean un ambiente natural definido y si uno de estos es perturbado puede ocasionar un desequilibrio ambiental. (Maderey y Jiménez, 2000).

En la Figura 2.1 se observa una representación general el ciclo hidrológico con sus principales componentes.

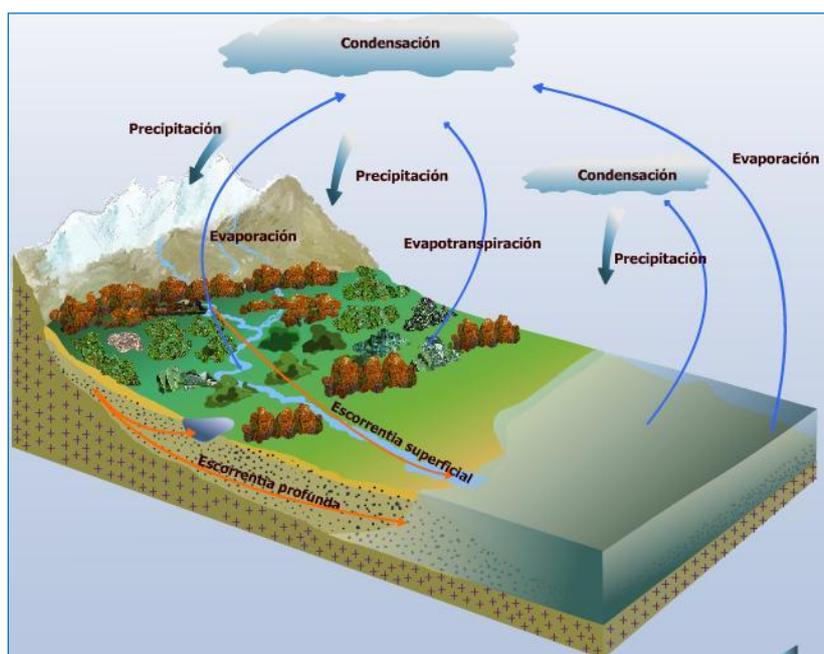


Figura 2. 1 Representación general del ciclo hidrológico con sus principales componentes

Fuente: Sánchez (2011)

En una cuenca hidrográfica cuando hay vegetación arbórea, gran parte del agua de las lluvias regresa a la atmósfera por evaporación o transpiración volviendo a precipitar en la zona circundante (Ordoñez, 2011). Además la infiltración, escurrimiento y escorrentía están estrechamente relacionados ya que la velocidad de infiltración determina la cantidad de agua de escurrimiento superficial en respuesta a una precipitación dada, es decir que los caudales de una cuenca dependerán del volumen de la precipitación, además si la infiltración no se da de forma inmediata puede darse erosión del suelo y arrastre de sedimentos por la escorrentía principalmente en lugares con pendientes fuertes (Martínez, 2013; Mintegui, 2012).

2.2 Áreas reguladoras de agua en las cuencas hidrográficas

La producción de agua dulce en las cuencas hidrográficas proviene del proceso del ciclo hidrológico, siendo la cobertura vegetal influyente directo para la cuenca hidrográfica en diferentes procesos como en la retención, infiltración, la calidad y cantidad de agua.

Medina (2011) menciona que las cuencas hidrográficas son consideradas como áreas reguladoras de agua, sin embargo, la degradación de los recursos naturales reduce la

cantidad y calidad de agua que producen, obstaculizando de esta manera el abastecimiento y acceso adecuado a fuentes de agua para los usuarios de este recurso.

El bosque es un regulador natural de los recursos hídricos, representa un factor estabilizador de la cuenca, pues puede reducir o incrementar la infiltración, ya que la vegetación aumenta la porosidad del suelo, además disminuye la velocidad de escurrido superficial, incrementando la rugosidad de la superficie por la que circula, por último favorece el flujo subsuperficial del agua en los períodos de precipitaciones abundantes (Mintegui y Robredo, 1994).

El páramo andino es conocido como un importante proveedor y regulador de agua, que viene directamente de las actividades productivas y del funcionamiento, además el clima frío y húmedo y los suelos volcánicos favorecen el almacenamiento del agua en el ecosistema. (Acevedo y Rodríguez , 2012)

Los humedales son captadores de agua por excelencia ya que tienen una fuerte permeabilidad, por lo que no permite que se den inundaciones, también funciona como una reserva de agua natural para la flora y fauna existente (García, 2010). Además son considerados como uno de los ecosistemas más productivos del mundo y de gran importancia hidrológica al regular ciclos y dotar de nutrientes a las aguas superficiales y subterráneas (Echaverría, 1999).

Los glaciares almacenan agua dulce en forma de hielo, alimentando los arroyos locales con el agua que liberan en mayor o menor cantidad, dependiendo de la liberación de esta y de las variaciones en el nivel de precipitación, pueden ocasionar una disminución o aumento del caudal en los ríos aguas abajo (Echaverría, 1999).

2.3 Áreas de recarga hídrica

Es importante localizar las recargas hídricas ya que de estas depende la cantidad de agua disponible para la conservación, protección, consumo humano, usos derivados. Por esto se ha considerado la “Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de

recarga en la subcuenca del río Jucuapa, en la región central de Nicaragua” (Matus, Faustino y Jiménez, 2009).

La metodología consistió en elaborar cartografía del tipo de suelo, pendientes, usos del suelo, geología y cobertura vegetal para después procesarla en el software ArcGIS, generando con ello un mapa de áreas potenciales de recargas hídricas. Además de la generación de este, se realizó la identificación de las áreas con los habitantes de la cuenca y comprobando cada una de las áreas de hídricas identificadas.

2.4 Modelación cartográfico – hidrológica

Para la modelación cartográfico hidrológico se consideró la investigación de Duque (2008), donde menciona la simulación de este modelo mediante el uso de una herramienta SIG. La investigación se realizó en el Departamento de Planificación del Gobierno de la Provincia de Pichincha, para el modelamiento de caudal que aporta el río La Chimba hacia el punto de captación del canal del Proyecto de Riego Cayambe – Tabacundo.

Su principal objetivo fue conocer el caudal resultante de la cuenca en dos épocas muy bien diferenciadas al año, la época seca y la época lluviosa, a partir de datos meteorológicos y de variables espaciales como: suelos, cobertura vegetal y topografía. Además, formó parte del proceso de cálculo, el análisis morfológico de cuencas del modelo digital del terreno, para estimar los flujos respectivos.

La modelación cartográfica – hidrológica se basó en la utilización de la ecuación de balance hídrico general, en un periodo de 10 años, de las estaciones meteorológicas de: La Tola, Olmedo Pichincha, Otavalo, Malchinguí - INAMHI, Papallacta y Tomalón – Tabacundo. Los datos usados fueron: precipitación mensual, temperatura máxima, mínima y media días llovidos. El proceso se realizó con la definición de la precipitación y evapotranspiración usando la herramienta de interpolación Kriging, además se definió la infiltración, el coeficiente de escorrentía, la cobertura y uso del suelo, la textura del suelo, pendiente del uso y escorrentía mediante álgebra de mapas.

2.5 Determinación de balance hídrico de la cuenca

Se consideró el estudio “Determinación de balances hídricos en micro cuencas y subcuencas” Torrico (2011). Este se realizó en Bolivia en las cuencas de Escaleras del Municipio de Villa Serrano y San Jorge del Municipio de Mojocoya. La determinación del balance hídrico se realizó con Sistemas de Información Geográfica (SIG) permitiendo determinar el balance hídrico de forma espacial relacionando con las características biofísicas del territorio, el relieve del terreno y los datos meteorológicos especializados.

Para esto se usó datos de ocho estaciones meteorológicas que se encuentran fuera del área de estudio con un periodo diez años (2000 - 2009), además se realizó interpolaciones de datos meteorológicos por estación y por mes para generar mapas de precipitación y temperatura. Se realizó una comparación de elementos del balance hídrico para hacer una comparación entre estos. Los elementos utilizados fueron:

PP = Precipitación interpolada para la cuenca en mm por mes

Pef = Precipitación Efectiva

Escurrimiento = Escurrimiento superficial (considerando también flujo base)

S = Almacenamiento de Humedad en el Suelo

ETA = Evapotranspiración Actual

ETP = Evapotranspiración Potencial

2.6 Influencia de la pendiente del terreno en la cuenca

González (2004) menciona que una de las propiedades de la cuenca hidrológica es la pendiente, generalmente las cuencas de mayores pendientes tienen una escorrentía más veloz, por tanto, tienden a responder más rápidamente a la precipitación, incrementando los caudales punta.

Considerando la influencia de la pendiente en las cuencas hidrográficas se tomó en cuenta la investigación sobre el Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas en la cuenca del río Zadorra (González, 2004). El estudio consistió en analizar las características morfométricas de la

cuenca y la red de drenaje del río Zadorra y sus principales afluentes, señalando la influencia que estos factores tienen en la intensificación o posible atenuación de los procesos y la peligrosidad de las crecidas del río. La conclusión final fue que las características morfométricas, en general, no incrementan, sino que más bien atenúan los efectos y la vigorosidad de las crecidas.

2.7 Estrategias de manejo para cuencas hidrográficas

Se consideró el estudio “Manejo del recurso hídrico y proponer estrategias de gestión integral en la microcuenca del río Mijitayo” realizado en Colombia (Madroñero y Jiménez, 2006). La metodología consistió en hacer un recorrido y reconocimiento del área de estudio, después se determinó el marco legal e institucional para el manejo del agua y la percepción local sobre la problemática del recurso hídrico, considerando a los representantes de instituciones, informantes claves y miembros de la comunidad. Una vez realizado este proceso se realizó el análisis de la información. Finalmente se hicieron las propuestas de estrategias de manejo a partir del análisis del marco legal e institucional de la gestión del agua en la zona de estudio.

También se analizó el estudio “Manejo y gestión de zonas de recarga hídrica de micro cuencas y fuentes de agua para consumo humano en Honduras” (Rodas, 2008). En el estudio se analizó la situación del manejo y gestión de la zonas de recarga hídrica, principalmente de fuentes de agua para consumo humano, se propusieron lineamientos y criterios que apoyen a los decisores al nivel nacional, de municipios y de organizaciones e instituciones que tienen relación o responsabilidad directa con este tema.

El análisis de los lineamientos de políticas, estrategias y acciones se realizó a partir de la recopilación de información primaria y secundaria, incluyendo la aplicación de entrevistas a actores claves de programas, proyectos e instituciones que tienen relación con el manejo y gestión de los recursos hídricos. Así se obtuvo la síntesis de políticas, estrategias y acciones propuesta por los diferentes actores claves, además de elementos y recomendaciones de políticas, así como condiciones habilitadoras para el manejo y gestión de las zonas de recarga hídrica.

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En el Capítulo III se describe los materiales, equipos y la metodología utilizada en las fases de campo y laboratorio que ayudaron a culminar con éxito la investigación.

3.2 Materiales y equipos

Los materiales y equipos que se usaron fueron elegidos de acuerdo a la necesidad que se requirió en la investigación.

En el cuadro 3.1 se puede observar la descripción de los materiales y equipos usados.

Cuadro 3. 1 Descripción de materiales y equipos incluidos en la investigación.

Materiales	Equipos	Materiales de oficina
<ul style="list-style-type: none">• Estacas de madera de 30cm• Regla metálica de 30 cm• Flexómetro de 50m• Botas de caucho• Poncho de aguas• Cuerda de 15 m• Pala manila• Martillo	<ul style="list-style-type: none">• Vehículo• Impresora• GPS GARMIN• Molinete electrónico Rickly Hydrological• Cámara fotográfica• Infiltrómetro Tec	<ul style="list-style-type: none">• Computador personal• Libretas de campo• Fichas para registro de aforos• Cartas topográficas del IGM a escala 1:50.000, formato digital• Anuarios meteorológicos del INAMHI• Software Arc GIS 10.2• Software PETP V2.0.0

Elaboración: Autora

3.2 Metodología

Las metodologías empleadas se escogieron con el fin de tener una base de datos que contribuyan con el desarrollo y culminación del objetivo general y los objetivos específicos planteados.

3.2.1 Caracterización biofísica del área de estudio

Se realizó la caracterización del área de estudio para elaborar una base de datos con información biofísica e hídrica, para esto se usó la metodología realizada por Reyes y Suazo (2007) que consideraron varias herramientas de investigación como recorridos en campo, entrevistas y revisión de información secundaria para la caracterización del área de estudio, además se delimito y definió el área de estudio.

3.2.1.1 Delimitación y definición del área de estudio

Se realizó la delimitación y definición del área de estudio en la cuenca alta del río Tahuando, para esto se usó las cartas topográficas en formato digital de Cayambe y San Pablo del Lago del año 1985 obtenidas del geoportal del Instituto Geográfico Militar a escala 1:50.000. Estas contienen información en formato vectorial, entre los datos más utilizados están; las viviendas, poblados, ríos, vías y curvas de nivel.

La información se procesó en el software ArcGIS 10.2, para la delimitación del área de estudio se usó como base la capa de curvas de nivel, donde se definió el límite considerando el área de origen del río Tahuando como inicio, y la salida de la cuenca se definió en el punto de captación de la acequia Rosas Pamba, la misma que provee de agua de riego a la parte media de la cuenca. El punto de cierre de la cuenca se encuentra a una altitud de 2620 msnm y coordenadas: X = 823802; Y = 10028281.

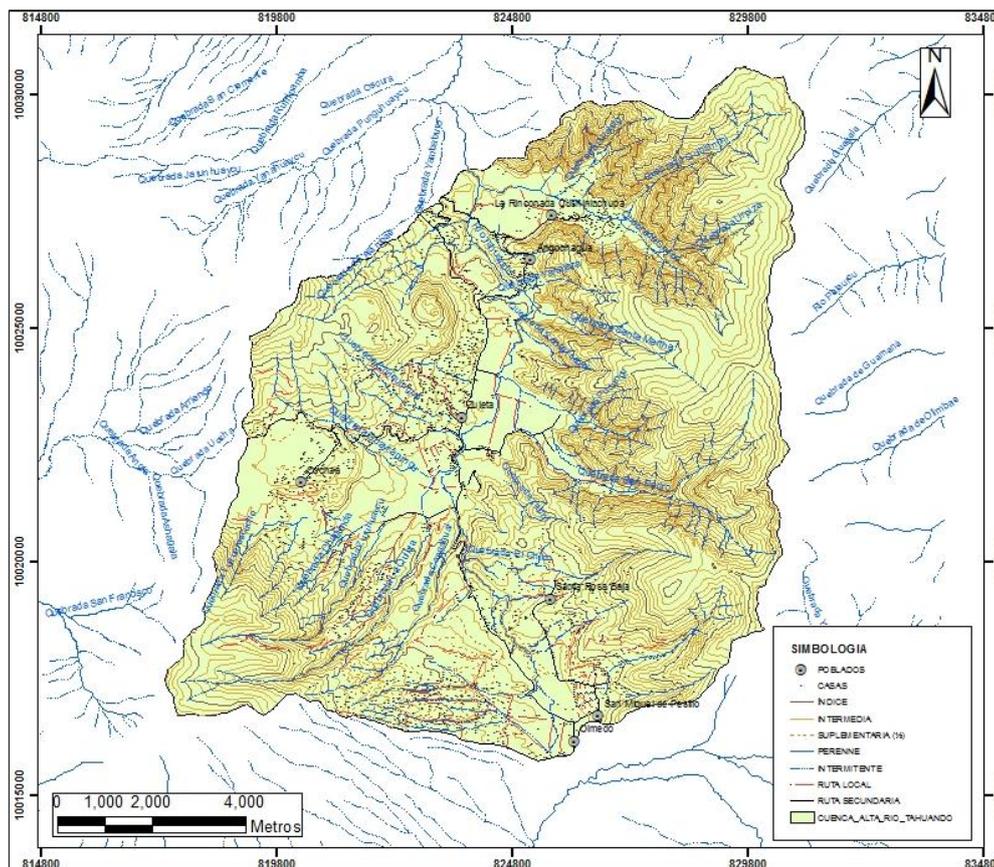


Figura 3. 1 Delimitación del área de estudio en el software ArcGIS 10.2

Elaboración: Autora

Además se realizó el mapa de ubicación usando información descargada del geoportal del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2012) de los límites de Colombia, Perú y Ecuador, también se usó información de Ecuador por parroquias y Ecuador por cantones, esta fue descargada en formato vectorial y procesada en el software ArcGIS 10.2. El cálculo del área total de estudio se lo hizo en el mismo software, usando la herramienta Calculate Geometry (Anexo 1, Mapa 1).

3.2.1.2 Caracterización de factores bióticos

La caracterización de factores bióticos se basó en salidas de campo realizadas en la época lluviosa y en la época seca, esto se efectuó mediante recorridos usando la ficha de caracterización biofísica y variables en el campo (Cuadro 3.2), además se aplicaron entrevistas a los moradores locales.

El recorrido del área se realizó con la ayuda del mapa base elaborado previamente en el laboratorio de Geomática usando información de las cartas de San Pablo del Lago y Cayambe en formato vectorial del Instituto Geográfico Militar (IGM, 1989), para esto se usaron las capas de vías, poblados, viviendas, ríos y puentes principalmente. Esta información se procesó en el software ArcGIS 10.2. Para la obtención del mapa se delimitó la información con el área de estudio, la escala de elaboración fue de 1:10.000 (Anexo 1. Mapa 2).

Con el empleo del navegador GPS Garmín y empleando la proyección UTM Datum WGS84 en Zona 17S se obtuvo la altitud, las coordenadas en X y en Y, además del Azimut 1 y Azimut 2 de la zona seleccionada para el levantamiento de información.

