



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

MODELAMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA
DEL RÍO AMBI

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

AUTOR: Cristian Andrés IpiALES Arroyo

DIRECTOR:
Ing. Santiago Cabrera MSc.

Ibarra - Ecuador

2022



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Ibarra, 18 de abril del 2022

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: "MODELAMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO AMBI", de autoría del señor Cristian Andrés IpiALES Arroyo estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA RECURSOS NATURALES RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el autor ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

MSc. Santiago Cabrera
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

MSc. Gabriel Jácome
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

MSc. Elizabeth Velarde
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TRITULACIÓN

Misión Institucional:

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



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

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

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

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA :	1721083010
NOMBRES Y APELLIDOS:	Cristian Andrés Ipiales Arroyo
DIRECCIÓN:	Imbabura, Otavalo, Calles Julia Mosquera de Rosero y Francisco Suarez Veintimilla
EMAIL:	caipialesa@utn.edu.ec
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	0984825633

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	MODELAMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO AMBI
AUTOR:	Cristian Andrés Ipiales Arroyo
FECHA:	19 de abril del 2022
SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Recursos Naturales Renovables
DIRECTOR:	MSc. Jairo Santiago Cabrera García

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



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

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

2. 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 que 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, a los 20 días del mes de abril de 2022

EL AUTOR:

.....
Cristian Andrés Ipiales Arroyo
CI: 1721083010

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por guiarme por el camino del bien, por darme una familia maravillosa y por estar siempre en mi corazón. Un agradecimiento especial a mis abuelitos por ser parte del proceso de formación en educación y valores, también un agradecimiento especial a mis padres Eugenia y Néstor que supieron comprenderme y darme su amor incondicional. También a mis hermanos por su cariño y apoyo.

A la Universidad Técnica del Norte por brindarme la formación académica y personal durante toda la estancia desde el inicio hasta la finalización y obtención del presente Título, además de contar con excelentes profesionales quienes además supieron impartir valores para formarme con una persona de bien. Un profundo agradecimiento a mi director el Ing. Santiago Cabrera quien supo guiarme, aconsejarme y ayudarme en la realización de mi trabajo, gracias por su paciencia y apoyo. Agradecer a mis asesores Ing. Gabriel Jacome e Ing. Elizabeth Velarde, quienes colaboraron con la realización de este trabajo, además un agradecimiento profundo al Ing. Paul Arias por ser parte del proceso del presente trabajo. Agradecido con la Ing. Karen Portilla quien ha sido un pilar fundamental en la formación profesional y personal llegando a considerarla una gran e indiscutible amiga, a todos mis compañeros a lo largo de la carrera y a mis amigos Ing. Alexis Galarza e Ing. Melannie García.

Al Ing. Roberto Conejo quien tuvo la disponibilidad de facilitarme la obtención de los recursos técnicos y herramientas para concluir el trabajo de titulación.

A la Ab. Carla Torres por ser parte del crecimiento profesional y personal y ser una gran amiga y me apoyo en cada momento, también un agradecimiento al Ing. Luis Suárez por ser un hermano, socio y amigo.

Cristian Andrés IpiALES Arroyo

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico de forma especial a mi abuelita Celindita, a mis padres Eugenia y Nestor, mi hermano y hermanas y mis sobrinos quienes han sido motor para conseguir este logro y seguramente estarán presentes en los siguientes. A mis compañeros y todos quienes hicieron parte de mi formación académica, profesional y sobre todo personal.

Se lo dedico a mi sobrinita Camila de quien estoy orgulloso de su educación y valores además de ser la persona quien entrega su atención y cariño de forma incondicional.

Se la dedico a mis amigos Belén Trujillo, Alexis Galarza, Melannie García por apoyarme a lo largo de la carrera.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Páginas
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
RESUMEN	14
ABSTRACT.....	15
Capítulo I. Introducción	16
1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte	16
1.2. Problema de investigación y justificación.....	20
1.3. Objetivos	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4. Pregunta directriz de la investigación	22
Capítulo II. Revisión Literaria	23
2.1. Marco teórico referencial	23
2.1.1 Cuenca hidrográfica.....	23
2.1.1.1 Tipos de cuencas	24
2.1.1.2 Características geomorfológicas.....	27
2.1.2. Oferta hídrica de cuencas hidrográficas.....	32
2.1.2.1. Precipitación - escorrentía	34
2.1.2.2. Coeficiente de escorrentía.....	34
2.1.2.3. Evapotranspiración (ETP).....	34
2.1.3. Demanda hídrica en cuencas hidrográficas	35
2.1.3.1. Uso doméstico y consumo humano	35
2.1.3.2. Uso industrial.....	36
2.1.3.3. Uso para riego.....	36
2.1.3.4. Uso para abrevadero	36
2.1.4. Balance hídrico en cuencas hidrográficas.....	37
2.1.4.1. Modelos hidrológicos	37
2.1.4.2. Modelamiento mediante HEC HMS.....	38
2.1.4.3. Pruebas estadísticas.....	41

2.2.	Marco legal.....	42
2.2.1.	Constitución de la República del Ecuador	42
2.2.2	Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo	43
2.2.3	Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025	43
2.2.4	Código Orgánico del Ambiente (COA)	44
2.2.5	Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía y Descentralización (COOTAD).....	44
2.2.6	Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua	45
Capítulo III. Metodología.....		46
3.1.	Descripción del área de estudio.....	46
3.2.	Métodos.....	48
3.2.1	Tratamiento de información.....	48
3.2.1.1.	Delimitación del área de estudio.....	49
3.2.1.2.	Caracterización de la microcuenca	49
3.2.1.3.	Caracterización biótica	55
3.2.2	Oferta hídrica	56
3.2.2.1.	Precipitación	56
3.2.2.2.	Temperatura.....	58
3.2.2.3.	Caudales.....	60
3.2.2.4.	Cálculo de la evapotranspiración.....	60
3.2.2.5.	Cálculo de la infiltración.....	61
3.2.2.6.	Cálculo de la escorrentía.....	61
3.2.3	Demanda hídrica	62
3.2.3.1.	Uso de agua para consumo humano	63
3.2.3.2.	Uso de agua para riego y abrevadero de animales.....	63
3.2.3.3.	Uso de agua para uso productivo.....	64
3.2.4	Balance hídrico	64
3.2.4.1	Modelamiento del balance hídrico aplicando el software HEC- HMS	65
3.2.4.2.	Modelamiento del caudal superficial con HEC HMS	69
3.2.4.3.	Calibración del modelo hidrológico	71
3.2.4.4.	Validación del modelo hidrológico.....	72

3.2.4.5	Determinación de caudales.....	73
3.2.5	Materiales y equipos	73
Capítulo IV.	Resultados y Discusión.....	75
4.1.	Estimación de entradas y salidas naturales para la obtención de la oferta hídrica de la microcuenca del río Ambi	75
4.1.1.	Caracterización morfométrica.....	75
4.1.1.1.	Parámetros de forma	75
4.1.1.2.	Parámetros de relieve.....	76
4.1.1.3.	Parámetros de la red hídrica.....	77
4.1.2.	Caracterización biofísica.....	79
4.1.2.1.	Precipitación	79
4.1.2.2.	Temperatura.....	80
4.1.2.3.	Clima.....	82
4.1.2.4.	Evapotranspiración	84
4.1.2.5.	Escorrentía	86
4.1.2.6.	Caudales.....	87
4.2.	Demanda Hídrica de la microcuenca del río Ambi	89
4.2.1	Uso de agua para Consumo Humano.....	89
4.2.2	Uso de agua para riego y abrevadero de animales.....	89
4.2.3	Uso de agua productivo o industrial	90
4.2.4	Caudales autorizados	91
4.3.	Modelación del Balance Hídrico de la microcuenca del río Ambi	93
4.3.1	Determinación del número de curva de la microcuenca del río Ambi	93
4.3.2	División de las microcuencas	94
4.3.2.1.	Determinación de la curva número de las subdivisiones.....	95
4.3.3	Modelamiento del cauce superficial con HEC-HMS	96
4.3.4	Calibración del modelo hidrológico	97
4.3.5	Validación del modelo hidrológico.....	99
4.3.6	Índice de escasez.....	101
Capítulo V.	Conclusiones y Recomendaciones.....	104
5.1.	Conclusiones	104
5.2.	Recomendaciones.....	104

Referencias	105
Anexos	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de la microcuenca según su área.....	27
Tabla 2.	Métodos y parámetros para la determinación del modelo hidrológico.....	40
Tabla 3.	Información base para el presente estudio.....	48
Tabla 4.	Ponderación para el factor de forma.....	51
Tabla 5.	Parámetros morfométricos de la microcuenca del río Ambi.....	51
Tabla 6.	Ponderación de la pendiente media para determinar el tipo de relieve.....	53
Tabla 7.	Ponderaciones de la densidad de drenaje.....	54
Tabla 8.	Microcuencas de influencia para todo el presente estudio.....	65
Tabla 9.	Tipos de suelo y textura del suelo.....	66
Tabla 10.	Identificación de la curva número de la microcuenca.....	67
Tabla 11.	Rango del coeficiente de criterio Nash-Sutcliffe.....	72
Tabla 12.	Detalle de materiales e instrumentos que se empleara en el presente estudio.....	73
Tabla 13.	Parámetros de forma.....	75
Tabla 14.	Parámetros morfométricos de la microcuenca del río Ambi.....	76
Tabla 15.	Parámetros de la red hídrica de la microcuenca del río Ambi.....	77
Tabla 16.	Especies representativas de la microcuenca del río Ambi.....	83
Tabla 17.	Escorrentía media en litros mensuales (l/mes) de la microcuenca del río Ambi comprendida entre el período 2006 hasta 2015.....	87
Tabla 18.	Caudales medios mensuales (m^3/s) de la microcuenca del río Ambi comprendida entre el período 2006 hasta 2015.....	87
Tabla 19.	Actores dentro del area de influencia del area de estudio.....	89
Tabla 20.	Actores con autorizaciones de riego.....	90
Tabla 21.	Actores con autorizaciones de uso productivo.....	90
Tabla 22.	Caudales autorizados por uso de agua.....	91
Tabla 23.	Datos empleados para el modelamiento hidrológico HEC-HMS en la microcuenca del río Ambi.....	93
Tabla 24.	Tabla de Curva Número y porcentaje de impermeabilidad.....	96

Tabla 25.	Parámetros iniciales para el modelamiento de las subdivisiones hidrográficas	97
Tabla 26.	Valores optimizados de los parámetros del método de Curva Número	97
Tabla 27.	Resultados de la calibración del modelo hidrológico.	98
Tabla 28.	Resultados de la validación del modelo hidrológico	100
Tabla 29.	Índice de escasez obtenido del cálculo de la oferta y demanda hídrica manual.....	101
Tabla 30.	Índice de escasez obtenido del cálculo de la oferta y demanda hídrica automática.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de la microcuenca del río Ambi	47
Figura 2.	Estaciones hidrológicas contempladas para el presente estudio	57
Figura 3.	Curva de doble masa de las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis de precipitaciones del período comprendido entre 2006 hasta 2015.	57
Figura 4.	Curva de doble masa de las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis de temperaturas del período comprendido entre 2006 hasta 2015.	59
Figura 5.	Pendiente media de la microcuenca del río Ambi	77
Figura 6.	Precipitación media anual de la microcuenca del río Ambi.	80
Figura 7.	Temperatura media de la microcuenca del río Ambi.....	81
Figura 8.	Pisos bioclimáticos de la microcuenca del río Ambi	82
Figura 9.	Diagrama ombrotérmico	84
Figura 10.	Uso de suelo y cobertura vegetal de la microcuenca del río Ambi...85	
Figura 11.	Infiltración de la microcuenca del río Ambi	86
Figura 12.	Modelo Hidrológico Conceptual (MHC) de la microcuenca del río Ambi	95
Figura 13.	Hidrograma de la prueba de calibración.	98
Figura 14.	Hidrograma de la prueba de validación	99