La descripción del uso del suelo, cobertura vegetal y la flora se realizó por observación directa, en lo concerniente a fauna se observó algunas especies de aves, en los grupos de mamíferos, anfibios y reptiles se consultó a los moradores cercanos mediante entrevista.

Para fortalecer la información levantada en campo se elaboró cartografía sobre el uso del suelo, la cobertura vegetal y las zonas de vida, esto se realizó con información obtenida del geoportal del Sistema Nacional de Información (SNI) a escala 1:50.000 y procesada en el software ArcGIS 10.2, se usó la información vectorial de la capa de cobertura del suelo y ecológico, se clasificó de acuerdo a la necesidad que se tenía. Los mapas fueron elaborados a escala 1: 10.000 (Anexo 1, Mapa 3, 4 y 5).

En el cuadro 3.2 se observa la ficha de caracterización biofísica y variables en el campo usada en la cuenca alta del río Tahuando.

Cuadro 3. 2 Ficha de caracterización biofísica y variables en el campo.

CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA					
TESIS:					
NOMBRE:			FECHA:		
PUNTO	COORDENADA X	COORDENADA Y	ALTITUD msnm	FOTOGRAFÍA	
	AZIMUT 1	AZIMUT 2	PENDIENTE %		
COMPONENTE BIÓTICO	USO DEL SUELO	COBERTURA VEGETAL	FLORA	FAUNA	ZONA DE VIDA
COMPONENTE SOCIOECONÓMICO	POBLADOS	ACTIVIDADES ECONÓMICAS	SERVICIOS BÁSICOS	COMPONENTE SOCIOECONÓMICO	POBLADOS
Observaciones:.....					
.....					

Elaboración: Autora

3.2.1.3 Caracterización de factores abióticos

La caracterización de factores abióticos se realizó en laboratorio, se elaboró la cartografía sobre los tipos de suelo, tipos de clima, geología y pendientes del terreno. Los mapas fueron elaborados usando información descargada del Sistema Nacional de Información a escala 1:50.000 en formato vectorial, los datos se delimitaron con el área de estudio y se clasificaron de acuerdo a la necesidad de la información requerida. El proceso se realizó en

el software ArcGIS 10.2. Los mapas fueron elaborados a escala 1:10.000 (Anexo 1, Mapa 6, 7, 8, y 9).

3.2.2 Identificación de áreas de recarga hídrica

Se realizó la identificación de las áreas de recarga hídrica en la cuenca alta del río Tahuando para determinar la cantidad del recurso hídrico con fines de aprovechamiento, para esto se utilizó la Guía práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica elaborada por el Centro Agronómico Tropical de Investigación (Matus, Faustino y Jiménez, 2009). Esta metodología consiste en hacer un análisis utilizando variables ambientales definidas, sobreponiendo capas de información en formato shapefile y comparando la información obtenida con tablas de parámetros establecidos sobre: la pendiente del suelo, el tipo de suelo, la obertura vegetal, la litología y el uso de suelo. Finalmente se aplica la ecuación 1 de recarga hídrica (ZR), el resultado se compara con los parámetros para la identificación. El proceso se realiza mediante el uso Sistemas de Información Geográfica.

3.2.2.1 Elaboración de cartografía

La elaboración de cartografía se realizó utilizando información descargada de la página del Sistema Nacional de Información a escala 1:50.000 en formato vectorial, las variables usadas son: la pendiente del suelo, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la geología y el uso del suelo. La información se la procesó mediante el software ArcGIS 10.2, obteniendo una base de datos para la identificación de las áreas de recarga hídrica.

La identificación de las áreas de recarga hídrica se realizó con el siguiente proceso:

1. Obtención de datos sobre la pendiente del suelo, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la litología y el uso del suelo en formato vectorial
2. Delimitación de información descargada con el área de estudio
3. Clasificación de la información de cada una de las variables
4. Análisis, comparación y adaptación de la información con las tablas de las variables establecidas
5. Sobre posición de información en formato vectorial de las variables estudiadas

6. Cálculo de las áreas de recarga hídrica
7. Análisis y comparación del resultado obtenido en la fórmula de recarga hídrica
8. Identificación de áreas de recarga hídrica
9. Elaboración de mapa de áreas de recarga hídrica

A continuación se describe cada uno de los parámetros de la metodología que se usó para la identificación de las áreas de recarga hídrica en la cuenca alta del río Tahuando.

➤ **Pendiente del suelo**

En el cuadro 3.3 se detalla la ponderación de recarga hídrica según el tipo de pendiente del suelo.

Cuadro 3. 3 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de pendiente del suelo.

Micro relieve	Pendiente (%)	Posibilidad de recarga	Ponderación
Plano a casi plano, con o sin rugosidad	0 -6	Muy alta	5
Moderado 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: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

➤ **Tipo de suelo**

En el cuadro 3.4 se detalla la ponderación de recarga hídrica según la textura de suelo.

Cuadro 3. 4 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según su textura.

Textura	Posibilidad de carga	Ponderación
Suelos franco arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios, con muy rápida capacidad de infiltración (más de 25 cm/h)	Muy alta	5
Suelos francos, con parte iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración (12,7 – 25 cm/h)	Alta	4
Suelos franco limosos, con partículas de tamaño medio o finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2 – 12,7 cm/h)	Moderada	3
Suelos franco arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderada capacidad de infiltración (0,13 – 2 cm/h)	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados (menos de 0,13 cm/h)	Muy baja	1

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

➤ **Cobertura vegetal**

En el cuadro 3.5 se detalla la ponderación de recarga hídrica según la cobertura vegetal del suelo.

Cuadro 3. 5 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el porcentaje de cobertura vegetal.

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

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

➤ **Litología**

En el cuadro 3.6 se detalla la ponderación de recarga hídrica según la litología.

Cuadro 3. 6 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el tipo de roca.

Rocas	Posibilidad de carga	Ponderación
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados, con macroporos interconectados; por ejemplo: arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo.	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo: arena fina o arenisca con poca cementación.	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros.	Moderada	3
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de grava con arcilla.	Baja	2
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas, constituidas por partículas muy fina, sin presencia de fracturas.	Muy baja	1

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

➤ **Uso del suelo**

En el cuadro 3.7 se detalla la ponderación de recarga hídrica según el uso del suelo.

Cuadro 3. 7 Ponderación de la posibilidad de recarga hídrica según el uso de suelo.

Uso del suelo	Posibilidad de carga	Ponderación
Bosque donde se dan los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas	Muy alta	5
Sistema agroforestales o silvopastorales	Alta	4
Terrenos cultivados y con obras de conservación de agua y suelo	Moderada	3
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	Baja	2
Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy baja	1

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

3.2.2.2 Cálculo para la identificación de áreas de recarga hídrica

La identificación de las áreas de recarga hídrica consistió en el uso de la base de datos sobre: la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la litología y el uso del suelo, procesados en el software ArcGIS 10.2 y a través del análisis con los parámetros establecidos en la metodología, se aplicó la ecuación 1 de áreas de recarga hídrica (ZR).

Dicha ecuación se obtuvo del estudio “Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa” (Matus, 2007), la metodología para la obtención de la ecuación consistió en que una vez identificados los elementos que integran el modelo, se asignan pesos relativos o ponderaciones a cada elemento, en función de la importancia que cada uno representa en el proceso de infiltración del agua.

Según Matus (2007), la ponderación se basó en la experiencia e información de extensionistas para asignar valor a cada elemento. Se utilizó dos métodos para el análisis multicriterio: a) la clasificación según la importancia y b) el rateo. Una vez obtenidas las ponderaciones, se realizó una sumatoria de todos los valores (de todos los elementos), después se obtuvo un peso promedio de cada elemento y por cada método. Finalmente los datos obtenidos tanto del método de clasificación como el del rateo se calcularon para obtener un promedio de los dos métodos para cada elemento. A continuación se muestra la ecuación 1 con los datos finales obtenidos.

Ecuación 1. Identificación de áreas de recarga hídrica:

$$ZR = [0,27(Pend) + 0,23 (Ts) + 0,12 (Tr) + 0,25 (Cve) + 0,13 (Us)] \text{ (Matus, 2007)}$$

Donde:

Pend: Pendiente y microrrelieve

Ts: Tipo de suelo

Tr: Tipo de roca

Cve: Cobertura vegetal permanente

Us: Usos del suelo

La ecuación 1 se empleó en Guatemala en el estudio “Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del río Negro, ciudad de Guatemala sistematización de práctica profesional” realizado por Cáceres (2015). La autora utiliza los mismos pesos de los parámetros de la ecuación obtenidos a través del análisis multicriterio de los autores originales para Costa Rica.

Se encontró el empleo la ecuación 1 en el estudio “Plan de manejo y conservación de zonas con potencial de recarga hídrica, micro cuenca Las Jaguas, Ciudad Antigua” en Nicaragua Castro (2011). El autor utiliza la ecuación con los mismos pesos establecidos por los autores originales.

Además está el estudio realizado en Colombia “Estimar la vulnerabilidad intrínseca de los sistemas acuíferos presentes en el área del Municipio de Ambalema, Departamento del Tolima, Colombia” realizado por Ruiz y Stella (2015). Los autores usan la ecuación 1 con los pesos establecidos por los autores originales.

3.2.2.3 Identificación de áreas de recarga hídrica

Para determinar las áreas de recarga hídrica de la cuenca, se evaluó el resultado obtenido mediante la ecuación 1 de áreas de recarga hídrica (ZR), el valor final dado se comparó con la tabla potencial de recarga hídrica.

A continuación se detalla la tabla 3.8 de potencial de recarga hídrica que indica la posibilidad de recarga hídrica y la ponderación.

Cuadro 3. 8 Ponderación de recarga hídrica según el modelo propuesto

Posibilidad de carga	Ponderación
Muy alta	5
Alta	4
Moderada	3
Baja	2
Muy baja	1

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

3.2.2.4 Comprobación de áreas de recarga hídrica

La comprobación de áreas de recarga hídrica se realizó en el área de estudio, comparando y comprobado cada uno de los resultados simulados en laboratorio con los obtenidos en campo, las variables analizadas fueron: la textura del suelo, la cobertura vegetal, la infiltración del suelo y el uso del suelo.

Para la comprobación de recargas hídricas se consideraron puntos de recargas: moderados, bajos y muy bajos. En el cuadro 3.9 se detalla el lugar, el tipo de recarga, las coordenadas y la altitud donde se realizó la comprobación de áreas de recarga hídrica.

Cuadro 3. 9 Puntos de comprobación de áreas de recarga hídrica.

PUNTO	LUGAR	RECARGA HIDRICA	COORDENADA		ALTITUD
			X	Y	
1	Zuleta	Moderado	823705	10022020	2905
2	Angochagua	Bajo	824939	10025837	2778
3	Cochas	Bajo	820215	10022000	3194
4	Angochagua (bosque eucalipto)	Muy bajo	823601	10027477	2730

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

La figura 3.2 muestra los puntos de comprobación de Áreas de Recarga Hídrica en la cuenca alta del río Tahuando.

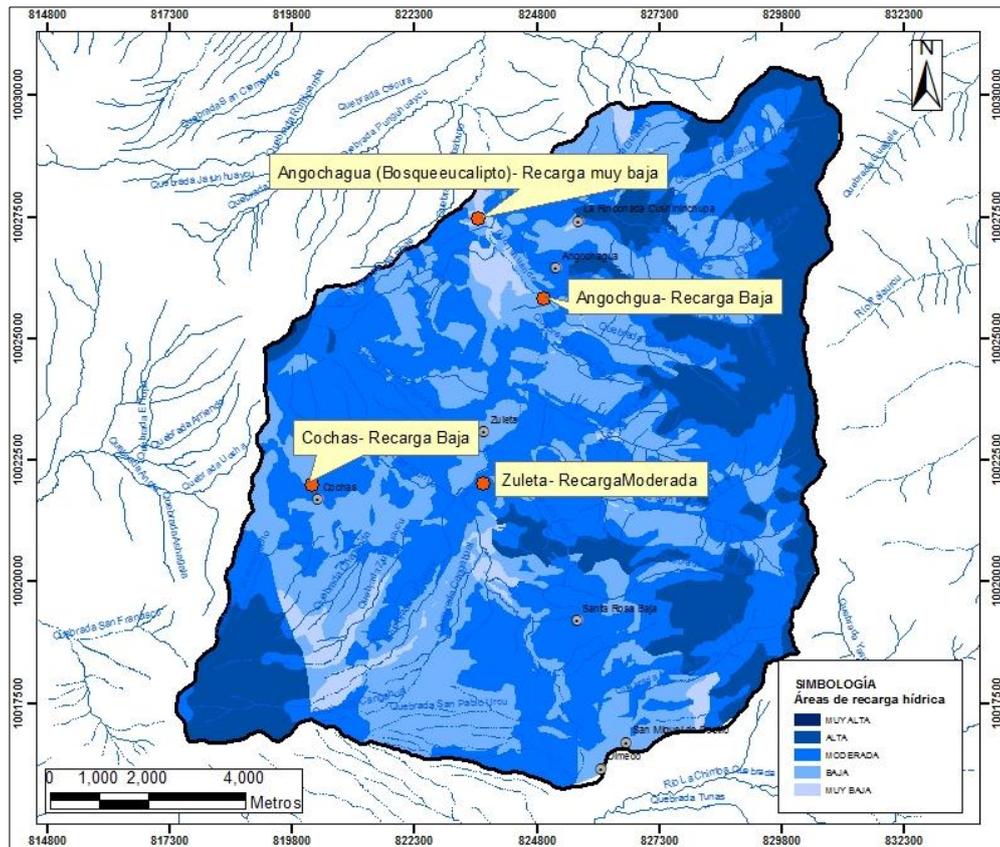


Figura 3. 2 Puntos de comprobación de Áreas de Recarga Hídrica en la cuenca alta del río Tahuando

Elaboración: Autora

➤ **Comprobación de la textura de suelo**

La comprobación de la textura del suelo se realizó en campo siguiendo la metodología de Matus, Faustino y Jiménez (2009), que consistió en:

1. Selección de tres sitios en el área de estudio en forma de zigzag.
2. Realización de un hoyo cuadrado de 30 centímetros de profundidad del ancho de la pala usada.
3. Toma de muestra en forma de lámina fina de cada una de las paredes del hoyo.
4. Mezcla de las tres muestras obtenidas.
5. Humedecimiento y moldeamiento de muestras obtenidas.
6. Determinación de textura de suelo de acuerdo a las características de la muestra obtenida comprobando con la tabla de clasificación de la textura del suelo elaborada por Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica.

Cuadro 3. 10 Clasificación para determinación de la textura al tacto.

A	Arenoso	La muestra permanece suelta y en granos simples; puede ser amontonado pero no moldeado.
B	Franco arenoso	La muestra se puede moldear en forma esférica pero se desgrana fácilmente, con más sedimentos.
C	Limoso	La muestra se puede enrollar en cilindros cortos.
D	Franco	La muestra tiene partes iguales de arena, sedimentos y arcilla que pueden ser amasadas en una trenza gruesa de hasta 15 cm de largo que se rompe al doblarse.
E	Franco arcilloso	La muestra puede ser amasado y formar una D fácilmente; si se hace con cuidado, se puede doblar en U sin romperse
F	Arcilla liviana	La muestra es suave y al doblarse en un círculo se agrieta un Poco.
G	Arcilla	La muestra se maneja como plastilina; se puede formar un círculo sin que se agriete.

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

Elaboración: Autora

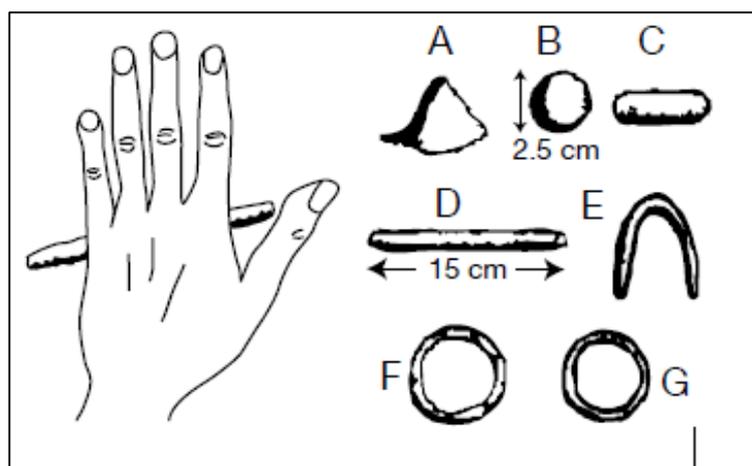


Figura 3. 3 Determinación de textura del suelo al tacto

Fuente: Guía Práctica para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica (2009).

La figura 3.4 muestra a la autora en el proceso para la determinación de textura del suelo.



Figura 3. 4 Determinación de textura del suelo en la cuenca alta del río Tahuando

Elaboración: Autora

➤ **Comprobación de infiltración del suelo**

La comprobación de infiltración del suelo se realizó en campo mediante Infiltrómetro Tec de doble anillo siguiendo la metodología de Matus, Faustino y Jiménez (2009) que consiste en:

1. Colocación el infiltrómetro en el área seleccionada de estudio (tres ensayos).
2. Colocación del anillo sobre el área y enterramiento a 10 cm de profundidad uniformemente.
3. Programación del infiltrómetro Tec con un tiempo de 15 minutos.
4. Vaciado del agua suavemente dentro del anillo hasta cubrir completamente.
5. Registro de la distancia que se demora en infiltrar el agua en el transcurso de los 15 minutos.