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

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

MODELAMIENTO DEL BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA DEL
RÍO AMBI

Cristian Andrés IpiALES Arroyo

RESUMEN

La dinámica de los recursos hídricos obedece a su ciclo natural y a las presiones antrópicas que han coadyuvado a que exista una preocupación latente sobre el acceso seguro tanto en calidad como en cantidad para la consecución de los procesos naturales de los ecosistemas, así como de las actividades antrópicas. Este estudio tuvo como finalidad determinar de forma cuantitativa la aplicación del modelamiento del balance hídrico de la microcuenca del río Ambi a través del Sistema de Modelamiento Hidrológico desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* y la aplicación de un modelo de transformación de precipitación en escorrentía. Se obtuvieron los parámetros del modelamiento a través de la oferta hídrica, con los datos de precipitación, Número de Curva (CN) obtenido de acuerdo con las características del suelo como infiltración y el índice de escorrentía dando como resultado un caudal medio de oferta hídrica de 39.57 m³/s. Se determinó la demanda hídrica a través de los usos de agua para consumo humano, riego, abrevadero e industrial otorgados por la autoridad única del agua obteniendo como resultado un caudal de 15,77 m³/s. El modelamiento del balance hídrico dio como resultado un índice de *Nash Sutcliffe* de 0,674, el cual determina que el estudio es aceptable. El índice de escasez hídrico mediante la oferta y demanda hídrica dio como resultado un caudal medio de 23.8 m³/s, dando como resultado un superávit de agua a excepción de los meses de enero y febrero que obtuvieron un déficit de agua de -6.97 y -0.5 respectivamente. La microcuenca del río Ambi está sometida a presiones ecosistémicas como el cambio climático y presiones antrópicas como la demanda hídrica, lo que representa un problema a resolver para asegurar la dotación de recurso hídrico suficiente para mantener un funcionamiento ecosistémico adecuado y la consecución de las actividades antrópicas.

Palabras clave: Modelamiento Hidrológico; Cuenca Hidrográfica; Balance hídrico; Precipitación; Oferta hídrica; Demanda hídrica.

ABSTRACT

The dynamics of water resources are due to their natural cycle and to the anthropic pressures that have contributed to a latent concern about safe access both in quality and quantity for the achievement of the natural processes of ecosystems, as well as anthropic activities. This study aimed to quantitatively determine the application of the modeling of the water balance of the micro-basin of the Ambi River through the Hydrological Modeling System developed by the Hydrologic Engineering Center and the application of a model of transformation of precipitation into runoff. The parameters of the modeling were obtained through the water supply, with the precipitation data, Curve Number (CN) obtained according to the characteristics of the soil as infiltration and the runoff index resulting in an average flow of water supply of 39.57 m³/s. The water demand was determined through the uses of water for human consumption, irrigation, trough and industrial granted by the single water authority, resulting in a flow of 15.77 m³/s. Modeling the water balance resulted in a Nash Sutcliffe index of 0.674, which determines that the study is acceptable. The index of water scarcity through water supply and demand resulted in an average flow of 23.8 m³/s, resulting in a surplus of water except for the months of January and February which obtained a water deficit of -6.97 and -0.5 respectively. In conclusion, the micro-basin of the Ambi River is subject to ecosystem pressures such as climate change and anthropic pressures such as water demand, which represents a problem to be solved to ensure the provision of sufficient water resources to maintain an adequate ecosystem functioning and the achievement of anthropic activities.

Key words: Hidrologic Model; Hydrographic Basin; Hydric balance; Precipitation; Water demand; Water supply.

Capítulo I

Introducción

1.1. Revisión de antecedentes o estado del arte

La disponibilidad del recurso hídrico está relacionada con los procesos naturales que se originan en las cuencas hidrográficas, a través de la interacción entre los fenómenos naturales de precipitación y evaporación que se presentan a corto y largo plazo en sinergia con las características del suelo, vegetación y los cambios climáticos y meteorológicos, evidenciando la importancia para el abastecimiento de recurso hídrico en los cauces incluso en épocas secas y generando diversos servicios ambientales (Ordoñez, 2011; Mosquera et al., 2015; Sarango et al., 2019).

Se está evidenciando cambios profundos en el balance hídrico, el ciclo del carbono y los ecosistemas de la tierra, estas alteraciones están provocadas por los cambios simultáneos y rápidos a nivel global, por la temperatura de la superficie de la tierra, precipitaciones y cambios en la cobertura del uso del suelo (Aber et al., 2002).

Los sistemas hídricos de alta montaña y sus ecosistemas presentan sensibilidad a las presiones físicas, químicas y ambientales causadas por los cambios globales, y son identificados en diversos estudios respecto a la distribución de las especies, composiciones de comunidad y las tasas de crecimiento de la vegetación (Ramírez, 2015). Aunado, los procesos realizados por las actividades antrópicas distribuidas cerca de los ríos provocan cambios en el ciclo natural del agua (Aguirre, 2010; UICN, 2008), afectando la calidad y disminuyendo la disponibilidad de recurso hídrico, provocando una alta vulnerabilidad de la cuenca hidrográfica (Tapia, 2012; Wani et al., 2008).

El inevitable aumento demográfico y la explotación de los recursos hídricos para satisfacción de las necesidades de la población, ha generado la degradación de los recursos naturales. Se estima que todos los procesos productivos que se realiza en la cuenca ocasionan una disminución de los caudales llegando incluso a valores por

debajo del caudal ecológico, el cual es vital para todas las formas de vida presentes en la cuenca y sus actividades naturales (Ruiz, 2014). De esta forma, se identifica que las actividades antrópicas tales como las actividades productivas, fundamentales para el desarrollo socioeconómico de las regiones, la urbanización, la expansión de la agricultura, la contaminación, el cambio de la cobertura vegetal y del uso del suelo entre otras, provocan cambios significativos en los procesos del ciclo hidrológico a escala local y global (Videla, 2013; Montoya, 2014).

Se han realizado varios estudios en manejo de cuencas hidrográficas basados en fundamentos teóricos de los problemas, y se ha evidenciado que, en la aplicación práctica ha presentado varios inconvenientes. Generalmente, la mala planificación, manejo y gestión de la cuenca se evidencia en la ausencia del estado que no genera políticas, en el desinterés de las empresas que se encuentran en las cuencas altas y medias, desinterés de la población en general, nula presencia de los gobiernos descentralizados a la hora de exigir al gobierno central ayuda en la planificación de la cuenca, entre otros (Tapia, 2012).

El estudio de González et al. (2011) evidencia la afectación del recurso hídrico por los impactos del cambio global y la dinámica entre la demanda y oferta hídrica, así como las implicaciones que tiene los eventos de máximas crecidas de los ríos en épocas de alta precipitación y baja temperatura, así como los eventos extremos de sequía en las épocas de baja precipitación y alta temperatura, generando alta presión sobre el recurso hídrico (Hernando et al., 2012).

De esta forma se presenta la necesidad de investigar sobre los procesos del ciclo hidrológico, cambios en la morfología, extensión, calidad e inventario hídrico que son herramientas para determinar las características de las fuentes hídricas, y buscar el buen uso y control del agua con el fin de satisfacer las demandas antrópicas (consumo multifinalitario, humano, agrícola, energético, entre otros) (Ramírez, 2015).

Estos estudios se pueden realizar mediante modelos hidrológicos, representando de forma simplificada los sistemas hidrológicos reales, los cuales ayudaran a identificar las respuestas a eventos naturales o provocados por factores de origen antrópico (Ruiz, 2014).

Collado (2017) realiza el estudio tomando como información las características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica como son las pendientes y los procesos de erosión del cauce natural del río, así como los fenómenos de alta precipitación. Mientras que Estrada y Pacheco (2012), ratifican el uso de estas variables tanto físicos geográficas, climáticas y emplean información de estaciones hidrometeorológicas en cuencas montañosas orientales.

El modelamiento hidrológico ayuda a entender y comprender las respuestas de una cuenca hidrográfica a eventos de precipitación y que se transforman a escorrentía, simulando los procesos hidrológicos a través del uso de enfoques conceptuales y matemáticos ya establecidos (Gaspari et al., 2008). Además, estos modelos pueden emplear información a partir de datos de caudales con análisis estadístico de los valores máximos (García, 2013).

Para los estudios de modelamiento hidrológico, el Ejército de los Estados Unidos mediante el Centro de Ingeniería Hidrológica, ha diseñado un software denominado Sistema de Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS), empleando diversas metodologías de cálculo para la simulación de los sistemas hidrológicos (Urrutia, 2016). El sistema de modelamiento hidrológico simula hidrogramas de una cuenca o de varias subcuencas mediante eventos extremos de tormentas, también puede utilizar métodos de cálculo basados en hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y la conversión en escorrentía directa.

El trabajo con el software HEC - HMS se realiza mediante diferentes fases: 1.- Separación de lluvia neta (Calcula que parte de la precipitación va a producir escorrentía directa); 2.- Determina la escorrentía directa producida por esa precipitación neta; 3.- Suma la escorrentía directa con la escorrentía básica en el

caso que exista previamente y 4.- Calcula cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce, o mediante un depósito o embalse (tránsito de hidrogramas) (Scanlon et al., 2002). Por último, suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido de la cuenca hidrográfica y proporciona tablas y gráficos del hidrograma en la salida de la Cuenca (Carrera et al, 2017).

Hernando et al. (2012) mencionan que el país cuenta con información base sobre los fenómenos hidrometeorológicos permitiendo comprender la variación climática, sin embargo, esta información es demasiado abstracta debido a la falta de integración de variables propias de los sistemas hídricos y la dinámica de sus cauces, así como de condiciones de suelo y vegetación. Esta variabilidad climática en la actualidad presenta cambios sobre el comportamiento temporal y espacial de los parámetros hidrometeorológicos debido a los impactos del cambio climático, que se relaciona con eventos de épocas secas más marcadas y la falta de disponibilidad de recurso hídrico para solventar las necesidades naturales y antrópicas de las cuencas hidrológicas (Echeverría y Montoya, 2015).

El estudio realizado por Tapia (2012) utiliza la metodología para el modelamiento hidrológico de acuerdo con los parámetros físicos, geológicos, climáticos, hidrometeorológicos y los relaciona con las características del suelo y vegetación de las cuencas en estudio. Además, identifica el balance hídrico en las cuencas altoandinas del austro ecuatoriano empleando las variables antes mencionadas y la relación con los caudales y la evapotranspiración del sistema hídrico. Por otro lado, Ramírez (2015) se enfoca en la microcuenca del río Pitura y realiza una caracterización biofísica de la cuenca, determinando de esta forma la edafología, climatología e hidrología y su relación con factores antrópicos presente en la microcuenca y que obtuvo como resultado una baja disponibilidad del recurso hídrico.

Gómez (2019) sostiene que existe influencia en la generación de caudales de la microcuenca del río Chorlaví y la baja densidad poblacional de vegetación, para ello se enfoca en el estudio del flujo base que transcurre por la cuenca y las

características del uso del suelo, aplicando la metodología del servicio de conservación del suelo, empleando los Sistemas de Información Geográfica y el modelo hidrológico para estimar la disponibilidad del recurso hídrico al final de la cuenca. Determinó que los caudales varían de acuerdo con el área de la cuenca y de las presencia y ausencia de cobertura vegetal. Por otro lado, la investigación de Vera (2019) encontró similares resultados en la microcuenca del río Yanayacu, ya que evaluó la incidencia de la cobertura vegetal en la generación de caudales, obteniendo como resultado los días de máxima generación de caudales en época lluviosa, entre los meses de octubre a mayo, mientras que los días de mínima generación de caudales se presenta en la época seca, sin embargo, en ninguna de las dos investigaciones se evalúa al recurso hídrico y la estimación ponderada del caudal final respecto al uso del recurso hídrico para la ejecución de las actividades antrópicas que se realizan en la cuenca hidrográfica.

En la investigación realizada en la cuenca del río Ambi por Cabrera et al. (2017) se plantea la aplicabilidad del uso del software HEC-HMS como metodología para los estudios de las cuencas hidrográficas en el Ecuador, en donde se aplicó características geomorfológicas, edáficas, e hidrometeorológicas para determinar los caudales al final de la cuenca. Sin embargo, no se estima la cantidad de agua consumida por las actividades antrópicas en forma de demanda hídrica. Es así como la metodología es aplicable en microcuencas hidrográficas de la zona de los Andes ecuatorianos, y que presenten problemas con la falta de información base hidrometeorológica.

1.2. Problema de investigación y justificación

La zona de estudio de la microcuenca del río Ambi presenta zonas pobladas con un número significativo de pobladores distribuidos en los cantones de Otavalo, Cotacachi y Atuntaqui en donde se realizan actividades agrícolas, agropecuarias, minería, curtiembre, entre otras, produciendo impactos negativos para el recurso hídrico de la microcuenca del río Ambi. Debido al crecimiento socioeconómico que presenta la microcuenca hidrográfica se hace un uso inadecuado del agua para las

actividades antes mencionadas, las cuales no considera las épocas de sequía en donde el caudal hidrológico disminuye (Sánchez, 2010).

Es por esto, que es necesario cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico de la microcuenca hidrográfica del río Ambi por medio del balance hídrico. El comportamiento de los procesos hidrológicos y sus componentes como evaporación, precipitación, transpiración, intercepción, escurrimiento y otros procesos subsuperficiales, al igual que los cambios presentes en las cuencas hidrográficas, permiten determinar el grado de afectación, su dinámica y predecir las tendencias de cambio; esta información ayuda en la toma de decisiones y las planificaciones a corto, mediano y largo plazo en las cuencas hidrográficas (García, 2013).

El actual trabajo de investigación pretende determinar la disponibilidad de agua en la microcuenca del río Ambi mediante un balance hídrico tomando en cuenta la oferta y demanda del agua, con el objetivo de mantener la dinámica de las actividades antrópicas del sector y realizar una gestión adecuada del recurso hídrico y ayudar en la toma de decisiones y planificaciones a corto, mediano y largo plazo en la cuenca hidrográfica del río Ambi. Este estudio podrá servir como línea base para la elaboración de estrategias y políticas que promuevan la gestión integral de los recursos hídricos determinados en el Plan de Creación de Oportunidades del 2021 en su objetivo 11, con la finalidad de distribuir de forma equitativa el recurso hídrico en la microcuenca hidrológica (Secretaría Nacional de Planificación [SENPLADES], 2021).

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar el modelamiento del balance hídrico a través de la oferta y demanda de agua en la microcuenca del río Ambi.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar las entradas y salidas naturales del modelo hidrológico para la obtención de la oferta hídrica.
- Obtener la demanda del recurso hídrico en la microcuenca del río Ambi.
- Realizar el balance hídrico mediante un modelo hidrológico, incorporando la oferta y demanda de agua de la microcuenca.

1.4. Pregunta directriz de la investigación

¿Cuál es la disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Ambi considerando su distribución espacial y temporal?

Capítulo II

Revisión Literaria

2.1. Marco teórico referencial

La información que sustenta el análisis e interpretación del presente estudio de investigación se determina a continuación en el siguiente capítulo.

2.1.1 *Cuenca hidrográfica*

La cuenca hidrográfica es el área geográfica delimitada por las divisorias de agua o límites topográficos, y dentro de sus límites se producen los procesos naturales del ciclo hidrológico, formando completamente un sistema hídrico (Ordoñez, 2011). En la cuenca hidrográfica se presentan fenómenos de precipitación, que debido a sus características geomorfológicas se forma una red hídrica natural compuesta por los cauces naturales superficiales y subterráneos y que desembocan en un río principal (Ordoñez, 2011). Para Gaspari et al. (2008) las cuencas hidrográficas deben ser consideradas como unidades de planificación hidrográfica y territorial con el fin de gestionar un adecuado ordenamiento territorial y la gestión y manejo de recursos naturales, ya que los recursos hídricos no dependen de límites políticos, sino del tratamiento integrado de producción y protección a través de los elementos sociales, económicos y ambientales.

En la actualidad el concepto de cuenca hidrográfica abarca más allá de sus límites naturales y sus características biofísicas, agregándole las diferentes relaciones que se generan entre los recursos naturales y los habitantes de la Cuenca, que cambian de una Cuenca a otra por las condiciones físicas, biológicas económicas, sociales, y culturales particulares de cada una (Aguilar, 2007). Los componentes biofísicos biológicos y antropológicos que interrelacionan dentro de la Cuenca deben estar en equilibrio, ya que al afectarse uno de ellos pone en peligro todo el sistema (Ordoñez, 2011).

Aunando, la cuenca hidrográfica además de ser una fuente natural de captación de agua tiene una realidad social propia establecida por las relaciones económicas, culturales y políticas que se establecen entre los diferentes grupos sociales (Aguilar, 2007) y se ha transformado con sus componentes físico-geográficos, hidrológicos con las actividades antrópicas, en un sistema en donde interactúan en espacio y tiempo, siendo el recurso hídrico el eje integrador (González et al., 2011).

2.1.1.1 Tipos de cuencas

Para el estudio de las cuencas hidrográficas es necesario realizar una identificación de las características generales con el fin de comprender la dinámica con sus procesos naturales hidrológicos y meteorológicos, además, ayuda para el planteamiento de estrategias de manejo y gestión del recurso hídrico y demás cuidados ambientales (Gaspari et al., 2008). Las clasificaciones que se presentan a continuación determinan las condiciones y los parámetros como el valor de la curva número (CN), que se usan para los estudios de modelamiento hidrológico.

Según López (2014), la cuenca presenta tres delimitaciones bien definidas y sus procesos hídricos son diferentes, sin embargo, mantienen una estrecha interconexión e interrelación entre sí., esta clasificación se basa según la altitud (Faustino et al., 2006).

Esta clasificación se delimitada por las cotas altitudinales y se divide en cuenca alta, media y baja en donde se producirán los fenómenos de precipitación y temperatura y generación de sedimentos. Hay que diferenciar los procesos que se realizan en cada tipo de cuenca, en la cuenca alta se produce la recarga hídrica, mientras que la cuenca media sirve como tránsito del río principal el cual se encuentra bien definido, se realizan la mayor cantidad de actividades productivas, lo cual propicia una mayor presión en la demanda del recurso hídrico hacia la parte de la cuenca alta, también se caracteriza por ser una zona de amortiguamiento y transición entre las actividades de la cuenca alta y los impactos de la cuenca baja. La cuenca baja tiene el mayor caudal producto de la acumulación de la cuenca alta

y media, sin embargo, recibe el recurso hídrico con todas las presiones de la cuenca alta, además de acumular los sedimentos que se producen del proceso de erosión en la cuenca alta y media. Las cuencas bajas también se caracterizan por tener una formación en las zonas de llanuras o valles (Gaspari et al., 2008).

Para Aguirre (2007) las cuencas hidrográficas presentan varios criterios para su clasificación, uno de ellos se clasifica según el destino de drenaje. Esta clasificación tiene como finalidad determinar la dinámica del recurso hídrico según su desembocadura ya que los procesos naturales de los ríos serán diferentes, de esta forma, las cuencas exorreicas inician con la formación de recurso hídrico en las zonas altas de la cuenca, presenta almacenamiento de agua subterránea y tiene mayor incidencia en la presencia de precipitaciones, que se transforma en escorrentía superficial, las cuales seguirán su recorrido por las cuencas de continuación y finalmente buscan desembocar en el mar. Mientras que las cuencas endorreicas son de extensión limitada, y sus cauces no consiguen fluir a cuencas de continuación, desembocando en lagos o lagunas, además, sus características geológicas impiden tener salida subterránea y tampoco desembocadura al océano. Finalmente, las cuencas arreicas pueden determinarse dentro de las cuencas exorreicas y endorreicas, son las de menor extensión de área, su incidencia de temperatura y precipitación son máximas y mínimas respectivamente (Salazar, 2017).

Los asentamientos de poblaciones urbanas, en su mayoría están ubicadas en la cercanía de los cauces hídricos, mientras que las poblaciones rurales están asentadas en las partes altas de las cuencas, sin embargo, se realizan actividades antrópicas de comercio lo que ha propiciado la clasificación de cuencas hidrográficas según el uso (Aguirre, 2007). Las cuencas urbanas tienen una mayor presencia de asentamientos urbanos a lo largo de su extensión, mientras que una cuenca agrícola el uso del suelo de esta cuenca se lo dedica para actividades agrícolas, principal ingreso económico de los asentamientos de las poblaciones rurales., las cuencas forestales están alejadas de los asentamientos de población y mantiene una alta presencia de vegetación primaria forestal y arbustiva., las cuencas hidrográficas de

uso múltiple se interrelacionan entre asentamientos urbanos, actividades agrícolas y presencia de vegetaciones forestales, sin embargo, las vegetaciones forestales en estas cuencas ya no son de origen primario, de hecho, la presencia de vegetación forestal se emplea como una actividad económica más (Gaspari et al., 2008).

Los fenómenos de precipitación y temperatura en relación con la cobertura vegetal propician condiciones naturales hidrometeorológicas que serán características fundamentales del tipo de cuenca según el clima (Aguirre, 2007). Las cuencas de zonas húmedas presentan una mayor vegetación lo cual condiciona a la retención del rocío y de la evaporación de agua, sin embargo, también presenta como característica de esta cuenca procesos erosivos altos., mientras que las cuencas de zonas secas disminuyen de forma significativa en la presencia de vegetación, baja precipitación y alta presencia de temperatura lo cual agrava el proceso de retención de la evapotranspiración (Tapia, 2012).

La clasificación según el área es la de mayor interés, ya que permite estudiar los procesos naturales hidrometeorológicos de forma general y específica., el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Agua y Suelos (CIDIAT) propone la siguiente clasificación (Faustino et al., 2006):

- **Sistema hidrográfico**

Es el área de mayor extensión, que presenta un territorio natural mayor a 300 000 ha, está conformada por una red hidrológica que componen varias cuencas hidrográficas (Faustino et al., 2006).