La figura 3.5 muestra a la autora realizando la prueba de infiltración del suelo en el área de estudio.



Figura 3. 5 Uso de Infiltrómetro Tec para medir la infiltración del suelo en la cuenca alta del río Tahuando

Elaboración: Autora

➤ **Comprobación de la cobertura vegetal y el uso de suelo**

La comprobación de la cobertura vegetal y el uso del suelo se realizaron por observación directa en campo utilizando la tabla de caracterización biofísica y variables en el campo (Cuadro 3.2).

3.2.3 Realización el modelo hidrológico

Se realizó el modelo hidrológico de la cuenca alta del río Tahuando con fines de simulación de escorrentía superficial, para esto se utilizó la metodología del estudio “Determinación de balance hídrico en cuencas y micro cuencas” (Torrice, 2011). El proceso consistió en la interpretación de elementos del balance hídrico, se usó la precipitación, precipitación efectiva, escurrimiento, almacenamiento de humedad en el suelo, evapotranspiración actual y evapotranspiración potencial.

El proceso consistió en preparar una base de datos con información disponible tanto meteorológica como vectorial, interpolación para tener un estimado de la precipitación y evapotranspiración del área de estudio. Para el cálculo del escurrimiento superficial, precipitación efectiva, almacenamiento de humedad en el suelo, el déficit y excedente de agua se usó la ecuación 2 del balance hídrico.

Ecuación 2. El balance hídrico.

$$P = ETa + D + R + \Delta S \quad (\text{Torrice, 2011})$$

Donde:

P = precipitación

ETa = evapotranspiración real

R= escurrimiento superficial

ΔS = variación en la retención de almacenamiento de agua en el suelo

D = drenaje (infiltración profunda o percolación)

3.2.3.1 Preparación de base de datos

La base de datos se obtuvo con información meteorológica solicitada al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2015) de cuatro Estaciones Meteorológicas que se encuentran fuera del área de estudio, cabe recalcar que no se usó la información disponibles de las estaciones: Mariano Acosta, Topo – Imbabura Angla, Zuleta, Cayambe, Cajas - Mojanda, Olmedo - Pichincha y UTN - INAMHI, por no contar información en el periodo planteado para el estudio.

Se utilizó además información obtenida del geoportal del Sistema Nacional de Información (SNI) en formato vectorial.

En la figura 3.6 se observa las estaciones meteorológicas que fueron usadas para el cálculo del balance hídrico.

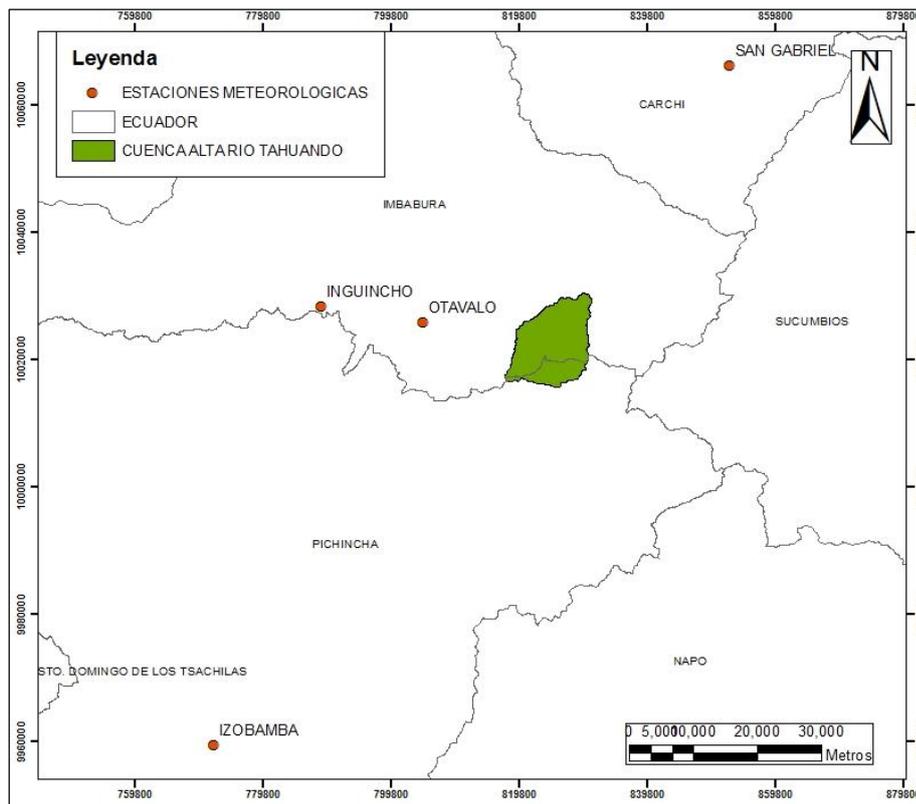


Figura 3. 6 Estaciones Meteorológicas usadas para la interpolación

Fuente: Autora

➤ Información Meteorológica

En la información meteorológica se usó promedios mensuales para el cálculo de la precipitación interpolada, mientras que para la evapotranspiración se usó información promedio mensual de la humedad relativa, heliofanía, temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima y la velocidad del viento de las Estaciones Meteorológicas de Otavalo, Angochagua, San Gabriel e Izoabamba en un periodo de cinco años (desde el año 2009 al 2013) no se requirió de relleno de datos. La información fue procesada en Microsoft Excel y después en el software ArgGIS 10.2.

➤ Información en formato vectorial

La información en formato vectorial obtenida que se usó son: las capas del uso de suelo del año 2014, textura del suelo y las curvas de nivel, esta información fue procesada en el software ArgGIS 10.2.

3.2.3 Precipitación

La precipitación se realizó el método de interpolación, el proceso se realizó con datos consecuentes de la precipitación promedio mensual de las Estaciones Metodológicas de Otavalo, Ingicho, San Gabriel e Izobamba en un periodo de cinco años (desde el año 2009 al 2013), para obtener datos estimados de dicha variable considerando que no se dispone de información meteorológica dentro del área de estudio en el periodo planteado. La información se procesó en el software ArgGIS 10.2 con la herramienta de interpolación Kriging y después definida al límite de la cuenca, obteniendo 12 raster por año con una resolución espacial de 20 m² de pixel.

3.2.4 Evapotranspiración potencial (ETp)

La evapotranspiración se realizó por el método de interpolación, se usó datos consecuentes de promedio mensual de la humedad relativa, heliofanía, temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima y la velocidad del viento de las Estaciones Meteorológicas de Otavalo, Angochagua, San Gabriel e Izobamba en un periodo de cinco años (desde el año 2009 al 2013), no hubo datos faltantes por lo que no fue necesario el relleno. La información se procesó en el software libre Programa Evapotranspiración Potencial PETP V2.0.0 (Gutierrez, 2016) mediante la ecuación 3 de Penman Monteith.

Ecuación 3. Penman – Monteith.

$$ET_o = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{10}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{90}{T + 275} u_2 (e_s - e_a) \right]$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

γ* = constante psicométrica modificada utilizada en el método de Penman-Monteith (mbar/°C)

e_s – e_a = déficit de presión de vapor (mb)

e_s = presión de vapor a saturación a la temperatura promedio del aire (mb)

e_a = presión de vapor tomada a la temperatura a punto de rocío (mb)

L = calor latente de vaporización (cal/gr)

Δ = pendiente de la curva de presión de la saturación de vapor a una temperatura específica (mbar/°C)

γ = constante psicométrica

R_n = energía de radiación neta (cal/(cm² día))

T = temperatura promedio (°C)

G = flujo termal del suelo (cal/cm²)

Constante psicométrica:

$$\gamma = \frac{C_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

γ = constante psicométrica [kPa ° C⁻¹],

P = la presión atmosférica [kPa],

λ = calor latente de vaporización, 2,45 [MJ kg⁻¹],

C_p = calor específico a presión constante, 1,013 10⁻³ [MJ kg⁻¹ ° C⁻¹],

ε = peso molecular relación correo de vapor de agua / aire seco = 0,622.

Después de obtener la evapotranspiración mensual se procesó los datos en el software ArgGIS 10.2 con la herramienta de interpolación Kriging y se definió con el límite de la cuenca obteniendo 12 raster por año con una resolución espacial de 20 m² de pixel.

3.2.5 Escurrimiento Superficial

El cálculo de escurrimiento superficial se realizó por medio de la determinación de tres variables: el uso del suelo, textura del suelo y pendiente para obtener los datos de vegetación, velocidad de infiltración y pendiente del terreno (Torinco, 2011).

➤ **Vegetación**

Se realizó el mapa de vegetación, para esto se usó información obtenida del geoportal del Sistema Nacional de Información (SNI) en formato vectorial de la capa de uso del suelo, este se reclasificó adaptando la información existente a cinco categorías usadas en la clasificación de Servicio de Conservación de Suelo de 1964 (Torrinco, 2011). Las categorías a usarse son: los terrenos cultivados, pastizal y terrenos abiertos, sin vegetación, terrenos con arbusto y bosque (vegetación densa), el proceso se realizó en el software AcrGIS 10.2 obteniendo un raster con una resolución espacial de 20 m² de pixel.

➤ **Velocidad de infiltración**

La velocidad de infiltración se calculó con información obtenida del geoportal del Sistema Nacional de Información (SNI) en formato vectorial de la capa de textura de suelo. La reclasificación se realizó apoyándose en la clasificación de US Soil Conservation, donde se asignan tres tipos de velocidad de infiltración del suelo: la baja, la moderada y la alta (Torrinco, 2011). El proceso se realizó en el software AcrGIS 10.2 obteniendo un raster con una resolución espacial de 20 m² de pixel.

➤ **Pendiente del terreno**

La pendiente del terreno se calculó usando información obtenida del geoportal del Sistema Nacional de Información (SNI) en formato vectorial de la capa de curvas de nivel y el límite de la cuenca previamente elaborado, para la reclasificación se usó los siguientes rangos: 0-1%; 1-5%; 5-20%; 20-50% y >50% (Torrinco, 2011). El proceso se realizó en el software AcrGIS 10.2 obteniendo un raster con una resolución espacial de 20 m² de pixel.

➤ **Cálculo de escurrimiento superficial**

Con la reclasificación de las capas de vegetación, velocidad de infiltración y pendiente del terreno se obtuvo la base de datos para el cálculo del escurrimiento superficial. El cruce de las tres capas reclasificadas se realizó basándose en la tabla de estimación del

escurrimiento del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de 1964 (Torrinco, 2011).

En el cuadro 3.11 se observa la estimación del Servicio de Conservación de Estados (1964).

Cuadro 3. 11 Cuadro de estimación de escurrimiento del Servicio de Conservación de Estados (1964).

Vegetación	Velocidad de infiltración	Pendiente				
		>50%	50-20%	20-5%	5-1%	<1%
Sin vegetación	Bajo	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Moderado	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Alto	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Bajo	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Moderado	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Alto	0,40	0,35	0,30	0,30	0,25
Pasto y vegetación abierta	Bajo	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Moderado	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Alto	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Arbustos	Bajo	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Moderado	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Alto	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosque, vegetación densa	Bajo	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Moderado	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Alto	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Fuente: Determinación de balances hídricos en micro cuencas y subcuencas (2011).

Elaboración: Autora

3.2.5 Precipitación efectiva

La precipitación efectiva (P_e) se calculó en milímetros/mes (mm/mes), esto se lo realizó con las capas de precipitación interpolada y el escurrimiento superficial en formato raster, usando la herramienta Raster calculator del software ArcGIS 10.2 basándose en la ecuación 4.

Ecuación 4. Precipitación efectiva

$$\text{Precipitación efectiva} = \text{precipitación} - \text{escurrimiento.}$$

3.2.5 Retención real de humedad del suelo

La retención real de humedad del suelo se calculó con la precipitación efectiva, la capacidad potencial de retención y la evapotranspiración potencial (ecuación 5), además se determinó la capacidad potencial de retención y el mes balanceado para tomar como inicio del cálculo.

3.2.5.1 Capacidad potencial de retención

El cálculo de la capacidad potencial de la retención se calculó con los datos de profundidad del suelo y la capacidad de retención del agua (ecuación 5).

➤ Capacidad de retención del agua

El cálculo de la capacidad de retención de agua en el suelo se realizó con la información del geoportal del Sistema Nacional de Información (SNI) en formato vectorial de las capas de pedregosidad y textura del suelo. Los datos de las dos capas se reclasificaron adaptándose al cuadro 3.12 de la relación entre textura y pedregosidad del suelo de Brokker en 1984 (Torrinco, 2011). En los datos de pedregosidad se consideró también la profundidad del suelo, ya que la pedregosidad de la cuenca es menor al 10 %.

Cuadro 3. 12 Relación entre textura y pedregosidad del suelo de Brokker (1984).

Textura	Capacidad de retención de agua en el suelo (mm/m)					
	Pedregosidad y grava en porcentajes					
	0%	0-5%	5-15%	15-40%	40-80%	>80%
Arcillo	140	130	120	90	50	10
Franco	170	160	140	110	40	20
Arenoso	90	80	70	60	30	10
Areno francoso	110	100	90	70	40	10
Arcilloso arenoso	110	100	90	70	40	10
Arcillo franco	150	140	130	100	55	10
Arenoso	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Franco arenoso	150	130	120	100	55	10
Arcillo limoso	160	140	130	110	55	10
Arcillo franco	170	150	140	110	65	20
Limoso	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Franco limoso	190	170	150	130	70	20
Franco arcilloso	150	130	120	100	55	10

Fuente: Determinación de balances hídricos en micro cuencas y subcuencas (2011).

Elaboración: Autora

➤ **Profundidad del suelo**

La profundidad del suelo se calculó con la información obtenida del geoportal del Sistema Nacional de información (SNI) en formato vectorial de la capa de textura del suelo, siendo procesada en el software ArcGIS 10.2 y transformada a formato raster con una resolución espacial de 20m² de pixel.

➤ **Cálculo de la capacidad potencial de retención**

La capacidad potencial de retención de agua se calculó con la herramienta Raster calculator del software Arcgis 10.2 usando la ecuación 5.

Ecuación 5. Capacidad potencial del agua en el suelo

Capacidad potencial de retención = profundidad del suelo x capacidad de retención del agua

➤ Cálculo de Retención real de humedad del suelo

La retención real de la humedad del suelo se realizó con la precipitación efectiva, capacidad potencial de retención y la evapotranspiración potencial (ecuación 6), para determinar el mes de inicio del cálculo se realizó el cálculo del mes balanceado, definiendo al mes de noviembre de 2009 óptimo para el inicio de este proceso, ya que en ese mes la cantidad de agua almacenada es cero considerando que en el mes de diciembre se obtendría el valor real de la retención de humedad del suelo, dicho cálculo se realizó con la ecuación 7.

Ecuación 6. Calculo de la retención real de humedad del suelo:

$$S(a) = P(\text{ef}) + S(a)_{\text{mes-1}} - ETa$$

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

Donde:

S(a) = almacenamiento real

P(ef) = precipitación efectiva

S(a)mes-1 = almacenamiento real del mes anterior

ETp = Evapotranspiración potencial

S(p) = almacenamiento potencial

➤ Cálculo del balance mensual

La definición del balance mensual para determinar el mes de inicio del cálculo se realizó con la ecuación 6 que se deriva de la ecuación del balance hídrico teniendo:

$$P - ETp - I - \Delta SI = 0$$

$$P - ETp = \Delta S$$

$$\Delta S = S(t) - S(a)$$

Ecuación 7. Mes balanceado

$$P - ETp + S(a) = S(t)$$

Donde:

P= precipitación

ETp: evapotranspiración

I: infiltración

Δs : variación de almacenaje

S(a): almacenaje real

S(t): almacenaje total

Se usó como hipótesis que el almacenaje total de agua podría ser 100 y el almacenaje real 0.

3.2.5.2 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real se calculó con la precipitación efectiva, la evapotranspiración potencial y del almacenamiento de agua del mes anterior. Cuando la precipitación efectiva y el almacenamiento del mes anterior, es igual o mayor que la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real es igual a la evapotranspiración potencial (Torrico, 2011). El cálculo se realizó con la ecuación 8.

Ecuación 8. Evapotranspiración real

$$ETa = P(ef) + S(a)_{mes-1}$$

➤ Excedente de agua

Cuando la precipitación efectiva es mayor que la evapotranspiración potencial, la cantidad de humedad retenida aumentará. Se retendrá agua hasta la cantidad máxima de la capacidad potencial de almacenamiento. Si más agua penetra en el suelo, se percolará como excedente (Torrico, 2011). Este cálculo se realizó con la ecuación 9.

Ecuación 9. Excedente de agua

$$\text{Excedente de agua} = P(ef) - ETa + S(a)_{mes-1}$$

3.3 Validación del modelo hidrológico

El modelo hidrológico se validó con datos obtenidos en campo mediante salidas de campo realizadas en los meses de marzo, abril y septiembre a la cuenca alta del río Tahuando, las pruebas realizadas fueron la cobertura y uso de suelo, infiltración del suelo, textura del suelo, pendiente del suelo y el aforo de caudales con molinete electrónico. Además se usó la fórmula de correlación y regresión lineal en una hoja de Excel para obtener el R^2 , considerando que el valor debe acercarse a la unidad para mostrar mayor efectividad. Este proceso sirvió para verificar si los resultados obtenidos en el modelo son confiables.

3.3.1 Aforo de caudal con molinete electrónico

Se realizó la medición de aforos de caudales con molinete electrónico Rickly Hydrological durante la época seca y la época lluviosa en cuatro puntos estratégicos del área con el fin de validar los datos simulados en el modelo hidrológico obtenido en laboratorio.