- **Cuenca**

Su área está comprendida entre 60 000 ha hasta 300 000 ha de superficie, donde el caudal formado de la precipitación puede transitar, entre cuencas de forma superficial y/o subterránea, hasta desembocar en el río principal del sistema hidrográfico (Gaspari et al., 2008).

- **Subcuenca**

Su territorio comprende un área entre 10 000ha hasta 60 000 ha, en donde el comportamiento hídrico generalmente se basa en captar el agua producida por la vegetación y de los eventos de precipitación que generan los escurrimientos superficiales o subterráneos y los conduce hasta desembocar en el cauce principal de una cuenca (Aguirre, 2007).

- **Microcuenca**

Presenta un área menor a 1000 ha, en este territorio se presenta una red de drenaje de primer y segundo orden, conduciendo y transitando los caudales de menor volumen, consecuentemente la desembocadura de los caudales formados por varias microcuencas dará como resultado la formación de redes de drenaje de segundo y tercer orden, propicias de una subcuenca (Gaspari et al., 2008).

Según Aguirre (2007) para el Ecuador se puede usar una diferente clasificación de cuencas hidrográficas según su superficie de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. *Clasificación de la microcuenca según su área*

Tamaño del sistema hídrico (ha)	Descripción
>300000	Sistema Hidrográfico
100000-300000	Cuenca
15000-100000	Subcuenca
4000-15000	Microcuenca
<4000	Minicuenca-

Fuente: Aguirre, 2007

2.1.1.2 Características geomorfológicas

Para Tapia (2012) las características fisiográficas dan una idea de las propiedades particulares que posee la cuenca y pueden ser explicadas a partir de ciertos parámetros o constantes, que se obtienen del procesamiento de la información cartográfica y conocimientos de la topografía de la zona de estudio. La cuenca considerada como unidad dinámica natural, es un sistema hidrológico en el que se

reflejan acciones bilaterales entre parámetros y variables. Los parámetros que determinan a la cuenca hidrográfica permanecen constantes en el tiempo y permiten explicar las características físico morfométricas de las cuencas hidrográficas, y que complementan los estudios hidrológicos (Gaspari et al., 2008) estos parámetros están divididos así:

- **Parámetros de forma**

Para Cardona (2012) la determinación de una cuenca hidrográfica tiene una fuerte relación probabilística entre los parámetros de forma y las características de la red de drenaje, además relaciona a cuencas de la misma área y distinta forma con la generación de hidrogramas diferentes. Es así como la forma de la cuenca determina la velocidad del escurrimiento superficial, y presenta diferente comportamiento hidrológico. Estos parámetros permiten conocer información para comparar la forma de la cuenca con figuras geométricas conocidas y también permite comparar estos resultados de las mediciones, en su mayoría son adimensionales, con los obtenidos en otras cuencas que presentan información histórica del comportamiento hidrológico. Los principales parámetros de forma son el área, perímetro, longitud, ancho promedio, factor de forma y coeficiente de Gravelius (Cardona, 2012).

- a. **Área**

Este parámetro permite definir el tamaño de la cuenca e influye en mayor o menor grado en el aporte de escorrentía, además ayuda a comprender la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía superficial o subterráneo y que desembocará en un cauce natural (Gaspari et al., 2008). Está delimitada por la divisoria de aguas y se expresa en km^2 (Burbano, 2006).

- b. **Perímetro**

Es el que define los límites de la cuenca que recorre por todas las divisorias de agua o periferia de una cuenca hidrológica, obteniendo la magnitud del polígono de la cuenca expresado normalmente en metros o kilómetros (Gaspari et al., 2008).

c. Longitud

La longitud de una cuenca hidrográfica determina la distancia horizontal desde la cota más alta de la cuenca en donde inicia el proceso de escorrentía superficial hacia su desembocadura, en otras palabras, es la distancia media desde la cota más alta de la cuenca hasta el desagüe, (Ramírez, 2015; Morad y Triviño, 2001).

d. Ancho promedio (Ap)

Permite realizar una comprobación de la relación existente entre la longitud y la superficie de drenaje del sistema de escorrentía de una cuenca hidrológica (Cardona, 2012).

e. Factor de forma (IF)

Este parámetro identifica cuan cuadra o alargada es una cuenca hidrográfica, además simplifica la forma que posee una cuenca hidrológica en una forma geométrica y ayuda con la evaluación de la velocidad que presentan los flujos hídricos hasta llegar al cauce principal (Beltrán, 2010). Si una cuenca presenta un factor de forma bajo, es menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma. Su evaluación está dada por la relación en donde, si IF es igual a 1, entonces la cuenca tiene una forma redondeada la cual la hace susceptible a inundaciones, si IF es menor a 1, se puede interpretar a la cuenca como una forma geométrica plana haciéndola menos susceptible a inundaciones (Ramírez, 2015).

f. Coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

Este parámetro permite describir la geometría de la cuenca y presenta relación con el tiempo de concentración del sistema hidrológico, es decir la relación que se presenta está ligada al perímetro de la cuenca y de un círculo de igual área que la cuenca de estudio, este coeficiente es adimensional, sin embargo, nunca se presentará menor a 1 (Gaspari et al, 2008). Mientras el coeficiente se acerque a la unidad, la cuenca tendrá una tendencia a concentrar fuertes volúmenes de caudal (Mora et al., 2009).

- **Parámetros de relieve**

Las cuencas hidrológicas presentan en su formación características geológicas hidrológicas y geomorfológicas, por ende, la dinámica de la cuenca tiene relación con el relieve, ya que este parámetro tiene una mayor influencia sobre la respuesta hidrológica que su forma. Generalmente, se puede mencionar que, a mayor relieve o pendiente la presencia de escorrentías tiene una menor duración de concentración en la red hídrica (Cardona, 2012 y Ibáñez et al., 2010)., sin embargo, para conocer a profundidad la dinámica de la cuenca en base a la pendiente, se debe determinar los parámetros de altura y la pendiente medias de la cuenca (Sm).

- a. Curva hipsométrica:**

Este parámetro muestra porcentaje diarias de la cuenta sobre una cota determinada, representa la superficie drenada de acuerdo con la altura (Ordoñez, 2011). Además, permite apreciar las etapas de una Cuenca y de acuerdo con este criterio permite determinar los procesos erosivos o sedimentarios a la que está susceptible (Aguirre, 2007).

- b. Altura media (h)**

Este parámetro expresa el promedio definido entre el volumen de la cuenca y la relación con la superficie de esta (Gaspari et al., 2008). Por otro lado, Ibáñez et al. (2010) mencionan que la altura tiene una correlación negativa con la temperatura, es decir que a mayor altura se presenta una menor temperatura y viceversa, esta característica es propicia para la formación de los microclimas en toda la cuenca hidrográfica.

- c. Pendiente media de la cuenca (Sm)**

Permite determinar la velocidad media de escorrentía tomando en cuenta el promedio de todas las pendientes de las superficies elementales de una cuenca y por ende la capacidad de arrastre o de erosión de la cuenca (Ibáñez et al., 2010).

- **Parámetros de la red de drenaje**

Estos parámetros son los que permiten evaluar estrictamente la morfología y dinámica de los ríos y que interactúan entre el flujo y los materiales erosionables de los cauces hídricos. Para Ibáñez et al. (2010) el flujo de agua en toda la red de drenaje está sometida a la gravedad y la pendiente de la cuenca, mientras que la fuerza que se opone a este movimiento está dada por las características geomorfológicas en toda el área del sistema hídrico.

Gutiérrez (2008) menciona que el primer movimiento se estudia como régimen laminar, en donde el agua fluye a una velocidad muy pequeña y el contacto con el lecho del río es prácticamente imperceptible y los flujos laminares se desplazan entre sí, mientras que el segundo movimiento es conocido como régimen turbulento, y corresponde a velocidades mayores generando movimientos caóticos ya que la capacidad erosiva del flujo es mayor.

- a. Número de orden de los cauces**

Este parámetro permite conocer sobre el desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca, en donde la confluencia de segmentos iniciales de la red hídrica, forman un nuevo segmento y por ende un nuevo orden (Gutiérrez, 2008).

Gaspari et al. (2008) menciona que el criterio para determinar los órdenes de la microcuenca son los siguientes: los ríos de primer orden son aquellos que generalmente inician con el recorrido del agua, es decir que no tienen cauces que los alimenten., por otro lado, los ríos de segundo orden resultan de la unión de dos ríos anteriores con un mismo orden o dos ríos de orden diferente., y los ríos de tercer, cuarto y quinto orden cumplen con el mismo criterio anterior.

- b. Densidad de drenaje**

En la cuenca hidrográfica, la relación de la pendiente con las características edáfica y geológicas de los cauces dan como resultado la formación de sedimentos,

por lo que incurrirá a tener una mayor o menor densidad del drenaje, lo que determinará el grado de erosión de la cuenca (Beltrán, 2010).

c. Pendiente media de un cauce (Pc)

Es el promedio de inclinación del cauce principal de la cuenca, el cual esta expresado entre la cota máxima menos la cota mínima y dividida por la longitud total del río (Ibáñez et al., 2010).

d. Tiempo de concentración (Tc)

Es el tiempo que le toma a la escorrentía viajar desde el punto más lejano hasta el punto de descarga en el río de la cuenca. El tiempo de concentración está relacionado entre el volumen máximo y el tiempo de recesión de la cuenca, de acuerdo con este criterio se estima que los tiempos de concentración muy cortos tienen volúmenes máximos intensos y recesiones muy rápidas, en cambio los tiempos de concentración más largos determinan el volumen máximo más atenuado y recesiones mucho más sostenidas (Gutiérrez, 2008).

e. Tiempo de retardo (Tr)

Se presenta como el tiempo que transcurre desde el centro de gravedad del hietograma de precipitaciones hasta el centro de gravedad del Hidrograma de caudales. El tiempo de retardo se relación en una proporción del 60% del tiempo de concentración (Ramírez, 2015).

2.1.2. Oferta hídrica de cuencas hidrográficas

El estudio hidrológico de una cuenca debe iniciar comprendiendo el movimiento del agua conocido como ciclo hidrológico. Este estudio crea un diagnóstico fundamental para todo análisis de una unidad hidrológica (Neitsch et al., 2002). El ciclo hidrológico está compuesto por procesos continuos e interdependientes de movimientos y transferencia de agua entre la atmósfera, la tierra y los cuerpos hídricos. La precipitación como primer proceso es captado por la vegetación, cae

en cuerpos de agua y también cae en áreas de tierra, que según las características físicas del suelo se infiltra o se escurre superficialmente (Tapia, 2012).

Luego del fenómeno de precipitación continua con el proceso de infiltración, donde una porción es almacenada por el suelo y que depende de su porosidad. Con la capacidad de almacenamiento completamente saturada, el agua se transforma en escorrentía superficial; una cantidad se transforma en flujo subsuperficial y el resto alimenta a los acuíferos profundos mediante la percolación del agua retenida por el suelo, sin embargo, tanto el agua subsuperficial como el agua de los acuíferos presentan continuidad horizontal y se transforman en escorrentía superficial y subterránea cuya descarga se realizará en un río o el mar (Erasum et al., 2019).

La oferta hídrica es importante para la ejecución de los procesos naturales y de las actividades antrópicas, ya que es el volumen de agua total producto de las entradas y salidas naturales del agua en la cuenca hidrográfica. La principal entrada de agua al sistema hídrico es la precipitación, mientras que las salidas naturales del agua del sistema hídrico son generadas principalmente por la evapotranspiración e infiltración y que están determinadas por el suelo y la cobertura vegetal (Díaz y Alarcón, 2018).