Los puntos donde se realizó los aforos de caudales se observan en el cuadro 3.13 donde se detalla el lugar, las coordenadas y la altitud.

Cuadro 3. 13 Puntos estratégicos para la medición de caudal con molinete electrónico

LUGAR	COORDENADA		ALTITUD (msnm)
	X	Y	
Antes de la captación de la acequia Rosas Pamba	823859	10028400	2488
Después de captación de la acequia Rosas Pamba	823842	10028467	2488
Puente de Angochagua	824990	10025821	2763
Puente de Zuleta	823630	10022067	2823

Elaboración: Autora

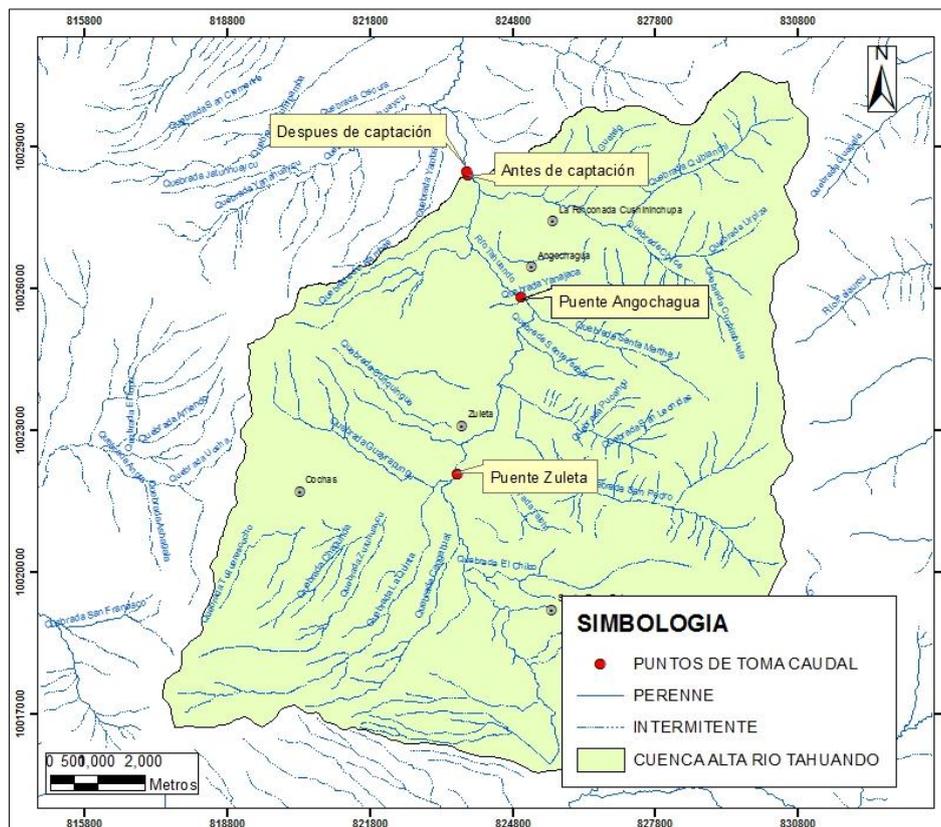


Figura 3. 7 Puntos de toma de caudal con molinete electrónico en la cuenca alta del río Tahuando

Elaboración: Autora

La medición de caudales se realizó con el siguiente proceso:

1. Selección del sitio de aforo.
2. Toma de coordenadas del sitio de aforo.
3. Medición del área transversal o área mojada del río.
4. Medición de la profundidad del río cada 1,00 m.
5. Selección de la altura de la hélice de acuerdo a la profundidad del río, seleccionando como altura mínima 10 cm.
6. Registro de número de revoluciones y tiempo que marque el molinete electrónico.
7. Calculo de caudal.

Las figuras 3.8 y 3.9 muestran a la autora en el proceso de aforo de caudales.



Figura 3. 8 Aforo de caudal en época lluviosa en el puente de Angochagua

Elaboración: Autora



Figura 3. 9 Aforo de caudal en época seca en el puente de Angochagua

Elaboración: La Autora

3.4 Propuesta de estrategias de manejo

La propuesta de estrategias de manejo se realizó en base a la información obtenida en la investigación. Para esto se usó la metodología de la “Guía para la elaboración de planes de manejo de microcuencas” (UICN, 2009). El proceso consistió en hacer un análisis de los datos generales de la propuesta, la delimitación y definición el área de estudio y el diagnóstico y problemática de la cuenca, identificando y describiendo cada uno de ellos.

Se aplicó la matriz FODA para identificar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas con fin de encontrar los elementos más relevantes para plantear la propuesta de estrategias de manejo de la cuenca alta el río Tahuando. Una vez obtenida la información se comparó las fortalezas con las oportunidades y las debilidades con las amenazas, determinado así las propuestas de estrategias de manejo de la cuenca.

CAPITULO IV

1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y la discusión se realizaron considerando la revisión de literatura, además se tomó en cuenta la información levantada en campo y realizada en laboratorio.

4.1 Resultados

Los resultados se realizaron considerando las necesidades que se tuvieron para la investigación, se encontrará la caracterización biofísica del área de estudio, además de los resultados del objetivo general y los objetivos específicos.

4.1.1 Caracterización Biofísica del Área de Estudio

En la caracterización biofísica del área de estudio se encuentra la delimitación y definición del área de estudio, los factores bióticos y factores abióticos levantados en campo y realizados en el Laboratorio de Geomántica.

4.1.1.1 Delimitación y definición del área de estudio

La cuenca alta del río Tahuando políticamente se encuentra en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, parroquia Angochagua, (Figura 4.1). La microcuenca tiene una superficie de 13,508 ha, altitudinalmente se encuentra en el rango de 2640 – 3920 msnm. (Cartas topográficas de Ibarra, 1985; San Pablo del Lago, 1985).

Las coordenadas UTM de los puntos extremos se pueden apreciar en el cuadro 4.1.

Cuadro 4. 1 Coordenadas de los puntos de la microcuenca alta del río Tahuando, Datum WGS 84, Zona 17 Sur.

PUNTO	COORDENADA X	COORDENADA Y	ALTITUD msnm
P1 (Norte)	823802	10028281	2640
P2 (Sur)	825411	10015632	3120
P3 (Este)	817670	10016792	3920
P4 (Oeste)	830994	10029521	3800

Fuente: Mapa Base, 2014

Elaboración: Autora

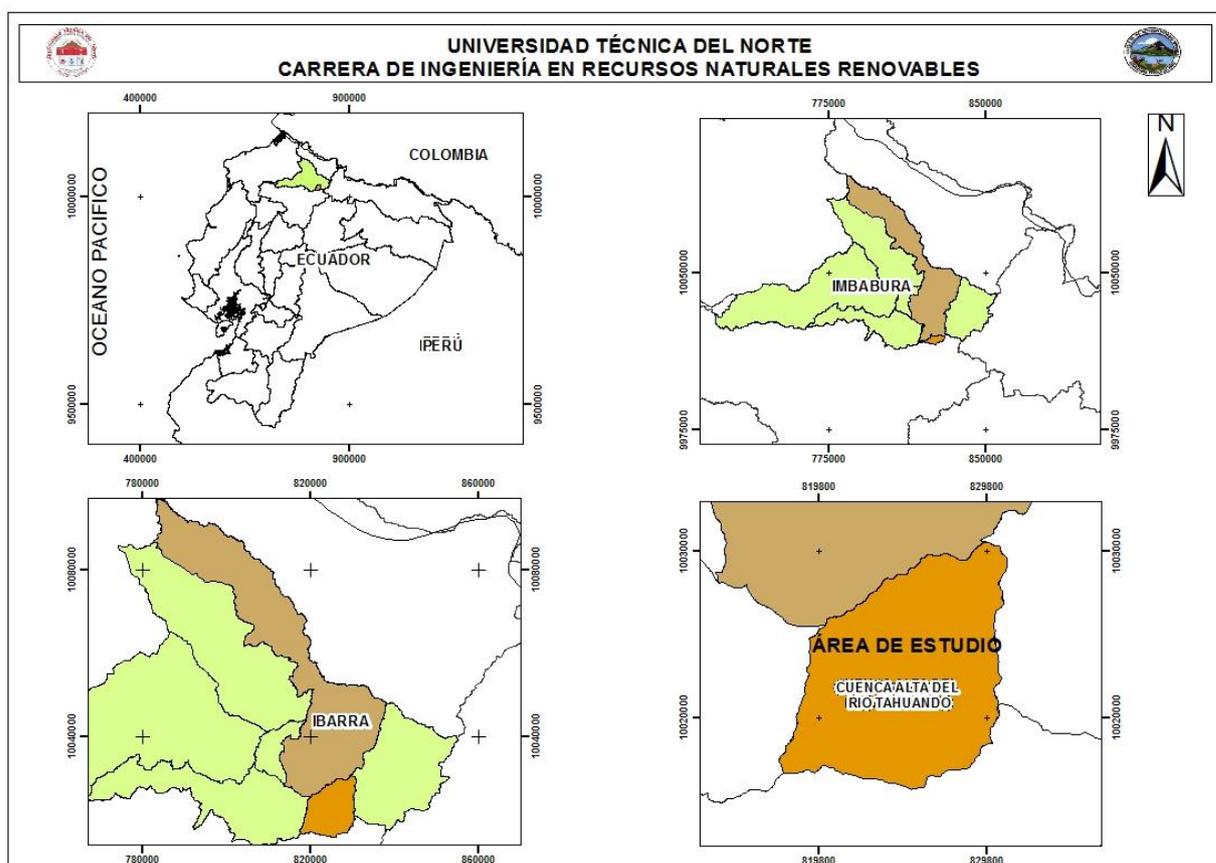


Figura 4. 1 Ubicación de la cuenca alta del río Tahuando

Elaboración: Autora

4.1.1.2 Caracterización de factores bióticos

Dentro de la caracterización de factores bióticos está la cobertura vegetal, uso del suelo, zonas de vida, la flora y fauna encontrados en la cuenca alta del río Tahuando.

➤ Cobertura vegetal

Según los datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca (MAGAP, 2013), hay una dominancia con un 47% de área intervenida distribuida por toda la cuenca alta del río Tahuando, teniendo una dominancia en los poblados de Zuleta, Cochas y Santa Rosa Baja, seguido por un 30% de cobertura de páramo que se encuentra en la parte alta de los poblados de La Rinconada, Angochagua y Zuleta mayoritariamente, aunque también se puede encontrar en un porcentaje menor en Cochas, con un 18% está la cobertura de vegetación arbustiva y herbácea que se encuentran principalmente alrededor del río Tahuando y de sus afluentes, además se encontró un 3% de área erosionada en la parte baja y un 2% de cobertura con el 70% de vegetación arbustiva y un 30% de páramo en la parte alta de la cuenca, siendo estas dos últimas las que menor dominancia tiene en el área de estudio (Anexo 1, Mapa 3).

En el cuadro 4.2 se detalla cada una de las coberturas vegetales presentes en la cuenca alta del río Tahuando con el área en hectáreas y el porcentaje.

Cuadro 4. 2 Cobertura vegetal de la cuenca alta del río Tahuando

Cobertura Vegetal			
Simbología	Descripción	Área (ha)	Porcentaje
AI	Área intervenida	6291,33	47%
Va/Pr	70 % vegetación arbustiva/ 30 % paramo	214,17	2%
Ae	Área erosionada	478,42	3%
Pr	Páramo	4078,65	30%
Va	Vegetación arbustiva y herbácea	2445,49	18%
TOTAL		13508,00	100%

Fuente: Mapa de cobertura vegetal, (MAGAP, 2003)

Elaboración: Autora

➤ Uso del suelo

El uso del suelo en la cuenca alta del río Tahuando mayoritariamente con un 49,88% es el uso para conservación y protección, este se encuentra principalmente en la parte alta de cuenca siendo su uso principalmente por vegetación de páramo, seguido por un 22,78% está el suelo de uso agrícola, donde los cultivos de ciclo corto como: frejol, maíz, habas y algunos cereales (trigo y cebada) son los de dominancia, este uso se da principalmente en los poblados de Zuleta y Cochas. Mientras que en el poblado de Cochas se puede encontrar con un 12,38% el suelo de uso agropecuario mixto, en este suelo se dan actividades mixtas de cultivos de ciclo corto en su mayoría con una mezcla de pasto natural.

También se encontró zonas donde hay cultivo de pasto en un 8,89%, siendo este suelo de uso pecuario, esta actividad se desarrolla principalmente en los poblados de Angochagua, Zuleta y Cochas. Con un 3,54% está el uso de suelo por tierras improductivas por el alto grado de erosión que presenta, en un porcentaje menor de apenas un 1,89% está el uso de suelo agrícola, conservación y protección, donde se desarrollan actividades de cultivo de pasto en vegetaciones arbustivas. En menor porcentaje está el uso de suelo antrópico, que es donde está ubicada el área urbana de la cuenca (Anexo 1, Mapa 4).

En el cuadro 4.3 se detalla cada uno de los usos del suelo de la cuenca alta del río Tahuando.

Cuadro 4. 3 Uso del suelo de la cuenca alta del río Tahuando

Uso del suelo			
Simbología	Descripción	Área (ha)	Porcentaje
Pr	Conservación y protección	6738,31	49,88%
Cc	Agrícola	3076,99	22,78%
Cc-Pc	Agropecuario mixto	1671,75	12,38%
Pc	Pecuario	1200,91	8,89%
Ae	Tierras improductivas	478,42	3,54%
Pc-Va	Agrícola - conservación y protección	252,61	1,87%
U	Antrópico	89,07	0,66%
TOTAL		13508,00	100%

Fuente: Mapa de uso del suelo, (MAGAP, 2003)

Elaboración: Autora

➤ **Zonas de vida**

El área de estudio comprende ocho zonas de vida, el 32,82% pertenece a la zona de vida bosque muy húmedo Montano (bmhM) presente en la parte alta de los poblados Angochagua, Zuleta y Cochas, siendo además el que domina el área de estudio, seguido de la zona de vida del bosque húmedo Montano con un 23,52% (bhM), este se encuentra en la parte baja de Cochas y Santa Rosa Baja. El bosque húmedo Montano - bosque Muy Húmedo (bhM-bsMB) con un 18,26%, que está distribuido por toda la cuenca especialmente en la parte baja de Zuleta, Cochas y Angochagua.

En los poblados de La Rinconada, Zuleta y Angochagua se encuentra la zona de vida bosque húmedo Montano Bajo (bhMB), con un 12,66%, el bosque húmedo Montano Bajo - bosque muy húmedo Montano (bhMB-bmhM), con un 11,12% se encuentra en los poblados de Zuleta y Angochagua, el bosque seco Montano Bajo - bosque húmedo Montano - Asociación Edáfica Seca (bsMB-bhM-AES), están en La Rinconada con un 0,55% y el bosque húmedo Montano Bajo - Asociación Edáfica Húmeda (bhMB-AEH), con un 0.51%, en Cochas, cerca de las quebradas Changunda y Zuruhuayou, siendo las dos zonas de vida últimas las de menor dominancia en el área de estudio (Anexo 1, Mapa 5).

En el cuadro 4.4 se detalla cada uno de los usos del suelo presentes en la cuenca alta del río Tahuando.

Cuadro 4. 4 Zonas de vida de la cuenca alta del río Tahuando

Zonas de vida			
Código	Descripción	Área (ha)	Porcentaje
bhM-bsMB	Bosque Húmedo Montano - Bosque Muy Húmedo	2466,22	18,26%
bhMB	Bosque Húmedo Montano Bajo	1710,02	12,66%
bhMB-bmhM	Bosque Húmedo Montano Bajo - Bosque Muy Húmedo Montano	1501,06	11,11%
bsMB-bhM-AES	Bosque Seco Montano Bajo - Bosque Húmedo Montano - Asociación Edáfica Seca	75,19	0,56%
BhM	Bosque Húmedo Montano	3176,67	23,52%
bsMB	Bosque Seco Montano Bajo	77,50	0,57%
bhMB-AEH	Bosque Húmedo Montano Bajo - Asociación Edáfica Húmeda	68,36	0,51%
bmhM	Bosque Muy Húmedo Montano	4433,04	32,82%
TOTAL		13508	100%

Fuente: Mapa de Zonas de Vida, (MAGAP, 2003)

Elaboración: Autora

➤ Flora

La consultora Aguas del Ecuador (2008) menciona que el porcentaje de cultivos anuales y perennes ha incrementado debido al avance de la frontera agrícola, sobrepasado los límites del páramo. En el área de estudio se corrobora esto evidenciando la pérdida de especies florísticas en la cuenca, encontrando áreas intervenidas que fueron desplazadas por presión de actividades de agricultura y ganadería.

Se encuentran plantaciones de especies introducidas como el eucalipto (*Eucalyptus sp*), ciprés (*Cupressuss lusitánica*) y pino (*Pinus radiata*) estando distribuidas desde la parte baja hasta la parte alta de la cuenca, algunos de estos bosques están en edad adulta, mientras que otros están en desarrollo. La consultora Aguas del Ecuador (2008) menciona que en la cuenca del río Tahuando se encontró bosques productores, su mayor parte corresponden a especies introducidas como el *Eucalyptus globulus*, *Cupressus lusitanica*, *Pinus radiata*; todas plantadas con el propósito de obtener materias primas aprovechables. Cerca a los cuerpos de agua se encontró vegetación de quebrada con especies arbóreas, arbustivas y herbáceas.

Las especies más representativas del área de estudio están listados en el cuadro 4.5.

Cuadro 4. 5 Especies de flora más representativas de la cuenca alta de río Tahuando.

Nombre común	Nombre científico
eucalipto	<i>Eucalyptus sp</i>
pino	<i>Pinus lusitánica</i>
ciprés	<i>Cupressuss empervirens</i>
sauce	<i>Salix babylonica</i>
molle	<i>Schinus molle</i>
capulí	<i>Prunus salicifolia</i>
puma maqui	<i>Oreopanax cf. ecuadorensis Seem</i>
Lechero	<i>Siphocampylus giganteus</i>
palo de rosas	<i>Vallea stipularis L.f.</i>
árbol de papel o polylepis	<i>Polylepis sp.</i>
laurel	<i>Morella pubescens</i>
chilca	<i>Baccharis latifolia</i>
uña de gato	<i>Mimosa quitensis</i>
corta picos	<i>Bomarea hirsuta</i>
chin Chin Silvestre	<i>Senna multiglandulosa</i>
mora	<i>Rubus ulmifolius</i>
taxo	<i>Passiflora tarminiana</i>
tatora	<i>Schoenoplectus californicus</i>
sikse	<i>Cortaderia nitida</i>
mortiño	<i>Pernettya prostrata</i>
chocho	<i>Lupinus pubescens</i>
sunfo	<i>Clinopodium nubigenum</i>
cola de caballo	<i>Equisetum bogotense</i>
orejuelo	<i>Lachemilla orbiculata</i>
tumpusu	<i>Azorella pedunculata</i>
lengua de vaca	<i>Rumex acetosa</i>
panguil, flor de ñachak	<i>Bidens andicola</i>
pispora, achera	<i>Canna edulis</i>
cartucho blanco	<i>Zantedeschia aethiopica</i>
iso	<i>Dalea coerulea</i>
vicundo	<i>Racinaea fraseri</i>
kikuyo	<i>Pennisetum clandestinum</i>
paja	<i>Pappophorum pappiferum</i>

Elaboración: Autora

➤ Fauna

En fauna se observó algunas especies de aves, el grupo de mamíferos, anfibios y reptiles se consultó mediante encuesta a los moradores. Las especies faunísticas encontradas se detallan en el cuadro 4.6.

Cuadro 4. 6 Especies de fauna más representativas de la cuenca alta de río Tahuando.

Nombre común	Nombre Científico
mirlo	<i>Turdus serranus</i>
pájaro brujo	<i>Pyrocephalus rubinus</i>
gorrión	<i>Zonotrichia capensis</i>
huiracchuro	<i>Pheucticus chrysogaster</i>
lechuza	<i>Tyto alba</i>
torcaza	<i>Zenaida auriculata</i>
kilico	<i>Falco sparverius</i>
gavilán	<i>Parabuteo unicinctus</i>
tórtola común	<i>Columbina passerina</i>
pájaro carpintero	<i>Colaptes melanochloros</i>
zambullidor piquipinto	<i>Podilymbus podiceps</i>
pato de ala azul	<i>Anas discors</i>
garza bueyera	<i>Bubulcus ibis</i>
zorriño	<i>Conepatus semistriatus</i>
lobo	<i>Lycalopex culpaeus</i>
conejo silvestre	<i>Sylvilagus brasiliensis</i>

Elaboración: Autora

4.1.1.3 Caracterización de factores abióticos

➤ Tipos de suelo

De acuerdo al mapa realizado en el Laboratorio de Geomática, se encontraron tres tipos de suelos clasificados por el orden, así se obtuvo que el suelo ENTISOL es el que domina en el área de estudio con un 78%, encontrándose en su mayoría en los poblados de Zuleta y Cochás, aunque se lo encuentra también en zonas de La Rinconada, Angochagua, Santa

Rosa Baja, San Miguel de pesillo y San Pablo Urcu Grande, con un 19% se encuentra el suelo INCEPTISOL, localizado en una parte pequeña de Cochas, Angochagua, La Rinconada y Santa Rosa Baja, finalmente el suelo MOLLISOL con un 3% es el que está en menor cantidad encontrándose en la zona de Cochas (Anexo 1, Mapa 6).

En el cuadro 4.7 se detalla cada uno de los tipos de suelo presentes en la cuenca alta del río Tahuando.

Cuadro 4. 7 Tipos de suelo de la cuenca alta del río Tahuando

Tipos de suelo		
Descripción	Área (ha)	Porcentaje
Entisol	442,232	78%
Inceptisol	2559,03	19%
Mollisol	10506,78	3%
TOTAL	13508,00	100%

Fuente: Mapa de tipos de suelo, (MAGAP, 2003)

Elaboración: Autora

➤ **Clima**

La cuenca alta del río Tahuando a pesar de ser un área pequeña tiene dos tipos de climas, el ecuatorial mesodérmico semi-húmedo y el ecuatorial de alta montaña, siendo el último el que más dominancia tiene en el área de estudio (Anexo 1, Mapa 7).

En el cuadro 4.8 se detalla cada uno de los tipos de clima presentes en la cuenca alta del río Tahuando.

Cuadro 4. 8 Tipos de clima de la cuenca alta del río Tahuando

Tipos de clima			
Símbolo	Descripción	Área (ha)	Porcentaje
Ch	Ecuatorial mesotermico semi-húmedo	4574,84	34%
Pf	Ecuatorial de alta montana	8933,21	66%
TOTAL		13508,00	100%

Fuente: Mapa de tipos de clima, (MAGAP, 2003)

Elaboración: Autora

➤ Hidrología

La cuenca alta del río Tahuando esta subdividida por las subcuencas de las Quebradas de: La Rinconada, Santa Marta, San Pedro, Canguhual, Alambas y La Quinta, todas estas de tipo intermitente, siendo el río Tahuando el único que es de tipo perenne (Anexo 1, Mapa 8).

En el cuadro 4.9 se detalla cada uno la división de las subcuencas presentes en la cuenca alta del río Tahuando.

Cuadro 4. 9 Subcuencas de la cuenca alta del río Tahuando

Subcuencas del río Tahuando			
Nombre	Tipo	Área (ha)	Porcentaje
Sin Nombre		5376,75	39,80%
Quebrada La Rinconada	Intermitente	2443,63	18,09%
Quebrada Santa Marta	Intermitente	535,75	3,97%
Quebrada San Pedro	Intermitente	1816,92	13,45%
Quebrada Cangahual	Intermitente	293,02	2,17%
Quebrada Alambas	Intermitente	169,45	1,25%
Quebrada La Quinta	Intermitente	2872,53	21,27%
TOTAL		13508,00	100%

Fuente: Mapa Hidrológico, (IGM, 2013)

Elaboración: Autora

4.1.2 Identificación de Áreas de Recarga Hídrica

Se identificaron las áreas de recarga hídrica en la cuenca alta del río Tahuando, obteniendo como resultado un 42,73% de recargas moderadas dominando estas el área de estudio, mientras que, apenas un 3,46% de la zona presenta áreas con recarga muy alta y muy baja siendo estas las que menor dominancia tienen. (Anexo 1, Mapa 10)

En el cuadro 4.10 se detalla cada una las áreas de recarga hídrica presentes en la cuenca alta del río Tahuando con la cantidad en hectáreas y el porcentaje.

Cuadro 4. 10 Áreas de recarga hídrica en la cuenca alta del río Tahuando

Área de recarga hídrica		
Recarga	Área (ha)	Porcentaje
Muy alta	483.25	3.46 %
Alta	2589.00	18.55%
Moderada	5964.90	42.73%
Baja	4438.65	31.80%
Muy baja	483.25	3.46%
TOTAL	13959.05	100%

Fuente: Mapa de zonas de recarga hídrica, (IGM, 2013; MAGAP, 2003)

Elaboración: Autora

En la Figura 4.2 se observa la representación en porcentaje de las áreas de recarga hídrica.

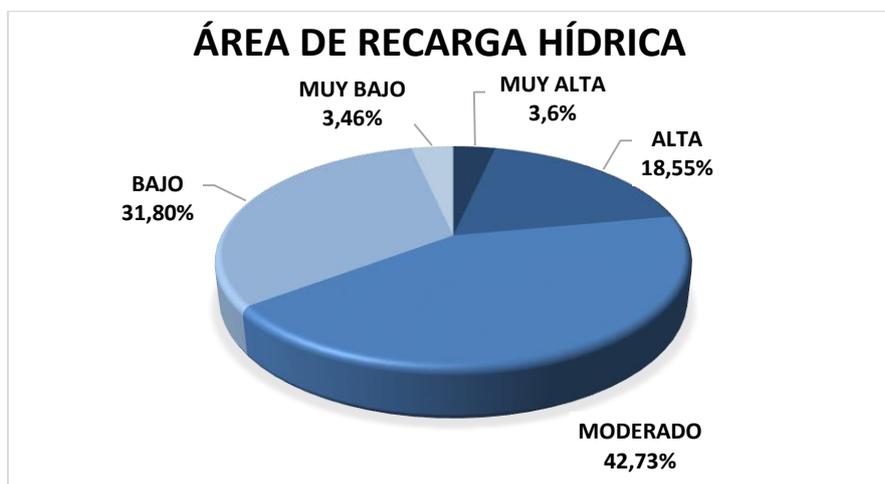


Figura 4. 2 Porcentaje de Áreas de Recarga Hídrica identificadas en la cuenca alta del río Tahuando

Elaboración: La Autora

➤ **Recarga hídrica muy alta**

Las zonas de recarga hídrica muy alta cubren un 3,46%, siendo una de las de menor dominancia en la zona de estudio, con un área de 483,25 Ha, estas se encuentran en un rango de pendiente entre 6 – 15%, en suelos de orden mollisol con textura gruesa, la geología que presentan son volcánicos de Angochagua, con vegetación de paramo, donde el uso asignado del suelo es para protección y conservación.

➤ **Recarga hídrica alta**

Las zonas de recarga hídrica alta cubren un 18,55% de la zona de estudio, con un área de 2589,00 Ha, estas se encuentran en un rango de pendiente entre 6 – 15%, en su mayoría en suelos de orden inceptisol, aunque en una mínima cantidad están en suelos de orden mollisol, con textura gruesa a moderadamente gruesa, la geología que presentan son volcánicos de Angochagua en su mayoría, aunque también están en los volcánicos de Imbabura y en menor cantidad en los volcánicos de Cayambe, con vegetación arbustiva y herbácea, pasto cultivado y cultivos de ciclo corto, donde el uso de suelo asignado es pecuario, agrícola - protección y conservación en una mínima cantidad, agrícola - protección y conservación, pecuario y agrícola mixto en su mayoría.

➤ **Recarga hídrica moderada**

Las zonas de recarga hídrica moderada cubren un 42,73%, siendo estas de mayor dominancia en la zona de estudio con un área de 5964,90 Ha, estas se encuentran en un rango de pendiente entre 6 – 15%, en su mayoría en suelos de orden inceptisol, aunque en una mínima cantidad están los suelos de orden mollisol, con textura gruesa y media, la geología que presentan son de depósito coluviales, se encuentran en zonas con cultivos de ciclo corto, cultivos de ciclo corto en áreas erosionadas, pasto cultivado, siendo su uso agrícola y agropecuario mixto.



Figura 4. 3 Área de recarga hídrica moderada en Zuleta

Elaboración: Autora

➤ **Recarga hídrica baja**

Las zonas de recarga hídrica baja cubren un 31,80% de la zona de estudio con un área de 4438,65 Ha, estas se encuentran en un rango de pendiente entre 6 – 15%, en su mayoría en suelos de orden mollisol, aunque en una mínima cantidad están en suelos de orden entisol, con textura media, la geología que presentan son depósito fluvio glacial y derrubios, con vegetación arbustiva y herbácea.



Figura 4. 4 Área de recarga hídrica baja en Cochas

Elaboración: Autora



Figura 4. 5 Área de recarga hídrica baja en Angochagua

Elaboración: Autora

➤ **Recarga hídrica muy baja**

Las zonas de recarga hídrica muy baja cubren un 3,46% de la zona de estudio con un área de 483,25 Ha, estas se encuentran en un rango de pendiente entre 6 – 15%, en su mayoría en suelos de orden mollisol, la geología que presentan son Volcánicos del Imbabura, Volcánicos de Angochagua, Volcánicos del Cayambe y cangahua, se encuentran en suelos erosionados y tierras improductivas.



Figura 4. 6 Área de recarga hídrica muy baja en Angochagua (Bosque de eucalipto)

Elaboración: Autora

Matus, Faustino y Jiménez (2009) en el estudio “Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua”, obtuvieron como resultado áreas de recarga hídrica con posibilidad moderada (54,9%), seguido por una alta posibilidad de ocurrencia (21,0%), baja posibilidad (16,7%), muy alta posibilidad (1,6%) y muy baja posibilidad (1,2%); clasificando a la cuenca como buena para la ocurrencia de recarga hídrica o la infiltración del agua en el suelo, ya que el 80.4% se ubica en las categorías de moderada y alta.

En la cuenca alta del río Tahuando se obtuvo una posibilidad de recarga moderada con 42,73% del total de la superficie, seguida por la recarga baja con 31,80%, recarga alta con 18,55%, mientras que las áreas de menor porcentaje son: recarga muy alta y muy baja con 3,46%; por estas razones se clasificó a la cuenca con categoría “Buena”, ya que tiene 64,45% de posibilidad de recargas moderadas, altas y muy altas. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Matus, Faustino y Jiménez (2009) desde el punto de vista de probabilidad de recarga hídrica en el área de estudio, ya que la cuenca del río Jucuapa presenta similitudes en características hidrológicas, pluviométricas y geomorfológicas comparada con la cuenca alta del río Tahuando.

Chamorro (2016) menciona que en la cuenca del río Tahuando se identificó que las zonas con recarga Alta se localizan en la parte alta de la cuenca, y las zonas con recarga Moderada se distribuyen en casi la totalidad de la cuenca media y baja. En el presente estudio realizado en la cuenca alta se encontró un 64,45% de probabilidad de recargas

hídricas moderadas, altas y muy altas, por lo que se considera a esta cuenca importante como proveedora de agua, corroborando lo mencionado por la mencionada autora.

4.2 Modelo hidrológico de la cuenca alta con fines de simulación de escorrentía superficial

En el modelo hidrológico se realizó usando la ecuación 2 de balance hídrico, se consideró cinco componentes de este. A continuación se detalla los resultados de la precipitación, precipitación efectiva, capacidad potencial de retención de agua, evapotranspiración actual, evapotranspiración potencial y la retención real de humedad del suelo.

4.2.1 Precipitación

Los datos de precipitación se obtuvieron por el método de interpolación Kriging en formato raster con una resolución espacial de 20 m² de pixel. En el cuadro 4.11 se detalla la precipitación interpolada desde el año 2009 al 2013.

Cuadro 4. 11 Precipitación interpolada del año 2009 al 2013

Precipitación (mm)					
Mes	Año				
	2009	2010	2011	2012	2013
enero	136,60	9,51	112,54	165,74	30,14
febrero	119,17	35,34	182,08	172,38	137,52
marzo	147,21	84,37	87,78	78,49	52,87
abril	97,00	148,80	269,05	171,71	88,12
mayo	37,86	134,81	89,97	30,81	159,76
junio	43,03	57,22	63,34	13,86	8,83
julio	14,40	80,23	79,15	11,22	28,03
agosto	13,48	50,71	64,15	13,24	27,99
septiembre	10,89	79,04	65,60	22,91	27,24
octubre	48,71	107,42	88,32	82,18	116,41
noviembre	82,97	220,50	82,71	92,22	104,05
diciembre	128,40	182,02	178,80	50,71	104,05
Σ anual	879,72	1189,97	1363,49	905,47	885,01

Elaboración: Autora

2.2.2 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se calculó en el software libre “Programa Evapotranspiración Potencial PETP V2.0.0” mediante el método de Penman Monteith, después se interpoló en el software ArcGIS 10.2. En el cuadro 4.12 se detalla los datos calculados de la evapotranspiración potencial.

Cuadro 4. 12 Evapotranspiración potencial interpolada desde el año 2009 al 2013

Evapotranspiración potencial (mm)					
Mes	Año				
	2009	2010	2011	2012	2013
enero	66,92	83,07	81,58	68,20	81,96
febrero	69,23	66,37	65,01	59,27	64,58
marzo	81,22	74,83	74,77	74,07	80,31
abril	74,95	66,54	65,82	65,70	70,63
mayo	75,84	74,75	73,76	65,98	67,87
junio	68,54	62,47	62,58	68,32	72,87
julio	68,54	70,61	67,86	75,72	75,21
agosto	68,54	75,72	77,69	77,78	80,00
septiembre	83,87	77,44	71,78	83,20	76,52
octubre	80,75	81,47	76,71	80,79	83,78
noviembre	81,88	69,32	82,02	79,64	78,57
diciembre	82,66	69,79	73,71	78,52	82,19
Σ anual	902,94	872,38	873,29	877,19	914,49

Elaboración: Autora

4.2.1 Escurrimiento superficial

Los datos del escurrimiento superficial se obtuvieron en base a la superficie de la cuenca con los datos medios calculados en el software ArcGis10.2. En los cuadros 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 se puede apreciar la esorrentía final expresada en l/s.