Las principales entradas naturales de agua al sistema hídrico están sujetas por parámetros climáticos como la precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, entre otros, con los cuales se almacenará el agua de forma superficial y subterránea. Las salidas naturales del agua están determinadas principalmente por el proceso de evapotranspiración que se obtiene a través de la temperatura, el tipo de suelo y la cobertura vegetal, además, otra salida de agua importante del sistema es a través de la escorrentía subterránea (IDEAM, 2010).

El proceso para determinar el volumen de agua se basa en la transformación de precipitación en escorrentía, que se determina a través del coeficiente de escorrentía, y que está dado por la capacidad de almacenamiento de la cuenca (Díaz y Alarcón, 2018).

2.1.2.1. Precipitación - escorrentía

La relación que existe entre la precipitación y la escorrentía, de acuerdo con el ciclo hidrológico, se la puede definir como la precipitación pluvial que se genera en una cuenca hidrológica y se transforma en agua superficial y subsuperficial, la cual es drenada hacia los cauces de los ríos (Breña, 2008).

La escorrentía es producto del escurrimiento que generalmente se clasifican en: precipitación directa sobre el cauce, flujo subsuperficial, flujo base y escurrimiento directo. El proceso de escurrimiento genera comúnmente variables como la intensidad de la precipitación, capacidad de infiltración de la superficie de la cuenca y las condiciones y características hidráulicas particulares del suelo o roca. La relación entre estas variables genera información sobre los procesos hidrológicos que se encuentran bajo diferentes condiciones (Medina et al, 2010).

2.1.2.2. Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores como el tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), de su cantidad, de su intensidad y distribución en el tiempo, de la humedad inicial del suelo, del tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación pendiente, micro relieve, rugosidad), del tipo de cobertura vegetal existente. Hay que tomar en cuenta que los valores de escorrentía oscilan entre cero y uno, y es una de las variables que caracteriza el escurrimiento (Tapia, 2012).

2.1.2.3. Evapotranspiración (ETP)

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación, que es el proceso físico por el cual el agua en estado líquido pasa a vapor en la atmósfera, por otra parte, mediante transpiración del cultivo, que es el proceso biológico por el cual las plantas pierden agua a la atmósfera. Esta se produce desde los componentes superficiales tanto de vegetación, suelo y agua. Existe dos métodos

para la determinación de la ETP, método medición o directos y los métodos de estimación o indirectos (Gaspari et al., 2008).

2.1.3. Demanda hídrica en cuencas hidrográficas

La demanda hídrica se fundamenta en el uso consuntivo y no consuntivo de agua en las cuencas hidrológicas (Mejía et al., 2015). Se determina a través de la información espacial que muestra la cantidad de agua usada para atender los diferentes sectores económicos y a la población en general (IDEAM, 2010). Se considera el volumen total de consumo de agua para la satisfacción de las actividades antrópicas (CORANTOQUIA, 2004). El uso de agua para satisfacción de las actividades antrópicas se divide en consumo humano, domestico, riego, industrial, abrevadero para animales, piscícola y recreativo (LORHUYAA, 2014).

El cálculo general de la demanda hídrica se establece a partir de las concesiones de aguas otorgadas por la autoridad única del agua, sin embargo, se puede estimar a través de la identificación de la población y el caudal en litros por habitante y por día necesarios para el cumplimiento de las actividades antrópicas. Los principales usos del agua en las cuencas hidrográficas se pueden establecer a través de la siguiente clasificación (Aguirre, 2007).

2.1.3.1. Uso doméstico y consumo humano

El agua es utilizada para realizar las actividades diarias, el uso de agua para consumo humano se destina para alimentación, bebida e higiene corporal., mientras que el uso doméstico del agua se enfoca para fabricar o procesar alimentos en general, fabricar medicamentos, cosméticos y sustancias generales, además se usa para la higiene de establecimientos entre otras. Este sector de consumo depende de las condiciones socioeconómicas de la población, de las características climáticas de la zona, pérdidas y desperdicios, entre otros (Rojas, 2002).

2.1.3.2. Uso industrial

En este grupo el uso de agua se emplea en el sector de bienes y servicios cómo es la producción masiva de alimentos y bebidas, la generación de electricidad, plantas industriales para embotellamiento de agua (CORANTOQUIA, 2004).

2.1.3.3. Uso para riego

En esta sección se divide el uso de riego como soberanía alimentaria y el uso para actividades industriales, sin embargo, se toma como un solo uso. Para Rojas (2002), la estimación de la demanda hídrica en las plantas está determinado por el requerimiento específico de agua para su crecimiento y desarrollo. La cantidad de agua está en función de varios parámetros, como las condiciones climáticas de la cuenca hidrográfica establecidas en la evapotranspiración (temperatura, humedad del aire, viento en intensidad de la radiación solar), características de la cobertura vegetal y la disponibilidad de agua en el suelo para cumplir con las necesidades hídricas de la planta (transpiración y nutrición) (Aguirre, 2007).

2.1.3.4. Uso para abrevadero

Es el suministro de agua necesario para realizar todas las actividades relacionadas a la crianza y cuidado de los animales.

En el Ecuador el uso de agua para atender a los sectores económicos y a la población se controla a través de autorizaciones de uso de agua emitidas mediante la autoridad única del agua y que, según la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento de Agua, (2014) normativa vigente que regula el recurso hídrico se clasifican en:

a) *Por su naturaleza:*

- Autorizaciones para uso de agua.
- Autorizaciones para el aprovechamiento productivo del agua.

b) *Por su duración:*

- Autorizaciones para consumo humano.

- Autorización para riego, acuicultura y abrevadero de animales para garantizar la soberanía alimentaria.
- Autorizaciones de plazo determinado para actividades productivas no consideradas en la soberanía alimentaria.
- Autorizaciones ocasionales otorgadas por un plazo no mayor de dos años no renovables, sobre recursos sobrantes o remanentes.

Para la determinación de la demanda hídrica de una cuenca en la mayoría de los estudios se realiza mediante los análisis de demanda de los diferentes sectores tanto de consumo humano, riego, abrevadero y usos productivos (Núñez, 2011).

2.1.4. Balance hídrico en cuencas hidrográficas

El balance hídrico es una ecuación en donde interviene la oferta y demanda hídrica entendidos como entradas y salidas de agua de un sistema. Es decir, el concepto de un balance hídrico se basa en el equilibrio entre toda el agua que entra y sale del sistema en un determinado intervalo de tiempo.

Existen diversos métodos de calcular el balance hídrico de una cuenca hidrográfica y entre los más destacados están los que se realizan a través de modelos hidrológicos.

2.1.4.1. Modelos hidrológicos

Se los puede definir como la representación particular de un sistema las cuales engloba las interrelaciones y respuestas de las condiciones reales de un sistema hídrico, y que efectúa pronósticos a través de un conjunto de condiciones planteadas. Urrutia (2016) menciona que un modelo es una representación simplificada de fenómenos hidrológicos naturales que están presentes en el ciclo del agua las cuales se las puede denotar como un acercamiento a la realidad generando un cierto grado de confianza (Meneses, 2017). Esta herramienta ayuda a gestionar y planificar tanto la calidad y disponibilidad del agua como de distintos tipos de manejo del suelo, ya que puede representar escenarios pasados, actuales y realizar simulaciones de escenarios futuros a partir de condiciones actuales.

Para realizar un modelamiento hidrológico se necesita de variables como la calibración de datos con valores observados, la simulación de valores antrópicos en el uso de suelo, tipo de cobertura vegetal, factores climáticos de inundación, sequía y cambio climático (Andrews, 1972). La aplicación de los sistemas geográficos actualmente permite el avance de la hidrología mediante el estudio de modelos hidrológicos, como son los físicos, en los cuales se representa a escala real la cuenca y matemáticos que aplican ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta hidrológica de la cuenca (Gaspari et al., 2008).

Además, existen softwares que emplean diversos métodos de estimación del balance hídrico de una cuenca hidrográfica en donde según cada modelo empleado se determinan las variables necesarias que se necesitara para el correcto funcionamiento.

2.1.4.2. Modelamiento mediante HEC HMS

El sistema de modelamiento hidrológico (HEC-HMS) es un producto del Centro de Ingeniería Hidrológica realizado por el Cuerpo de Ingeniería del Ejército de Estados Unidos. El programa se desarrolló a partir de 1992 y puede utilizar simulaciones de esorrentía y herramientas suplementarias de análisis que proveen de estimación de parámetros, análisis de profundidad de área, predicción de flujo, transporte de sedimentos, erosión y calidad de nutrientes en el agua.

Entre los métodos más importantes utilizados por HEC-HMS están los métodos de presencia de vegetación que representan las plantas presentes en el terreno, que considera la interpretación de precipitación que puede ocurrir y del proceso de evapotranspiración propia de la vegetación. Por otra parte, está el método de pérdida que representa diferentes cálculos de la pérdida de agua por medio de la infiltración dentro del área de una microcuenca, y el método de flujos base, interacciona y calcula los flujos subsuperficiales (Fleming y Doan, 2009).

El software HEC-HMS trabaja a través de la división de una cuenca en varias microcuencas hidrográficas diferentes. Se construye un modelo de cuenca hidrográfica separando el ciclo hidrológico en piezas manejables y construyendo límites alrededor de la cuenca hidrográfica de interés y así determina la oferta y demanda hídrica de cada microcuenca Scanlon et al. (2002). Cualquier flujo de masa o energía en el ciclo puede representarse con un modelo matemático dentro del software, los cuales están incluidos en el programa y cada modelo puede aplicarse para diferentes entornos y bajo diferentes condiciones (López et al., 2012). Los componentes empleados en el software HEC-HMS, según Tapia (2012), son:

a. Modelo de la cuenca

Se ingresa información de las distintas microcuencas, características, método empleado para la obtención del hidrograma, número curva y el tiempo de retraso, todos estos parámetros representan físicamente a una cuenca hidrográfica.

b. Modelos meteorológicos

Realiza el cálculo de precipitación requerida por las microcuencas. El software utiliza datos puntuales o en malla y puede modelar lluvia y evapotranspiración.

c. Especificaciones de control

Aquí se determina el tiempo de simulación, y las especificaciones de fecha y hora de inicio y fin de lluvia en el intervalo de tiempo asignado por el usuario.

d. Datos de entrada

Es la información necesaria para el modelamiento, en base al método de cálculo del modelo. Existen cinco grupos de información como precipitación histórica o de diseño, características del suelo, información morfométrica de las microcuencas, datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía y las características hidráulicas de los tramos de canal.

Para el cálculo del modelo hidrológico, el software HEC-HMS tiene la posibilidad de utilizar el modelo de pérdidas con 8 métodos y el modelo de flujo base con 2 métodos. Para cualquiera de las dos metodologías, la base del modelo es

la simulación del hidrograma de escorrentía que se produce en una red pluvial como consecuencia de una precipitación.

Los componentes del programa se basan en relaciones matemáticas que intentan representar los procesos de generación del hidrograma de escorrentía para lo cual utiliza 4 módulos: pérdidas, transformación, flujo base y tránsito de flujo, estos métodos se muestran en la Tabla 2 (Arias, 2015).