Cuadro 4. 13 Datos de escorrentía del año 2009

Mes	Caudal mm (escurrimiento calculado)	Superficie (m ²)	Caudal l/s (escurrimiento final)
Enero	60,86	135080468.3	3069,30
Febrero	53,10	135080468.3	2964,83
Marzo	65,71	135080468.3	3314,09
Abril	43,23	135080468.3	2253,00
Mayo	16,89	135080468.3	851,69
Junio	19,16	135080468.3	998,58
Julio	6,38	135080468.3	321,82
Agosto	5,99	135080468.3	302,17
Septiembre	4,84	135080468.3	252,21
Octubre	21,71	135080468.3	1094,82
Noviembre	36,96	135080468.3	1926,15
Diciembre	57,19	135080468.3	2884,48
̄ anual	32,67	-----	1686,10

Cuadro 4. 14 Datos de escorrentía del año 2010

Mes	Caudal mm (escurrimiento calculado)	Superficie (m ²)	Caudal l/s (escurrimiento final)
Enero	4,25	135080468.3	214,37
Febrero	15,72	135080468.3	847,58
Marzo	37,62	135080468.3	1897,55
Abril	66,36	135080468.3	3458,09
Mayo	60,04	135080468.3	3028,00
Junio	25,51	135080468.3	1329,19
Julio	35,79	135080468.3	1804,96
Agosto	22,59	135080468.3	1139,14
Septiembre	35,20	135080468.3	1834,26
Octubre	47,81	135080468.3	2411,06
Noviembre	98,14	135080468.3	5114,70
Diciembre	81,06	135080468.3	4088,22
̄ anual	44,17	-----	2263,93

Elaboración: Autora

Cuadro 4. 15 Datos de escorrentía del año 2011

Mes	Caudal mm (escurrimiento calculado)	Superficie (m ²)	Caudal l/s (escurrimiento final)
Enero	50,11	135080468.3	2527,29
Febrero	81,14	135080468.3	4530,65
Marzo	39,06	135080468.3	1970,04
Abril	119,91	135080468.3	6248,95
Mayo	40,00	135080468.3	2017,53
Junio	28,20	135080468.3	1469,65
Julio	35,24	135080468.3	1777,37
Agosto	28,56	135080468.3	1440,51
Septiembre	29,23	135080468.3	1523,43
Octubre	39,36	135080468.3	1984,99
Noviembre	36,71	135080468.3	1912,92
Diciembre	79,61	135080468.3	4014,89
̄ anual	50,59	-----	2618,19

Elaboración: Autora

Cuadro 4. 16 Datos de escorrentía del año 2012

Mes	Caudal mm (escurrimiento calculado)	Superficie (m ²)	Caudal l/s (escurrimiento final)
Enero	73,86	135080468.3	3725,42
Febrero	76,82	135080468.3	4141,67
Marzo	35,02	135080468.3	1766,50
Abril	76,56	135080468.3	3990,08
Mayo	13,72	135080468.3	692,40
Junio	6,14	135080468.3	320,28
Julio	4,97	135080468.3	251,01
Agosto	5,87	135080468.3	296,09
Septiembre	10,20	135080468.3	531,55
Octubre	36,63	135080468.3	1847,56
Noviembre	41,09	135080468.3	2141,80
Diciembre	22,55	135080468.3	1137,35
̄ anual	33,62	-----	1736,81

Elaboración: Autora

Cuadro 4. 17 Datos de escorrentía del año 2013

Mes	Caudal mm (escurrimiento calculado)	Superficie (m ²)	Caudal l/s (escurrimiento final)
Enero	13,42	135080468.3	676,81
Febrero	61,26	135080468.3	3420,56
Marzo	23,56	135080468.3	1188,21
Abril	39,23	135080468.3	2044,45
Mayo	71,20	135080468.3	3590,85
Junio	3,91	135080468.3	203,77
Julio	12,39	135080468.3	624,87
Agosto	12,46	135080468.3	628,40
Septiembre	12,14	135080468.3	632,67
Octubre	51,91	135080468.3	2617,99
Noviembre	46,23	135080468.3	2409,69
Diciembre	46,23	135080468.3	2331,96
Año	32,83	-----	1697,52

Elaboración: Autora

4.2.3 Precipitación efectiva

La precipitación efectiva se calculó restando de cada capa mensual de precipitación interpolada la capa del escurrimiento (ecuación 4), obteniendo así 12 nuevos mapas de precipitación por año. En el cuadro 4.18 se puede apreciar la precipitación efectiva promedio resultante.

Ecuación 4. Precipitación efectiva

$$\text{Precipitación efectiva} = \text{precipitación} - \text{escurrimiento.}$$

Cuadro 4. 18 Precipitación efectiva calculada

Precipitación efectiva (mm)					
Mes	Año				
	2009	2010	2011	2012	2013
enero	75,74	5,26	62,43	91,87	16,72
febrero	66,07	19,62	100,94	95,55	76,25
marzo	81,50	46,74	48,72	43,46	29,31
abril	53,76	82,44	149,14	95,14	48,88
mayo	20,97	74,77	49,97	17,08	88,55
junio	23,86	31,72	35,14	7,72	4,91
julio	8,02	44,44	43,90	6,24	15,63
agosto	7,49	28,12	35,58	7,37	15,52
septiembre	6,05	43,84	36,37	12,71	15,09
octubre	11,75	59,61	48,96	45,55	64,50
noviembre	46,00	122,35	46,01	51,12	57,81
diciembre	71,20	100,95	99,19	28,16	57,81
Σ anual	472,41	659,86	756,35	501,97	490,98

Elaboración: Autora

4.2.4 Retención real de humedad en el suelo

La retención real de humedad en el suelo se calculó con los datos de precipitación efectiva, la capacidad potencial de retención y la evapotranspiración potencial calculados (ecuación 6), se determinó además la capacidad potencial de retención para la aplicación de la ecuación 6 y balance hídrico mensual para saber el mes inicial del cálculo.

Ecuación 6. Calculo de la retención real de humedad del suelo:

$$S(a) = P(ef) + S(a)_{mes-1} - ETa$$

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

Donde:

S(a) = almacenamiento real

P(ef) = precipitación efectiva

S(a)mes-1 = almacenamiento real del mes anterior

ETp = Evapotranspiración potencial

S(p) = almacenamiento potencial

➤ Capacidad potencial de retención de agua

La cantidad potencial de retención de agua se calculó con la reclasificación de las capas de pedregosidad, textura y profundidad del suelo, se obtuvo un raster con una resolución espacial de 20m², en un rango de 11 a 150 mm, siendo su cálculo promedio de 77,45 mm de retención potencial de agua en el suelo. En la figura 4.7 se observa la capa raster del cálculo realizado.

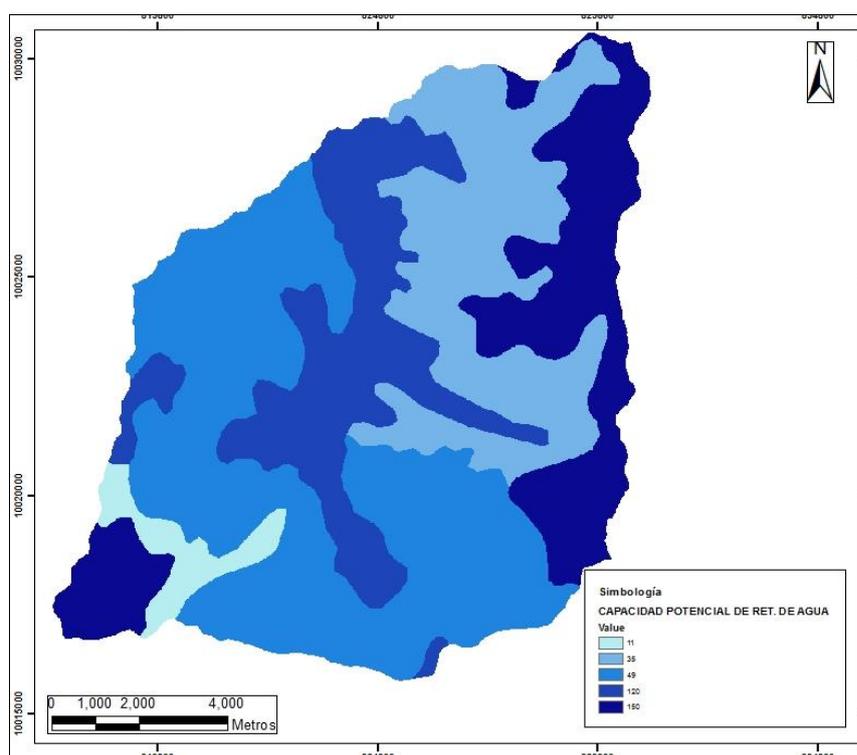


Figura 4. 7 Capa raster de cantidad potencial de retención de agua

Elaboración: Autora

➤ Determinación del balance hídrico mensual

Se determinó el balance hídrico mensual con el fin de tener el inicio del cálculo de la retención de humedad en el suelo, considerando al mes de noviembre de 2009 como óptimo para el inicio del cálculo, ya que en ese mes el almacenamiento de agua en el suelo es cero, asumiendo que en el mes de diciembre se tendrá el resultado real del almacenamiento de agua. Este resultado se obtuvo con la ecuación 7.

En el cuadro 4.19 se observa los cálculos realizados para la determinación del balance hídrico mensual.

Ecuación 7. Cálculo de balance hídrico mensual

$$P - ETp + S(a) = S(t)$$

Donde:

P= precipitación

ETp: evapotranspiración

I: infiltración

Δs: variación de almacenaje

S(a): almacenaje real

S(t): almacenaje total

Se usó como hipótesis que el almacenaje total de agua podría ser 100 y el almacenaje real 0.

Cuadro 4. 19 Balance hídrico mensual 2009

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Precipitación	136,60	119,16	147,21	96,99	37,85	43,0	43,02	13,48	10,89	48,71	82,96	128,39	908,34
ETp	66,92	69,23	81,21	74,94	75,84	68,53	72,71	76,94	83,86	80,74	81,88	82,65	915,52
P - ETp	69,68	49,93	65,99	22,04	-37,98	-25,51	-29,69	-63,46	-72,97	-32,03	1,08	45,74	254,48
0	69,68	100,000	100,000	100,000	62,01	36,50	6,81	0,000	0,000	0,000	1,08	46,82	-----
100	100,000	100,000	100,000	100,000	62,01	36,50	6,81	0,000	0,000	0,000	1,08	46,82	-----

Elaboración: Autora

En el cuadro 4.20 se detalla la retención real de humedad del suelo del año 2009 al año 2013.

Cuadro 4. 20 Retención Real de humedad en el suelo.

Retención real de humedad en el suelo (mm)					
Mes	Año				
	2009	2010	2011	2012	2013
enero	-----	49,88	270,71	557,73	532,75
febrero	-----	35,31	328,89	616,39	569,91
marzo	-----	43,02	336,63	618,91	557,19
abril	-----	84,31	437,04	671,14	566,31
mayo	-----	114,11	446,42	654,05	612,24
junio	-----	111,82	447,44	627,49	580,94
julio	-----	117,16	453,49	596,03	558,71
agosto	-----	105,69	447,18	564,62	533,25
septiembre	-----	107,14	444,24	535,35	509,08
octubre	-----	121,11	452,67	565,98	525,78
noviembre	77,46	198,02	454,43	572,90	539,81
diciembre	86,25	254,68	509,05	559,39	538,47
̄X anual	81,86	111,85	419,01	595,00	552,03

Elaboración: Autora

4.2.5 Evapotranspiración efectiva

La evapotranspiración efectiva se calculó con la ecuación 8. En caso de que exista suficiente agua para evaporar (o en situaciones de exceso) la evapotranspiración potencial es igual a la evapotranspiración real ($ET_p = ET_a$) (Torrice, 2011).

Ecuación 8. Evapotranspiración efectiva

$$ET_a = P(e_f) + S(a)_{mes-1}$$

Los resultados obtenidos con la sumatoria de la precipitación efectiva y el mes del almacenamiento anterior son mayores que la evapotranspiración potencial (cuadro 4.13), al ser mayor se cumple con lo planteado por Torrice (2011) donde la evapotranspiración potencial es igual a la evapotranspiración efectiva.

En el cuadro 4.21 se detalla la evapotranspiración efectiva calculada desde el año 2009 al 2013.

Cuadro 4. 21 Evapotranspiración efectiva calculada del año 2009 al 2013

Evapotranspiración efectiva (mm)					
MES	2009	2010	2011	2012	2013
Enero	-----	91,52	317,11	600,91	576,11
febrero	-----	69,49	371,65	653,28	609,00
marzo	-----	82,04	377,61	659,85	599,21
abril	-----	125,46	485,77	714,05	606,07
mayo	-----	159,07	487,01	688,21	654,86
junio	-----	145,82	481,56	661,76	617,15
julio	-----	156,26	491,34	633,73	596,57
agosto	-----	145,28	489,07	603,40	574,23
septiembre	-----	149,53	483,55	577,33	548,34
octubre	-----	166,75	493,19	580,90	573,57
noviembre	-----	243,46	498,68	617,09	583,59
diciembre	148,66	298,97	553,62	601,06	597,62
Σ anual	148,66	152,80	460,85	632,63	594,28

Elaboración: Autora

En el cuadro 4.22 se detalla la comparación de la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración efectiva.

Cuadro 4. 22 Comparación de la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración efectiva (mm)

	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Σ anual
ETp	2009	66,92	69,23	81,22	74,95	75,84	68,54	68,54	68,54	83,87	80,75	81,88	82,66	902,94
Eta		----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	148,66	148,66
ETp	2010	83,07	66,37	74,83	66,54	74,75	62,47	70,61	75,72	77,44	81,47	69,32	69,79	872,38
Eta		91,52	69,49	82,04	125,46	159,07	145,82	156,26	145,28	149,53	166,75	243,46	298,97	1833,65
ETp	2011	81,58	65,01	74,77	65,82	73,76	62,58	67,86	77,69	71,78	76,71	82,02	73,71	873,29
Eta		317,11	371,65	377,61	485,77	487,01	481,56	491,34	489,07	483,55	493,19	498,68	553,62	5530,16
ETp	2012	68,20	59,27	74,07	65,70	65,98	68,32	75,72	77,78	83,20	80,79	79,64	78,52	877,19
Eta		600,91	653,28	659,85	714,05	688,21	661,76	633,73	603,40	577,33	580,90	617,09	601,06	7591,57
ETp	2013	81,96	64,58	80,31	70,63	67,87	72,87	75,21	80,00	76,52	83,78	78,57	82,19	914,49
Eta		576,11	609,00	599,21	606,07	654,86	617,15	596,57	574,23	548,34	573,57	583,59	597,62	7136,32

Elaboración: Autora

➤ **Excedente de agua**

Se calculó el excedente de agua con la precipitación efectiva y la evapotranspiración potencial (ecuación 9). Torrico (2009) menciona que cuando la precipitación efectiva es mayor que la evapotranspiración potencial, la cantidad de humedad retenida aumentará. Se retendrá agua hasta la cantidad máxima de la capacidad potencial de almacenamiento. Si más agua se infiltra en el suelo, se percolará como excedente.

Ecuación 9. Excedente de agua

$$\text{Excedente de agua} = P(\text{ef}) - ET_a + S(a)_{\text{mes}-1}$$

En el cuadro 4.23 se observa los datos del cálculo de excedente de agua desde el año 2009 al 2013.

Cuadro 4. 23 Cálculo de excedente de agua desde el año 2009 al 2013

Excedente de agua (mm)					
MES	2009	2010	2011	2012	2013
enero	-----	8,45	235,53	532,72	494,14
febrero	-----	3,13	306,64	594,02	544,42
marzo	-----	7,21	302,84	585,79	518,90
abril	-----	58,92	419,94	648,34	535,44
mayo	-----	84,33	413,25	622,23	586,99
junio	-----	83,35	418,98	593,45	544,28
julio	-----	85,65	423,48	558,01	521,36
agosto	-----	69,56	411,37	525,62	494,23
septiembre	-----	72,09	411,77	494,12	471,82
octubre	-----	85,28	416,48	500,11	489,80
noviembre	-----	174,14	416,66	537,45	505,02
diciembre	66,00	229,18	479,91	522,54	515,43
̄ anual	66,00	388,07	559,53	518,49	80,11

Elaboración: Autora

Los cálculos realizados dan como resultado que en todos los meses hay un excedente de agua, lo que quiere decir se retendrá agua hasta la cantidad máxima de la capacidad potencial de almacenamiento calculada (77.45 mm) y el agua sobrante se percolará como excedente.

4.2.6 Balance hídrico considerando diferentes variables

En el cuadro 4.24 se detalla el resumen tabulado de los cálculos realizados de manera espacializada por pixel para la cuenca alta del río Tahuando. Lo que se realizó fue un cálculo de promedios de las variables analizadas que se detallan a continuación:

P = Precipitación interpolada para la cuenca en mm por mes

Pef = Precipitación Efectiva

Escurrimiento = Escurrimiento superficial (considerando también flujo base)

S = Almacenamiento de Humedad en el Suelo

ETa = Evapotranspiración Actual

ETp = Evapotranspiración Potencial

De acuerdo a los resultados obtenidos, la evapotranspiración actual es igual a la evapotranspiración potencial manteniendo los valores de la evapotranspiración potencial. En el cuadro 4.25 se detalla el comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico para la cuenca alta del río Tahuando en el periodo 2009 al 2013.

Cuadro 4. 24 Comportamiento del balance hídrico en la cuenca alta en mm del periodo 2009 al 2013

Comportamiento de componentes del Balance Hídrico en el periodo 2009 al 2013													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Σ anual
P	90,91	129,3	90,15	154,94	90,64	37,26	42,61	33,91	41,14	88,61	116,49	128,8	1044,76
Pef	50,40	71,69	49,94	85,87	50,27	20,67	23,65	18,82	22,81	46,07	64,66	71,46	576,31
Escu.	40,50	57,61	40,20	69,06	40,37	16,58	18,96	15,09	18,32	39,48	51,83	57,33	465,33
S	352,77	387,62	388,93	439,7	456,7	441,92	431,35	412,68	398,95	416,38	368,52	389,57	4885,09
Etp	76,35	64,89	77,04	68,73	71,64	66,96	71,59	75,95	78,56	80,70	78,29	77,37	888,07

Elaboración: Autora

La figura 4.8 muestra la representación del comportamiento de los componentes considerados en el balance hídrico para la cuenca alta del río Tahuando del periodo planteado (2009 al 2013).