Tabla 2. *Métodos y parámetros para la determinación del modelo hidrológico*

Pérdidas	Transformación lluvia neta con escurrimiento	Flujo base	Tránsito avenidas por el cauce
Déficit y tasa constante DC	Onda cinemática	Recesión restringida	Modelo lag
Inicial y tasa constante	ModClark	Recesión	Puls modificado
Exponencial	HU CSC	Constante mensual	
Número de curva CN SCS	HU Snyder	Depósito inicial	Muskingum
Consideración de la humedad del suelo (SMA)	HU especificado por el usuario		Muskingum Cunge
DC por celdas	Hidrograma del S del usuario		onda cinemática
CN SCS por celdas	Hidrograma unitario Hu de Clark		Straddle stagger.
SMA por celdas			

Fuente: (López et al., 2012)

El software HEC-HMS tiene la característica de adaptarse según la información base de las cuencas hidrográficas (Betancourt y Garnica, 2017), por ello se ha identificado el modelo y método que se ajusta a la información que se tiene de las cuencas hidrográficas alto andinas de las regiones occidentales del Ecuador.

a. Modelo de pérdidas - método de pérdida SCS *curve number*

Mediante el método de la SCS *curve number* se puede calcular las pérdidas de precipitación inicial y tasa constante de una tormenta. La cual se basa en las características de drenaje de grupos de suelos registrados por el SCS.

El software transforma una parte de la precipitación total en escorrentía directa y otra parte en pérdidas. Este modelo presenta 8 métodos que se puede aplicar en el software HEC-HMS, el más utilizado es el número curva CN (SCS) por tener información de uso y tipo de suelo (López et al., 2012).

Los parámetros que se utiliza por el método de pérdida del número curva empiezan por la abstracción inicial, la impermeabilidad del suelo y el número curva, el cual varía en el rango de 0-100 de acuerdo con los factores que determinan la generación de escorrentía. Este método interpreta el proceso hidrológico que se presenta durante un periodo de lluvias sin tomar en cuenta la pendiente de esta (Arias, 2015).

b. Modelo de flujo base. Método de recesión

Para determinar el flujo base de acuerdo con el método de pérdidas, el HEC-HMS facilita el cálculo mediante el método de Recesión, el cual fue diseñado para simular el comportamiento del caudal usando los parámetros del caudal inicial al empezar el periodo de cálculo (Descarga Inicial), la disminución del caudal base cada día (constante de recesión) y el caudal pico en porcentaje (Ratio) (Sánchez, 2008).

2.1.4.3. Pruebas estadísticas

Con el fin de conocer la significancia entre las variables utilizadas para los estudios se utilizan pruebas estadísticas, las cuales pueden ser paramétricas y no paramétricas, para identificar el grado de aceptación de las variables se puede cumplir varios supuestos (Gaspari et al., 2008).

Para determinar la validación de un modelo hidrológico, se puede emplear el error cuadrático medio (RMSE), el cual cuantifica la desviación de los valores

simulados respecto a los observados. Por otra parte, *Nash-Sutcliffe* mide cuan bien se ajusta a la recta en el Figura de valores observados vs. valores simulados (Zhong y Dutta, 2015).

2.2. Marco legal

La Constitución de la República del Ecuador en su Art. 425 menciona la jerarquización de la siguiente forma: la Constitución; los tratados y convenios internacionales; las leyes orgánicas; las leyes ordinarias; las normas regionales y las ordenanzas distritales; los decretos y reglamentos; las ordenanzas; los acuerdos y las resoluciones; y los demás actos y decisiones de los poderes públicos.

El presente trabajo se enmarcó en la normativa legal que rige en el Ecuador y tomando en cuenta que, el recurso hídrico es el elemento esencial para la vida y el acceso de la población al agua sin discriminación alguna están enmarcadas en los artículos 1y 12 de la Constitución de la República del Ecuador del 2008. Además, la Constitución asegura un ambiente sano para la población y su salud vinculado al ejercicio con los derechos al agua los cuales se determinan en los artículos 15, 32 y 36.

2.2.1. Constitución de la República del Ecuador

La Constitución en la sección agua trata sobre la conservación del recurso hídrico en todas sus formas presentes en el ecosistema, como se puede observar a continuación (Constitución de la Republica del Ecuador, 2008):

Los elementos constitutivos del estado ecuatoriano establecen los principios fundamentales como se menciona en el Art. 3, sobre los deberes primordiales el estado, en el cual se establece en el inciso 1, la garantía sobre el goce del derecho al acceso al agua. Establece que el estado asegura el acceso al agua, el cual es un derecho humano fundamental e irrenunciable como se menciona en el Art. 12 y Art. 66 inciso 2.

Mientras que en los Art. 281 y Art. 282, para la subsistencia de la población en espacio y tiempo, el estado promoverá políticas que redistribuyan el acceso al agua

y regulará el uso y manejo de este. El recurso hídrico se considera como un sector estratégico por la trascendencia y magnitud que tiene sobre la influencia económica, social, política y ambiental para el pleno desarrollo de los derechos e intereses de la población establecidos en el Capítulo Quinto sobre los sectores estratégicos. Por lo cual se evidencia la importancia de la información sobre la cantidad y calidad del agua determinados en los Art. 313 – Art. 318.

Sobre la biodiversidad y recursos naturales que están contemplados en el capítulo segundo de la carta magna, en la sección sexta sobre el agua, el estado establece la garantía sobre la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos y cuencas hidrográficas asociadas al ciclo hidrológico como se establece en el Art. 411.

2.2.2 Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo

En 1992 se llevó a cabo la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo que se llevó a cabo en Brasil, en la ciudad del Rio de Janeiro, es una de las convenciones que marcó un hito respecto a al desarrollo sostenible y en especial de la gestión ambiental. En esta conferencia se elaboró un informe con la declaración internacional sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en donde se establecieron 27 principios, sin embargo para el presente estudio se toma como referencia el Principio 10 que invita a ser participe en el cuidado del ambiente a través del acceso a la información y del Principio 15 que hace referencia a la importancia de los estudios sobre el medio ambiente con el fin de buscar soluciones para la protección contra la degradación de los ecosistemas (ONU, 1992).

2.2.3 Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025

Los cambios de uso de suelo, las actividades económicas para el desarrollo de la sociedad ecuatoriana, cambio climático, uso irresponsable del agua y demás presiones antrópicas hadado como resultado el incremento de la demanda de agua (Usos y Aprovechamientos) frente a la disminución de la oferta (fuentes de agua),

por lo cual, el Plan de Creación de Oportunidades busca el manejo y gestión de los recursos hídricos en el objetivo 13 (SENPLADES, 2021).

2.2.4 Código Orgánico del Ambiente (COA)

El nuevo Código Orgánico del Ambiente (COA, 2019) que se implementó en el Ecuador mediante Registro Oficial N.º 983 - suplemento del 12-04-2017 tiene como fin garantizar a las personas vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como proteger los derechos de la naturaleza, cuyo cumplimiento es obligatorio por parte de los entes públicos, privados o naturales, siendo los artículos más importantes los siguientes:

El Art. 3 numeral 4, 7 y 8 y Art. 6 incentivan mecanismos e instrumentos para la restauración de los ecosistemas, servicios ambientales y recursos naturales; por medio de la prevención, minimización, control y participación frente a los impactos ambientales, y fortaleciendo los derechos de la naturaleza presentes en la Carta Magna.

Dentro del Art. 30 se establecen objetivos estatales, y en el inciso 7 se enfoca en la conservación y el uso sostenible de cuencas hidrográficas y de los recursos hídricos. Por otro lado, el Art. 38 sobre los objetivos de las áreas naturales en el inciso 5 establece mantener la dinámica hidrológica de las cuencas hidrográficas y protección de los cuerpos hídricos superficiales como subterráneos.

2.2.5 Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía y Descentralización (COOTAD)

El Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía y Descentralización (COOTAD) del año 2010, menciona en el Art. 32 las competencias exclusivas de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD's) en su inciso b, Gestionar el ordenamiento de cuencas hidrográficas y propiciar la creación de consejos de cuencas hidrográficas, ratificando la importancia del presente trabajo de titulación,

ya que necesita del levantamiento de información que ayude a la implementación de un plan de manejo de cuencas.

En el Art. 111 determina al recurso hídrico como un sector estratégico que compete a las autoridades y población en general a la conservación y protección. Mientras que el Art. 132 y Art. 136, establece las competencias sobre la gestión y manejo de las cuencas hidrográficas, así como el uso del recurso hídrico, incentivando a la planificación a través de regulaciones técnicas, para asegurar el acceso al agua de la población y de los ecosistemas como se establece en el Art. 137.

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

En esta ley se establece los criterios de conservación, restauración y protección del recurso hídrico, así como la reglamentación para el uso del agua con el fin de asegurar el acceso al recurso hídrico para satisfacer las necesidades de subsistencia tanto para la naturaleza como para las actividades antrópicas.

La ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua toma como un derecho de la naturaleza el acceso al recurso hídrico para el soporte de todas las formas de vida. El presente trabajo se fundamentó en el Art. 64 en el cual menciona que la naturaleza o Pacha Mama tiene derecho a la conservación del agua con todas sus propiedades como soporte esencial para todas las formas de vida (LORHUAA, 2014).

Capítulo III

Metodología

3.1. Descripción del área de estudio

En la estructura de la cuenca del río Mira se encuentra la subcuenca del río Ambi, la cual se divide en dos microcuencas principales, al oeste la microcuenca del río Ambi y al este la microcuenca del río Tahuando. Para efecto del presente estudio se optó por la microcuenca del río Ambi ya que no se ha realizado investigaciones sobre la dinámica del ciclo hidrológico de esta microcuenca (Carrera et al., 2017).

La microcuenca del río Ambi está ubicada en el centro sur de la provincia de Imbabura en la zona noroccidental del Ecuador (Figura 1), formando parte de la Cordillera Occidental. Limita al Norte con la subcuenca del río Mira; al Sur y Oeste con la cuenca del río Esmeralda y al Este con la microcuenca del río Tahuando. Tienen áreas de influencia en cuatro cantones de la provincia de Imbabura, estos cantones según el censo realizado en el año 2010 cuentan con una población así: El cantón Otavalo con una población total de 90 188 habitantes, cantón Cotacachi con una población de 37 215 habitantes, cantón Antonio Ante con una población de 36 053 habitantes y el cantón San Miguel de Urcuquí con una población de 14 381 habitantes.

Según las condiciones naturales y factores antrópicos presentes en la microcuenca del río Ambi presenta características de uso múltiple. En la zona de la cuenca alta presenta ecosistemas tipo páramo y bosques altoandinos, mientras que en la cuenca media se caracteriza por la presencia de ecosistemas con vegetación forestal siempre verde y en la cuenca baja cuenta con presencia de ecosistemas tipo bosques secos y matorrales (Andre y Piedra, 2017).

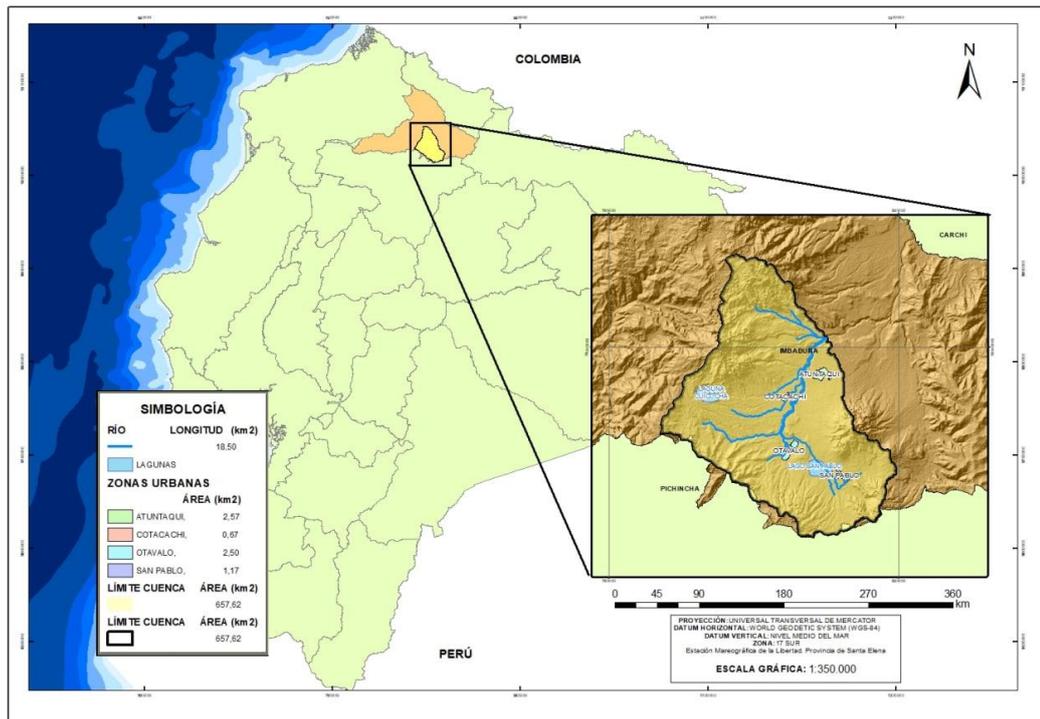


Figura 1. Ubicación de la microcuenca del río Ambi

La microcuenca del río Ambi tiene una superficie total de 667,62 km², su relieve va desde el nudo del Mojanda-Cajas y de los páramos de Piñan, con una altitud aproximada de 4800 msnm, y va descendiendo gradual y abruptamente en forma de laderas hasta la zona baja en donde confluye con el río Mira (Almeida, 2014). En su relieve destacan elevaciones como el Cotacachi, el Mojanda y el Imbabura, sus atractivos paisajísticos destacan las lagunas de San Pablo, Mojanda, Cuicocha, Piñan y otras de menor extensión (Andre y Piedra, 2017).

Las características meteorológicas y la influencia de las oscilaciones de la zona de convergencia intertropical determinan la existencia de épocas secas y lluviosas bien marcadas dentro del año hidrológico (Guachamin et al., 2015). Su temperatura media anual oscila entre los 4°C - 9°C en las zonas altas de la cuenca superiores a 3400 msnm, hasta los 17°C - 20 °C en la zona medias y valles secos de la microcuenca (Espinoza, 2017). La precipitación tiene ocurrencia en el periodo comprendido entre octubre y mayo, presentando una distribución bimodal de las

precipitaciones con dos picos máximos en octubre y marzo y un pico mínimo en julio (Guachamin et al., 2015).

3.2. Métodos

En esta sección se presenta de forma detallada los métodos, técnicas y procedimientos que se utilizaron en el presente estudio.

3.2.1 Tratamiento de información

Fue necesario realizar un estudio previo mediante un diagnóstico, evaluación y validación de información base que permitió obtener un conocimiento inicial, amplio, general y puntual de la zona de estudio (Vera, 2019). Para determinar los parámetros necesarios del presente estudio, se realizó el tratamiento de información de los servidores en línea y de información principal y secundaria. La información necesaria para alcanzar el cumplimiento de los estudios de investigación debe tener detalles como la fuente, el año, la escala y formato, para la presente investigación, la información base se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Información base para el presente estudio

INSUMO	FUENTE	AÑO	ESCALA	FORMATO
Modelo de elevación digital	SIG Tierras	2017	1:50000	ráster
Datos de precipitación y temperatura	INAMHI	2019	-	xlsx
polígono de cobertura y uso del suelo	SIN	2013	1:50000	shp
polígono del tipo de suelo	SNI	2013	1:50000	shp

Fuente: (Torres, 2019)

3.2.1.1. Delimitación del área de estudio

El área de estudio corresponde a la microcuenca del río Ambi, para su delimitación se empleó el ráster del modelo de elevación digital (DEM) con Datum WGS 84 UTM zona 17 Sur y se elaboró en el software ArcMap 10.5, obteniendo, el polígono en formato shapefile (.shp) de la microcuenca del río Ambi (Gutierrez, 2008 y SNI, 2017).

3.2.1.2. Caracterización de la microcuenca

Los parámetros geomorfológicos de la microcuenca del río Ambi se dividieron en parámetros de forma y de relieve, y se obtuvieron con el tratamiento del shp de la microcuenca del río Ambi en el software ArcMap 10.5. Además, se creó una tabla de atributos en el archivo *shapefile*, la misma que almacenó la información de la microcuenca del río Ambi.

- **Parámetros de forma**

Para comprender la dinámica del ciclo hidrológico en la microcuenca, se debe conocer su estructura física mediante los parámetros de forma (Tapia, 2012). Esta información se obtuvo utilizando el software ArcMap 10.5, a través del polígono de delimitación de la microcuenca, en donde se procedió a crear nuevos campos en la tabla de atributos del archivo shp para proceder con los cálculos respectivos, el uso de esta metodología es la más común para la obtención de la información base de las cuencas hidrográficas (Ramírez, 2015).

- a. Área**

En la interfaz de ArcMap y con el archivo shapefile, se destina un nuevo campo en donde se utilizó la calculadora de geometría del software para la obtención del área total del sistema hídrico, y se realizó la clasificación según el área de la cuenca conforme a la Tabla 1.

b. Perímetro

Se empleó la misma metodología, a través del mismo archivo shapefile de la microcuenca, se implementó una nueva celda y se usó la herramienta calculadora de geometría.

c. Longitud axial

Mediante la herramienta *measure*, se determinó los puntos más alejados de la microcuenca desde la cota más alta de la microcuenca hasta el punto de aforo y se procedió a medirlos (Ibáñez et al., 2010).

d. Ancho promedio

Se usó la ecuación de ancho promedio empleada por Anaya (2012) en un nuevo campo de la tabla de atributos del polígono de la microcuenca, se realizó la operación con ayuda de la calculadora de campos (*field calculator*).

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

Donde:

W: Ancho Promedio en km.

A: Área de la cuenca en km²

L: Longitud axial de la microcuenca en km

e. Factor de forma

De la misma forma, en una columna vacía de la tabla de atributos del shp de la microcuenca, se empleó la calculadora de campos para determinar la correlación entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud axial a través de la ecuación en Ibáñez et al (2010).

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

Donde:

If: Factor de forma

Ap: Ancho promedio del sistema hídrico en km

L: Longitud Axial del sistema hídrico en km.

Este parámetro establece la susceptibilidad de la cuenca a crecidas y que esta ponderado según la siguiente Tabla 4:

Tabla 4. *Ponderación para el factor de forma*

Rango	Susceptibilidad a crecidas
0.00 – 0.25	Baja
0.26 – 0.50	Media
0.51 – 0.75	Alta
>0.75	Muy alta

Fuente: (Gaspari et al, 2008)

f. Coeficiente de compacidad de Gravelius

En el software se determinó el coeficiente de Gravelius empleando la calculadora de campos, a través de la ecuación:

$$Cg = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde:

Cg: Coeficiente de Gravelius

P: Perímetro del sistema hídrico en km

A: Área del sistema hídrico en km².

El coeficiente de compacidad ubica a la cuenca hidrográfica según los rangos estipulados en la siguiente Tabla 5:

Tabla 5. *Parámetros morfológicos de la microcuenca del río Ambi*

Rango	Forma de la cuenca
1.00 – 1.24	Redonda
1.25 – 1.49	Oval Redonda
1.50 – 1.74	Oblonga
>1.75	Rectangular Oblonga

Fuente: (Ibáñez et al, 2010)

- **Parámetros de relieve**

Estos parámetros se determinaron mediante la aplicación del Modelo Digital de Elevación que contiene la información topográfica de la microcuenca del río Ambi, se realizó su análisis en la interfaz del software ArcMap.

- a. Curva hipsométrica**

Se determinó a través de las diferentes áreas de los polígonos formados por las cotas principales y el límite de la microcuenca (Ramírez, 2015), para identificar la pendiente de la microcuenca.

- b. Altura máxima y mínima**

Se empleó las curvas de nivel que fueron obtenidas a través del modelo de elevación digital con una diferencia entre curvas de 20 metros (Ramírez, 2015), se creó una nueva celda y se colocó los valores de cada parámetro.

- c. Altura media**

Con la herramienta *field calculator* de Arc Map se procedió a realizar la operación matemática tomando como referencia que la altura media se establece mediante la correlación entre volumen y el área de la microcuenca, la cual estuvo sujeta a través de la siguiente ecuación (Cardona, 2012).

$$H = \frac{V}{A}$$

Donde:

H: altura media en m

V: volumen de la microcuenca en m³

A: área de la microcuenca en m²

d. Pendiente media

Cardona (2012), menciona que se realiza el cálculo de la pendiente media para identificar el grado de erosión de la microcuenca. En el software se utilizó un nuevo campo y con ayuda de la calculadora de campos se utilizó la siguiente ecuación:

$$J = 100 * \left(\frac{\sum Li * E}{A} \right)$$

Donde:

J: pendiente media de la microcuenca en %

$\sum Li$: suma de las longitudes de las curvas de nivel en km

E: equidistancia entre curvas de desnivel en km

A: área de la microcuenca en km²

El valor porcentual de la pendiente media estableció el tipo de relieve que presenta la microcuenca y que condiciona la dinámica de su hidrología, la ponderación de este parámetro se estable en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6. *Ponderación de la pendiente media para determinar el tipo de relieve*

Pendiente media %	Tipo de relieve
0.0 – 0.5	Muy plano
0.5 – 1.0	Plano
1.0 – 3.0	Suave
3.0 – 12.0	Lomadas
12.0 – 20.0	Accidentado
20.0 – 35.0	Fuerte
35.0 – 50.0	Muy fuerte
50.0 – 75.0	Escarpado
> 75.0	Muy escarpado

Fuente: (Gaspari et al., 2008)

- **Parámetros de la red hídrica**

Para el cálculo de los parámetros hidrológicos se obtuvo la información base de la red hidrológica de la microcuenca, los cuales estuvieron sujetos a las características físicas tanto de forma y relieve de la cuenca hidrográfica (Ramírez, 2015). Para su obtención se utilizó el software ArcMap, empleando la misma metodología en los apartados anteriores.

- a. Orden de drenaje**

En ArcMap se implementa un nuevo campo en la tabla de atributos y con ayuda de la herramienta de edición se procede a escribir el orden de cada cauce hídrico.

- b. Densidad de drenaje**

Con un nuevo campo en el archivo de la delimitación de la cuenca hidrográfica y con la calculadora de campos se realizó la operación en base a la siguiente ecuación de acuerdo con (Ibáñez et al., 2010), para determinar la incidencia en la velocidad del movimiento de las partículas de agua.