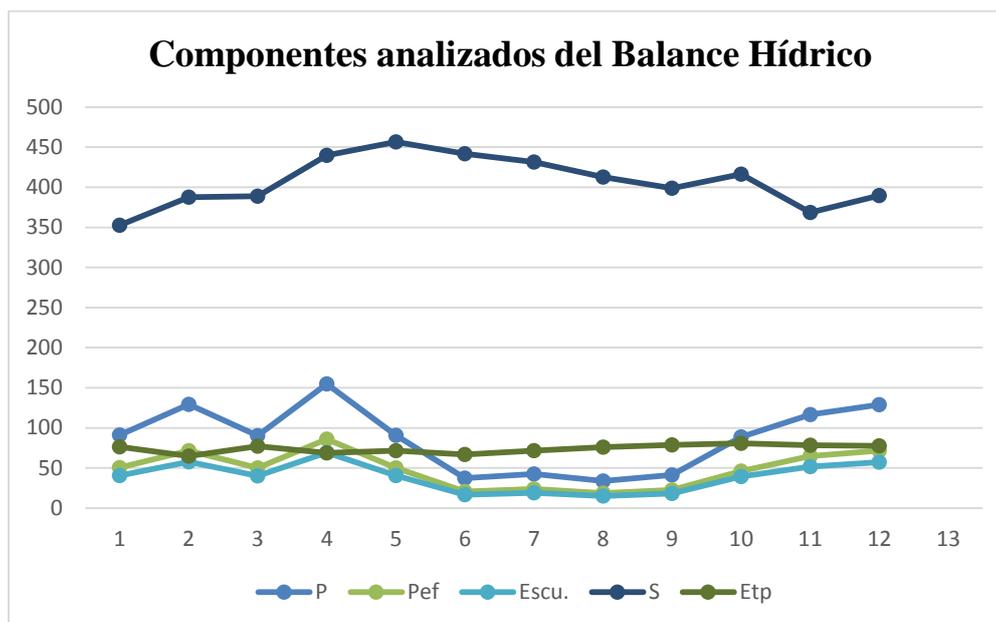


Figura 4. 8 Variables analizadas en el balance hídrico

Elaboración: Autora

Los datos de precipitación alcanzaron valores mensuales promedios de 80,06 mm/año, mientras que la precipitación efectiva fue inferior a 50 mm/año, encontrando una diferencia mínima 40 mm/año entre los dos componentes, el escurrimiento muestra valores próximos a 40 mm/año, mientras que la evapotranspiración potencial alcanzó valores de 75 mm/año. Encontrando una diferencia considerable en la retención de humedad en el suelo que alcanzó un valor máximo de 408 mm/año, en este resultado hay que considerar que la cuenca alta del río Tahuando tiene una capacidad máxima de retención del suelo de 150 mm y el promedio de 77,45 mm, entendiendo que el sobrante es exceso de agua en la cuenca.

En el estudio realizado por la consultora Aguas del Ecuador (2008) se menciona que la precipitación está en un rango de 50 a 110 mm en la cuenca del Tahuando, en la parte baja de la cuenca alcanza los 50 mm, en la zona del volcán Imbabura la pluviosidad es media, alrededor de 70 mm y en la Cordillera de Angochagua los valores de las precipitaciones son altas entre 90 y 110 mm. En la cuenca alta del río Tahuando el valor de la precipitación es de 80,06 mm, coincidiendo con los resultados de la zona del volcán Imbabura y la Cordillera de Angochagua.

4.3 Validación del modelo hidrológico con datos obtenidos en campo

La validación del modelo hidrológico se realizó con salidas de campo al área de estudio. Las variables comprobadas fueron: aforo de caudales, infiltración del suelo, textura del suelo, uso y cobertura del suelo.

4.3.1 Aforo de caudal

El aforo de caudal se realizó mediante salidas de campo, se usó el molinete electrónico Rickly Hidrological para medir en número de revoluciones en un tiempo de 40 segundos, la información levantada fue procesada en el Software Microsoft Excel. El aforo de caudales se realizó en cuatro puntos de la cuenca alta del río Tahuando, en el cuadro 4.25 se detalla las coordenadas, el lugar, la fecha de medición y los caudales calculados.

Cuadro 4. 25 caudales aforados en la cuenca alta del río Tahuando

Coordenadas		Lugar	Fecha	Caudal
X	Y			
823859	10028400	Antes de captación	09/16/14	693,93 l/s
			04/24/16	524,93 l/s
			04/18/15	1450,00 l/s
		Estimación de caudal	09/03/14	1087,29 l/s
823842	10028467	Después de captación	09/16/14	618,18 l/s
			04/24/16	345,06 l/s
			04/18/15	1330 l/s
824990	10025821	Puente Angochagua	03/09/14	848,79 l/s
			09/16/14	1561,01 l/s
			04/18/15	730,57 l/s
			04/24/16	483,68 l/s
823630	10022067	Puente Zuleta	03/09/14	355,98 l/s
			09/16/14	515,63 l/s
			04/18/15	430,19 l/s
			04/24/16	18,28 l/s

Elaboración: Autora

Aitken (1973) menciona que los modelos hidrológicos están sujetos a errores, los cuales pueden ser aleatorios o sistemáticos, y que los análisis de la media, desviación estándar y coeficiente de determinación no son suficientes para poder detectarlos. Para definir la eficiencia del modelo se utilizó la fórmula de regresión y correlación R^2 que muestra que

tan eficaces pueden llegar a ser los resultados de un modelamiento, comparando los datos de caudales aforados en el área de estudio y los datos de escorrentía calculados en laboratorio del año 2013.

En el cuadro 4.26 se detalla los caudales aforados en campo y los datos calculados de escorrentía del año 2013.

Cuadro 4. 26 comparación de datos aforados en campo y datos calculados en laboratorio

Mes	Caudal calculado (lt/s)	Caudal aforado (lt/s)
Enero	676,81	Sin dato
Febrero	3420,56	Sin dato
Marzo	1188,20	1087,29
Abril	2044,44	1500
Mayo	3590,84	Sin dato
Junio	203,76	150
Julio	624,86	Sin dato
Agosto	628,39	Sin dato
Septiembre	632,66	693,93
Octubre	2617,99	Sin dato
Noviembre	2409,69	Sin dato
Diciembre	2331,95	Sin dato
Σ anual	1697,52	Sin dato

Elaboración: Autora

Torres, Mejía, Cortés y otros (2005) menciona que si los resultados de un modelo son altamente correlacionados con los tomados en campo, el coeficiente de eficiencia será estadísticamente cercano a la unidad (1), en este caso el valor calculado del coeficiente de eficiencia es de 0,95; concediendo en el rango mencionado anteriormente por los autores, validando el modelo hidrológico elaborado.

En la figura 4.9 se observa el cálculo del coeficiente de caudales aforados en campo en la cuenca alta del río Tahuando y los cálculos hechos en laboratorio del año 2013.

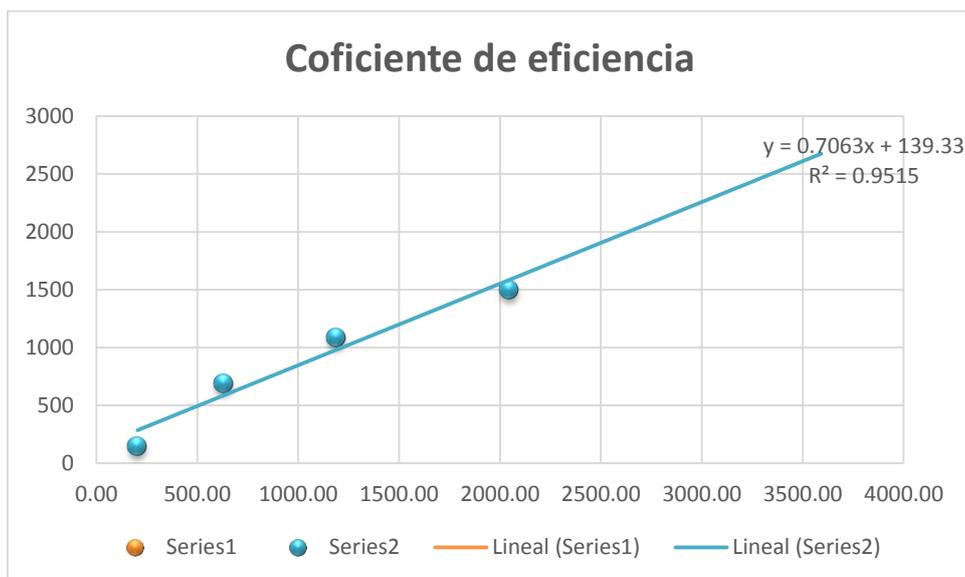


Figura 4.9. Coeficiente de eficiencia de caudales aforados en campo y calculados en laboratorio

Elaboración: Autora

La Consultora “Aguas del Ecuador” (2008) determinó el caudal total de la cuenca del río Tahuando, mediante los métodos de Isoyetas, Polígonos de Thiessen y Zonas de Vida, en los períodos de 1964 – 1985 y 2000 – 2005. El resultado obtenido con el método de Isoyetas en el periodo de 1964 – 1985 alcanzó un valor de 1338,51 l/s y el en periodo 2000 – 2005 un valor de 1057,36 l/s; por el método de Polígonos de Thiessen en el periodo de 1964 – 1985 se obtuvo un caudal de 1091,43 l/s, mientras que en el periodo 2000 – 2005 se registró un caudal de 1477,85 mm y finalmente por el método de Zonas de vida en el periodo de 1964 – 1985 se reportó un caudal de 1338.51 l/s y en el periodo 2000 – 2005 se determinó un caudal de 1057,36 l/s.

En el presente estudio, se calculó en la cuenca alta del río Tahuando en el periodo 2009 – 2013 un caudal de 2000,51 l/s, siendo este caudal más alto que los caudales calculados por la Consultora “Aguas del Ecuador” (2008) en los periodos 1964 – 1985 y 2000 – 2005 en la cuenca; considerando que dichos cálculos son para toda la cuenca del río Tahuando y que los caudales disminuyen por los diferentes usos que se dan en el cauce del río en la parte media y baja, modificando la cantidad disponible de agua. El caudal en la cuenca alta es mayor debido a la baja necesidad de usar el recurso en la parte alta.

En el cuadro 4.27 se detalla los caudales calculados por agua del Ecuador en los periodos 1964 – 1985 y 2000 – 2005 en la cuenca de río Tahuando y los caudales calculados en la cuenca alta del río Tahuando en el periodo 2009 - 2013.

Cuadro 4. 27 caudales calculados en la cuenta del río Tahuando y la cuenca alta del río Tahuando

Caudal calculados (lts/seg)			
Método	Cuenca río Tahuando		Cuenca alta río Tahuando
	Periodo		
	1964 – 1985	2000 – 2005	2009 - 2013
Isoyetas	1338,51	1057,36	-----
Thiessen	1091,43	1477,85	-----
Zona de vida	1338,51	1057,36	-----
Balance Hídrico			2000,51

Elaboración: Autora

4.3.2 Infiltración de agua

La comprobación de infiltración de agua se realizó en cuatro puntos del área de estudio, siendo estas recargas: moderada, baja y muy baja. En el cuadro 4.28 se describe el lugar, las coordenadas, la recarga hídrica, la infiltración y el tiempo.

Cuadro 4. 28 Comprobación de infiltración de agua en la cuenca alta del río Tahuando

Lugar	Recarga Hídrica	Comprobación de infiltración de agua					
		Coordenada			Pruebas de infiltración		
		X	Y	Altitud	Infiltración (mm)	Tiempo (min)	Observaciones
Zuleta	Moderado	823705	10022020	2905	90	7,30	Suelo con cultivos y pastos
Angochagua	Bajo	824939	10025837	2778	65	15	Suelo con cultivos y pastos, presencia de animales
Cochas	Bajo	820215	10022000	3194	90	4,42	Suelo con cultivos y pastos, presencia de animales
Angochagua (bosque eucalipto)	Muy bajo	823601	10027477	2730	88	15	Bosque de eucalipto

Elaboración: Autora

4.3.3 Uso de suelo y cobertura vegetal

La cobertura y uso del suelo se lo realizó mediante salidas de campo, donde se comprobó la información obtenida en laboratorio en campo mediante la ficha de caracterización biofísica (cuadro 3.2). Las especies más representativas encontradas se detallan en el cuadro 4.5 de resultados de caracterización.

En la figura 4.9 se observa la presencia de pino en crecimiento y eucalipto en edad adulta.



Figura 4. 9 Bosque en crecimiento de pino en la cuenca alta del río Tahuando

Elaboración: Autora

4.3.4 Textura del suelo

La textura del suelo se realizó en conjunto con la prueba de infiltración del suelo en una salida de campo. En el cuadro 4.29 se muestra los puntos donde se tomó las muestras, las coordenadas y la textura.

Cuadro 4. 29 Textura del suelo

Textura del suelo			
Coordenadas		Lugar	Textura
x	y		
823601	10027477	bosque de eucalipto	franco
8232705	10022020	Zuleta	arenoso
820215	10022000	Cochas	franco
824939	10025837	Angochagua	limoso

Elaboración: Autora

En la figura 4.10 se observa la comprobación de la textura del suelo en la cuenca alta del río Tahuando.



Figura 4. 10 prueba de textura de suelo

4.4 Propuesta de estrategias de manejo de la cuenca alta del río Tahuando

La propuesta de estrategias de manejo se realizó con la información de la caracterización del área de estudio, identificación de áreas de recarga hídrica, los de datos obtenidos en el modelo hidrológico y el marco legal e información adicional. Dicha propuesta está

orientada al manejo sustentable de la cuenca para un adecuado manejo, conservación y aprovechamiento del recurso hídrico.

4.4.1 Datos generales de la propuesta

A continuación se detallan los datos generales de la propuesta de estrategias de manejo de la cuenca alta del río Tahuando.

4.4.2 Diagnóstico y problema

Se detalla la situación actual de la cuenca alta del río Tahuando y los diferentes problemas.

4.4.2.1 Descripción de la situación actual del área

La cuenca alta del río Tahuando presenta algunos problemas como la pérdida de cobertura vegetal, especies introducidas, ganadería, avance de la frontera agrícola, avance de la zona rural hacia el área de conservación y protección, reducción de caudales en época seca y vertido de aguas residuales directo al río, además de arrastre de sedimentos en época lluviosa.

4.4.2.2 Identificación, descripción y diagnóstico del problema

De acuerdo al mapa de uso de suelo el año 2008, gran parte del uso de suelo de la cuenca alta del río Tahuando está destinada para conservación y protección con un porcentaje de 49,88%, el uso agropecuario, agrícola, tierras improductivas y zona urbana cubren el faltante del porcentaje. Además en el área de estudio se encontró bosque de producción principalmente con plantaciones de eucalipto - *Eucalyptus sp*, ciprés - *Cupressuss empervirens* y pino - *Pinus radiata*, algunos son bosques en edad adulta, mientras que otros están en proceso de crecimiento.

Se presenta también el conflicto por el uso del suelo, ya que actualmente no tienen un adecuado manejo, incentivando a que se provoquen o acrecienten problemas como: la erosión, pérdida de cobertura vegetal y pérdida de agua a futuro. El avance de la frontera

agrícola ha ido incrementando al igual que el avance de la zona rural hacia las zonas de conservación y protección. El vertido de aguas residuales directas al río es otro problema, ya el agua para riego de algunos cultivos que se producen en el área de estudio se toman directamente del río Tahuando.

El modelo hidrológico dio como resultado que tanto en la época seca como en la época lluviosa existe excedente de agua con una reducción de caudales de casi de un 50% en época seca, teniendo un excedente escaso para estos meses, además el arrastre de sedimentos en la época lluviosa es muy notoria; es necesario que se dé un adecuado manejo a la cuenca alta del río Tahuando con el fin de que se mejore y mantenga el agua en la cuenca.

4.4.2.3. Matriz FODA

La matriz FODA se elaboró con el fin de encontrar los elementos más relevantes para iniciar una la propuesta de estrategias de manejo de la cuenca alta del río Tahuando. La utilización de esta herramienta permitió establecer las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del área de estudio. En el cuadro 4.30 se detallan los elementos del FODA analizados para la cuenca alta del río Tahuando.

Cuadro 4. 30 Elementos del FODA analizados para la cuenca alta del río Tahuando.

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • El marco legal ecuatoriano promueve la conservación y protección del recurso agua. • Existencia de junta de regantes, Gobierno parroquial. • Algunos de los usuarios están interesados en el manejo adecuado de la cuenca. • El uso del suelo de conservación y protección tiene un porcentaje de 49,88%. • El modelo hidrológico dio como resultado un excedente de agua tanto en la época seca como en la lluviosa que pueden ser aprovechados. • La cuenca es considerada buena productora de agua con un 64.45% de posibilidad de recargas moderada, alta y muy alta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las diferentes entidades como MAE, EMAPA – I, Juntas de regantes, y GADs municipales y parroquiales contarán con información para ejecutar proyectos en beneficio de los actores y el manejo adecuado de la cuenca. • Existe un excedente de agua en época seca y lluviosa que puede ser utilizado en diferentes proyectos. • Existencia de un área de bosque y vegetación protectora en Zuleta de 4770,00 ha (privada) destinada a protección y conservación.
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Inexistencia de control del desvió de agua. • Desconocimiento del marco legal existente con respecto al manejo, cuidado y protección del agua por parte de los usuarios. • Desconocimiento de buenas prácticas ambientales para la protección, cuidado y mantenimiento del agua por parte de los usuarios. • Escasa concienciación ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> • Existencia de bosques productores destinados para extracción de madera. • Presencia de ganadería en el área de estudio. • Avance de la frontera agrícola hacia áreas de conservación y protección. • Descarga directa de aguas servidas y basura al río Tahuando. • Existencia de incendios forestales en la época seca.

Elaboración: Autora

Se determinó los elementos más relevantes del FODA se analizó cada uno de estos con fin de determinar las propuestas de estrategias para el manejo adecuado el recurso hídrico.

Fortalezas: en la cuenca alta del río Tahuando se determinó que cuenta con un adecuado uso del suelo de conservación y protección con un porcentaje de 49,88%, además el modelo hidrológico calculó un excedente de agua en todos los meses. Con respecto a las áreas de recarga hídrica con un 64,45% está considerada como buena proveedora de agua. Además está la existencia de la Junta de regantes, Gobierno Parroquial y usuarios de la cuenca interesados en el manejo adecuado de esta. El marco legal ecuatoriano por su parte puede ser tomado como respaldo con el fin de basarse en las normativas legales para ejecutar proyectos que ayuden al manejo adecuado del área de estudio.

Oportunidades: considerando los aspectos positivos de la cuenca alta del río Tahuando está el excedente de agua en época seca y época lluviosa que pueden ser aprovechado de una mejor manera, la existencia de un área de bosque y vegetación protectora en Zuleta de 4770,00 ha destinada a protección y conservación que a pesar de ser una propiedad privada puede ser usada como modelo para el manejo adecuado de esta. Las diferentes entidades como MAE, EMAPA – I, Juntas de regantes, y GADs municipales y parroquiales contarán con información para ejecutar proyectos en beneficio de los actores y el manejo adecuado de la cuenca.

Debilidades: en las debilidades se menciona la inexistencia de control del desvío de agua, el desconocimiento del marco legal existente, las buenas prácticas ambientales y la escasa concienciación ambiental con respecto al manejo, cuidado y protección de la cuenca por parte de los usuarios que podrían ocasionar diversos problemas a mediano y largo plazo.

Amenazas: en las amenazas detectadas están: la existencia de bosques productores destinados para extracción de madera, la presencia de ganadería y el avance de la frontera agrícola hacia áreas de conservación, protección, los afluentes y el río, la descarga directa de aguas servidas y basura en río Tahuando, además de la existencia de incendios forestales en la época seca, afectando directamente al área de estudio.

Después del análisis FODA se determinó las propuestas de estrategias de manejo basándose en los aspectos positivos (oportunidades y fortalezas) y los aspectos negativos (debilidades y amenazas) a continuación se detallan las siguientes estrategias.

Estrategia 1.- Elaboración, implementación y socialización de planes de manejo.

Estrategia 2.- Implementación de un programa de educación ambiental.

4.4.3 Objetivos de la propuesta

A para el desarrollo de la propuesta se planteó un objetivo general y dos específicos.

4.4.3.1 Objetivo general

Elaborar la propuesta de estrategias de manejo del recurso hídrico de la cuenca alta del río Tahuando para el mejoramiento, conservación y aprovechamiento.

4.4.3.2 Objetivos específicos

- Establecer estrategias que ayuden al manejo, conservación y protección del agua en la cuenca.
- Lograr que los usuarios de la cuenca adquieran conocimientos sobre la protección, manejo e importancia del ambiente.

4.4.4 Estrategias de ejecución

En el cuadro 4.31 se detalla la primera propuesta de estrategia de manejo de la cuenca alta el río Tahuando realizada con el análisis del FODA.

Cuadro 4. 31 propuesta de estrategia de manejo de la cuenca alta el río Tahuando realizada con el análisis del FODA

Propuesta	Beneficiarios	Actores claves	Actividades	Lugar	Marco Legal
Elaboración, implementación y socialización de planes de manejo de las áreas de recarga hídrica y caudales dentro de la cuenca	Beneficiarios directos: parroquia Angochagua	Junta de regantes de Angochagua	Control de desvío de agua	Comuna Zuleta	Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017
	Beneficiarios indirectos: usuarios de la cuenca media y baja del río Tahuando	SENAGUA MAE - Ibarra	Reforestación áreas en zonas de recarga hídrica Promocionar actividades y prácticas agrícolas sustentables Protección de las áreas de recarga hídrica y el río Tahuando	Comuna Angochagua	Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre.
Implementación de un programa de educación ambiental	Beneficiarios directos: parroquia Angochagua	Junta de regantes de Angochagua	Taller sobre normativa legal vigente	Comuna Zuleta	
	Beneficiarios indirectos: usuarios de la cuenca media y baja del río Tahuando	SENAGUA MAE - Ibarra	Taller sobre buenas prácticas ambientales Taller sobre prevención de incendios forestal	Comuna Angochagua	

Estrategia 1.- Elaboración, implementación y socialización de planes de manejo de las áreas de recarga hídrica y caudales dentro de la cuenca.

Es importante elaborar, implementar y socializar un plan de manejo de la cuenca alta del río Tahuando, con el fin que los usuarios conozcan los recursos naturales disponibles que tiene. Además se debe lograr el apoderamiento de estos por parte de los beneficiarios con el fin de tener un manejo adecuado de la cuenca.

Meta: Tener un plan de manejo actualizado cada cierto periodo de tiempo el cual se pueda implementar y socializar con los usuarios de la cuenca, para que se puedan realizar diferentes actividades con el fin de mejorar el manejo de la cuenca.

Beneficiarios: los beneficiarios directos son los usuarios de la parroquia Angochagua, los beneficiarios indirectos los usuarios de la cuenca media y baja del río Tahuando.

Actores claves: Junta de regantes de Angochagua, SENAGUA, MAE - Ibarra

Lugar: Comuna Zuleta, Comuna Angochagua

Actividades: a continuación se detallan las actividades que podrían realizarse para alcanzar la meta establecida.

- **Control de desvió de agua**

Es necesario tener una mejor organización interna por parte de los usuarios para poder controlar el desvió de agua, ya que en algunos lugares donde ocurre el desvió no toda el agua es utilizada. Para esto es necesario la organización y conformación de un grupo líderes que se enfoquen en el manejo del agua y promuevan actividades que ayuden a la organización de los desvíos de este recurso de acuerdo a la necesidad del usuario.

- **Reforestación de áreas de recarga hídrica**

En la cuenca alta de río Tahuando el avance de la frontera agrícola hacia zonas de conservación y protección y la presencia de bosques de producción son problemas que se tienen en la cuenca, por lo que es necesario que se realice una reforestación principalmente en las áreas de recarga hídrica como medida preventiva de conservación y recuperación de la cobertura vegetal propia de la zona. Esta reforestación ayudaría a que en la cuenca se almacene una mayor cantidad de agua, teniendo un excedente mayor para las diferentes actividades que se desarrollan dentro de la cuenca.

- **Promocionar actividades y prácticas agrícolas sustentables**

Las actividades que se desarrollan en la cuenca alta del río Tahuando son la agricultura y ganadería por lo que es necesario que se promuevan actividades y prácticas agrícolas sustentables para la conservación del recurso suelo, ya que este es un elemento importante en el almacenamiento del agua para la cuenca.

- **Protección de las áreas de recarga hídrica y el río Tahuando**

En los recorridos realizados se observó la presencia de ganado vacuno y caballar en la cercanía del río y áreas de recarga hídrica, por lo que es necesario tener control estricto de los límites de las áreas de pastos para ganado, ya que estos pueden alterar la capacidad de absorción del suelo por el constante pisoteo, provocando que haya cambios en la cantidad de agua infiltrada.

Estrategia 2.- Implementación de un programa de educación ambiental.

Es importante implementar un programa de educación ambiental, con el fin de concienciar a los usuarios de la cuenca alta del río Tahuando y fortalecer sus habilidades y capacidades.

Meta: Los usuarios de la cuenca alta del río Tahuando mejoren su conocimiento acerca de la normativa legal vigente y las buenas prácticas ambientales que ayudarán al correcto manejo de la cuenca.

Beneficiarios: los beneficiarios directos son los usuarios de la parroquia Angochagua, los beneficiarios indirectos los usuarios de la cuenca media y baja del río Tahuando.

Actores claves: Junta de regantes de Angochagua, SENAGUA, MAE – Ibarra

Lugar: Comuna Zuleta, Comuna Angochagua

Actividades: a continuación se detallan las actividades que podrían realizarse para alcanzar la meta establecida.

- Taller sobre normativa legal vigente

Es importante que los usuarios de la cuenca alta el río Tahuando conozcan la normativa legal vigente, los usuarios estarán en la capacidad de relacionar los problemas ambientales con la normativa legal vigente usando esta como apoyo para el manejo adecuado del recurso hídrico. Temática a revisar: Constitución de la República del Ecuador aprobada en el año 2008, el Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017, la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua aprobada en agosto de 2014 y la Ley Forestal y de Conservación de Áreas Naturales y Vida Silvestre aprobada en septiembre de 2004.

- **Taller sobre buenas prácticas ambientales**

El taller sobre las buenas prácticas ambientales pretende impulsar el desarrollo sostenible en la cuenca alta del río Tahuando, fortaleciendo el conocimiento, las habilidades y capacidades de los usuarios con el fin de disminuir malas prácticas ambientales. Temática a revisar: prácticas agrícolas amigables con el medio ambiente, conservación de suelo, manejo de residuos líquidos y sólidos.

- **Taller sobre prevención de incendios forestal**

Al ser la cuenca alta del río Tahuando proveedora de agua por las características que presenta, es necesario que se promueva la prevención sobre incendios forestales, enfocándose en los problemas que estos pueden causar a corto, mediano y largo plazo.

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones y recomendaciones se realizaron en base a los resultados obtenidos.

5.1 Conclusiones

- Se identificaron en la cuenca alta del río Tahuando las áreas de recarga hídrica, teniendo una dominancia de recarga moderada (42,73%), seguida por la recarga baja (31,80%), con 18,55% está la recarga alta, las de menor porcentaje son la recarga muy alta y muy baja con 3,46%. Concluyendo que la cuenca es buena proveedora de agua, ya que tiene 64,45% de posibilidad de recargas moderada, alta y muy alta.
- La mayor probabilidad de áreas de recarga hídrica se localizan en zonas con pendientes medias, cobertura vegetal compuesta por bosque nativo y matorral, uso del suelo con presencia de pastos cultivados, textura del suelo gruesa a media e infiltración rápida. Estas zonas se localizan en los sectores de Angochagua, Zuleta y Santa Rosa Baja.

- Los datos de precipitación en el periodo 2009 – 2013 alcanzaron valores anuales de 1044,76 mm, mientras que la precipitación efectiva alcanzó valores de 576,31 mm, el escurrimiento calculado fue de 465,33 mm, la evapotranspiración potencial calculada fue de 88,07 mm. En la retención de humedad en el suelo alcanzó un promedio mensual de 351,95 mm.
- En la cuenca alta del río Tahuando existe un excedente de agua tanto en la época seca como en la época lluviosa estando en un rango de 66,00 – 559,53 mm/año.
- Los datos obtenidos mediante el modelo hidrológico mostró un ajuste del coeficiente de eficiencia satisfactorio para la cuenca alta del río Tahuando, graficando los datos simulados y medidos y aplicando la fórmula de correlación y regresión lineal con un valor de 0,95; concluyendo que se tuvo un buen ajuste entre los datos simulados y medidos en campo, sin presentar errores sistemáticos.

5.2 Recomendaciones

- La información obtenida en el trabajo de investigación puede ser utilizada para la elaboración de proyectos a futuro en beneficio de los usuarios del agua y el manejo adecuado de la cuenca alta el río Tahuando.
- Se recomienda tener un mejor manejo de las áreas de recarga hídrica identificadas en el área de estudio, con el fines de conservación y protección.
- Es necesario la implementación de al menos una estación meteorológica completa que cubra el área de estudio, ya que este tipo de información es determinante a la hora de realizar cualquier tipo de proyecto sea en beneficio directo a los usuarios del área de estudio como a los indirectos.

CAPITULO VI

6.1 Bibliografía

- Acevedo y Rodríguez . (2012). *Páramo andino como productor y regulador del recurso agua, microcuenca alta de la quebrada Mixteque, Sierra Nevada de Mérida, Venezuela*. Suerra Nevada de Mérida, Venezuela.
- Aguas del Ecuador. (2008). *Caracterización Hidrológica, abiótica, y biótica de la cuenca del río Tahuando ubicada en el cantó Ibarra, provincia de Imbabura*. Ibarra.
- Aitken, A. (s.f.). *Assesing systematic errors in rainfall - runoff*. 1973.
- Cáceres, L. (2015). *Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del río Negro, ciudad de Guatemala la sistematización de práctica profesional*. Guatemala.
- CAP-NET. (2008). *Gestión integrada de recursos hídricos para orgnizaciones de cuencas fluviales*. España.
- Castro, J. (2011). *Plan de manejo y Conservación de zonas con potencial de recarga hídrica, micro cuenca Las Jaguas, Ciudad Antigua*. Nicaragua.
- Chamorro, M. (2016). *Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos La Carbonería, Guaraczapas, Yuyucocha Y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra*. Ecuaoor- Ibarra.
- Comunidad Andina. (2010). *El agua de los Andes un recurso clave para el desarrollo e integración de la región* . San Isidro, Lima, Perú: Dot Print SAC.
- Desarrollo, S. N. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir 2013 - 2017*. Ecuador- Quito.
- Duque, J. (2008). *Modelación cartográfico hidrológica de la cuenca hidrografica del río La Chimba pra determinar la potencialidad del aprovechamiento del recurso agua mediante herramienta SIG en la cuenca y en el área de influencia del proyecto Riego Cayambe - Tabacundo* . Sangolquí, Ecuador.

- Echaverría. (1999). *Valoración del servicio ambiental que prestan las áreas protegidas*. Quito, Ecuador.
- Ecuador, A. N. (2008). *Constitucion de la Republica del Ecuador*. Ecuador - Quito.
- Ecuador, A. N. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua*. Ecuador - Quito.
- Enzo Martínez . (2013). *Curvas de infiltración*. Costa Rica.
- García, D. (2010). *Propuesta del plan de manejo de la parte alta de la subcuenca del río Juval e el cantón Alausí, provincia del Chimborazo - Ecuador, con la utilización de un SIG*. Quito, Ecuador.
- Gonzáles, A. (2004). *Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas*. País Vasco.
- Greenfacts, 2012 ; Echaverría. (1999). *Valoración del servicio ambiental que prestan las áreas protegidas*. Quito, Ecuador.
- Gutierrez, C. (2016). *Programa Evaporanspiracion Ptenial PETP V2.0.00*. Ayacucho - Perú .
- GWP. (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos*. Estocolmo, Suecia.
- I, E. . (2005). *Proyecto Pago de servicios ambientales para la protección del recurso hídrico que abastece al cantón Ibarra- Diagnóstico Ambiental Rápido Microcuenca del río Tahuando*. Ecuador - Ibarra.
- Maderey y Jiménez. (23 de Junio de 2000). *Investigaciones geográficas*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112001000200003&script=sci_arttext
- Madroñero y Jiménez. (2006). *Manejo del recurso hídrico y estrategias de gestión integral en la microcuenca del río Mijitayo, Colombia*. Colombia.
- Marco, T. (2011). *Determinación de balances hídricos de cuencas y microcuencas*. Chuquisaca - Bolivia.
- Matus, Faustino y Jiménez. (2009). *Guía para la identificación participativa de las zonas con potencial de recarga hídrica, Aplicación práctica en la sub cuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica.
- Matus, O. (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Jucuapa, Matagalpa Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica.

- Mintegui. (2012). *El papel del bosque en la regulación de los ciclos del agua y de los sedimentos en las cuencas de recursos torrenciales, ante la incidencia en ellas de eventos meteorológicos extraordinarios: aspectos prácticos*. Madrid.
- Mintegui y Robredo. (1994). *Caracterización de la cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico forestal, mediante modelos hidrológicos* (Vol. uno). Madrid, España.
- Nacional, H. C. (2004). *Ley Forestal y de Conservación de Áreas*. Ecuador - Quito.
- Ordoñez. (2011). *Cartilla Técnica : Ciclo Hidrológico*. Lima, Perú.
- PARTNERSHIP, G. W. (2000). *Manejo integrado de recursos hídricos*. Estocolmo, Suecia.
- Pizarro, Flores, Sanguesa y martinez. (2013). *Curvas de Infiltración*.
- Reyes y Suazo. (2007). *Caracterización biofísica, socioeconómica y ambiental de Sanguay y río Grande, zonas de concentración del Teocinte*. Honduras.
- Rodas, G. (2008). *Manejo y gestión de zonas de recarga hídrica de microcuencas y fuentes de agua para consumo humano en Honduras*. Turrialba, Costa Rica.
- Stella, D. A. (2015). *ESTIMAR LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS SISTEMAS ACUÍFEROS*. Colombia, Bogotá.
- Torres, E. M. (2005). *Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Loja*. México, Guanajuato.
- UICN–, U. I. (2009). *Guía para la Elaboración de Planes de Manejo de Microcuencas*. Guatemala . San Marcos.
- UNESCO. (2010). *Tercer Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: el agua en el mundo en constante cambio*.
- Varas, J. T. (2007). *Evaporación con el método de Penman usando redes*. Chile.

CAPÍTULO VII