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

Donde:

Dd: densidad de drenaje en km

LN: sumatoria de la longitud de los cursos de agua en km

A: área de la microcuenca en km²

Una vez obtenido el valor, se procedió a ubicar dentro del rango según la Tabla 7:

Tabla 7. Ponderaciones de la densidad de drenaje

Densidad de drenaje	Categoría
<1	Bajo
1 – 2	Moderado
2 – 3	Alto
> 3	Muy alto

Fuente: (Peña, 2005)

c. Pendiente media del cauce

Este parámetro en sinergia con la densidad del drenaje condiciona el movimiento de la velocidad del caudal. En el software se calcula como ayuda de la calculadora de campos aplicando la siguiente ecuación (Gaspari et al., 2008).

$$J = \left(\frac{Hmax - Hmin}{l} \right) \times 100$$

Donde

J: pendiente media del cauce en %

Hmax: altura máxima sobre el curso de agua en m.

Hmin: altura mínima sobre el curso de agua en m.

d. Tiempo de concentración

En la tabla de atributos del archivo principal de la delimitación de la cuenca se inserta un nuevo campo y se emplea la calculadora de campos., este parámetro tiene relación con la longitud del cauce principal y la pendiente media del mismo, se calculó mediante la siguiente ecuación (Ibáñez et al., 2010).

$$Tc = 0.3 * \left(\frac{l}{J^{3/4}} \right)^{0.76}$$

Donde:

Tc: tiempo de concentración en horas.

L: longitud del cauce principal en km.

J: pendiente media del cauce en %.

3.2.1.3. Caracterización biótica

Se analizó las formaciones vegetales presentes en el área de estudio de acuerdo con la clasificación de Sierra (1999). Posteriormente, se elaboró un listado taxonómico de las especies vegetales más representativas registradas en campo y

se determinó la situación actual de la formación y cobertura vegetal a través de una clasificación supervisada de imágenes en ArcMap. Para la determinación del clima se utilizó información de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio.

3.2.2 Oferta hídrica

Para la determinación de la oferta hídrica en la microcuenca de estudio se identificó las entradas y salidas naturales mediante información bibliográfica, en donde se determinó que la principal entrada de recurso hídrico al sistema de una cuenca hidrográfica está constituida por la precipitación, y las salidas de recurso hídrico están conformadas por la pérdida de agua a través de la evapotranspiración y la infiltración (Mancini et al. 2003). Se realizó una recopilación, análisis y procesamiento de los datos de precipitación y temperatura, de un periodo estimado de diez años de registro, obtenidos de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro y fuera de la delimitación de la cuenca hidrográfica objeto de estudio del presente trabajo.

3.2.2.1. Precipitación

Se determinó las estaciones meteorológicas que tienen influencia en la microcuenca del río Ambi, y se recopiló los datos disponibles en los anuarios meteorológicos y en la base nacional solicitada al INAMHI para el periodo 2006-2015 de las estaciones meteorológicas y pluviométricas: M0001, M0003, M0104, M0105 y M0107 (Figura 2). Se encontró que para la estación M0107 no contaban con datos completos de precipitación en el mes de diciembre del año 2015, por lo que estos espacios fueron reemplazados con datos obtenidos a partir de la correlación entre las estaciones con datos completos y la estación M0107 (Tapia, 2012).

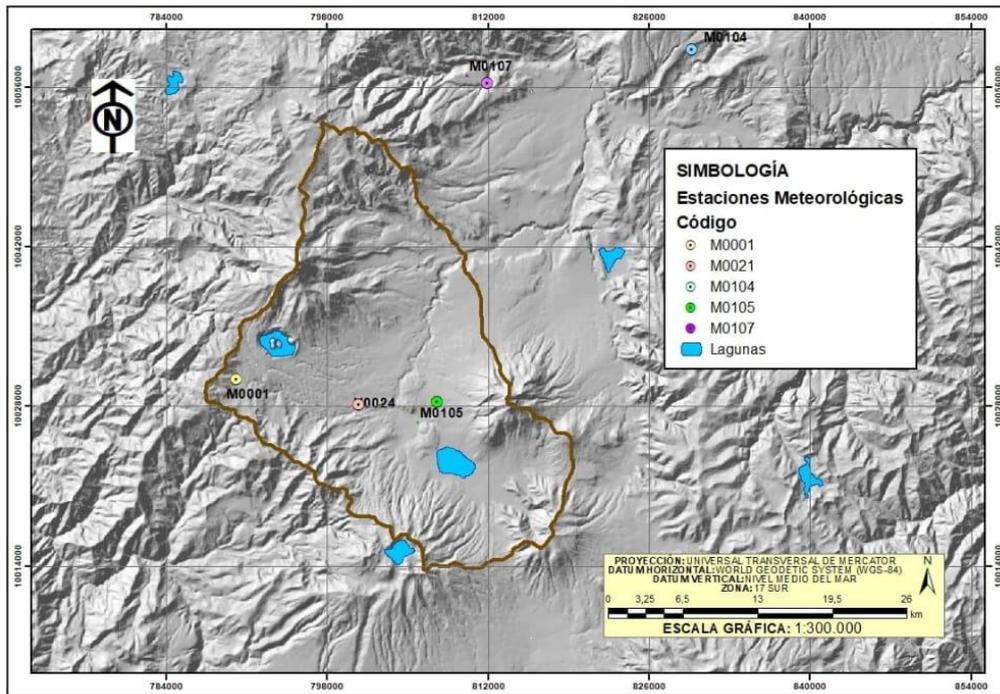


Figura 2. Estaciones hidrológicas contempladas para el presente estudio

Los datos faltantes se completaron por medio del uso de metodologías estadísticas de relleno (Pacheco y Barrios, 2004), la cual se realizó con al menos 3 estaciones cercanas a la estación con datos faltantes. Además, se realizó un análisis de calidad de los datos, mediante la aplicación de la curva de doble masa (Figura 3), con el objeto de identificar valores atípicos que puedan ser errores de digitación de los datos (Chow et al., 1994).

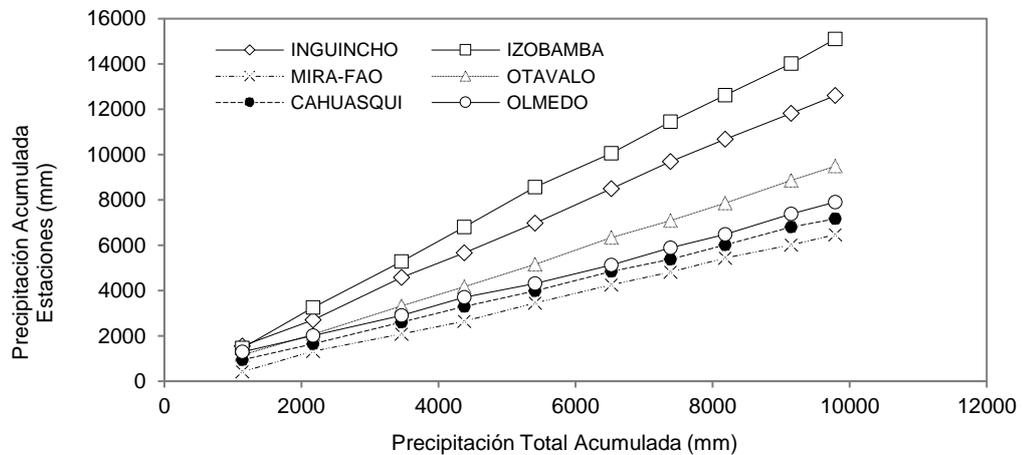


Figura 3. Curva de doble masa de las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis de precipitaciones del período comprendido entre 2006 hasta 2015.

Los registros de al menos 10 años de datos ayudaron a obtener información de la precipitación media mensual a través de isoyetas empleando el método estadístico “IDW”, este método ayuda a interpolar matemáticamente en función inversa de la distancia, determinando que las cosas que están cerca entre sí, son más parecidas (Murillo et al., 2012)., se tomó en cuenta un valor de 100 mm para obtener isolíneas y posteriormente agregar los valores a los polígonos utilizando la herramienta *feature to polygon*. Para obtener el ráster de precipitación de la microcuenca, se procedió a realizar el factor de corrección en función del error medio absoluto o EM para definir la calidad de los datos obtenidos de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$EM = \sum_{i=1}^n (Pe_i - Pr_i)/n$$

Donde:

EM: Error medio absoluto

Pe: Precipitación estimada por interpolación

Pr: Precipitación real

n: número de valores cercanos

3.2.2.2. Temperatura

La información de temperatura se obtuvo de igual forma de la base de datos de las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI, 2018). El tratamiento de esta información presentó una mayor incidencia con registros faltantes.

Al igual que en los datos faltantes de precipitación se rellenaron por medio del uso de metodologías estadísticas de relleno, para lo cual se empleó al menos 3 estaciones cercanas a la estación con datos faltantes.

Para el relleno de datos se utilizó el método de regresión lineal para el cálculo de los datos faltantes la técnica de regresión lineal simple permite construir modelos para representar la relación entre la variable independiente (X), y la variable

dependiente que se denotada por la letra (Y), para una mejor visualización se grafica el diagrama de dispersión. Para analizar la intensidad de la relación se calcula el coeficiente de correlación mediante la siguiente fórmula (Lind et al., 2004):

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Donde:

R: Coeficiente de correlación

N: Número de observaciones

También, se realizó el análisis de calidad de los datos, mediante una curva de doble masa (Figura 4), e identificar valores atípicos que puedan ser errores al momento de la digitación.

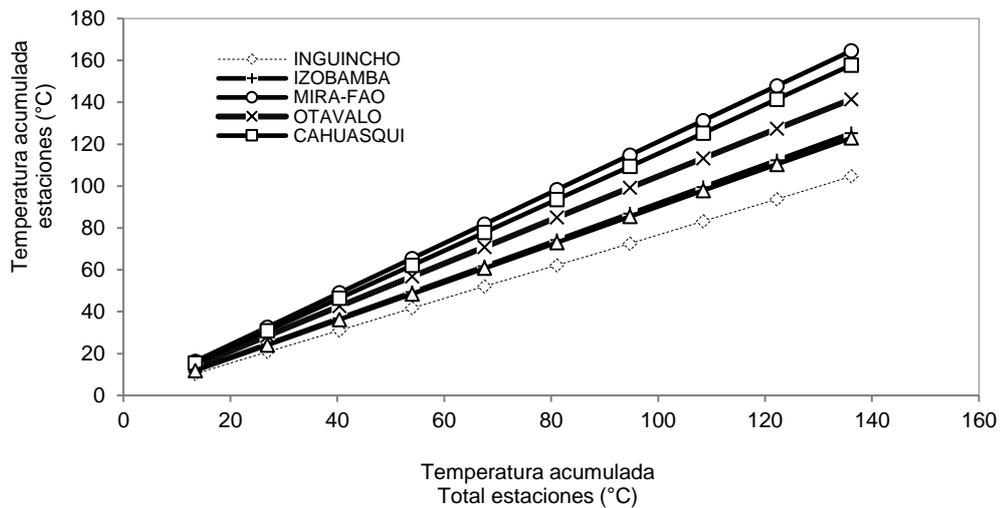


Figura 4. Curva de doble masa de las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis de temperaturas del período comprendido entre 2006 hasta 2015.

En el mismo intervalo de tiempo que se utilizó para la precipitación se obtuvo isotermas empleando el método estadístico “Spline”, lo que permite minimizar la curvatura general de la superficie ya que esta función se forma por varios polinomios que están definidos sobre un subintervalo unidos entre sí y que obedecen a ciertas condiciones de continuidad (Chica, 2018), se tomó en cuenta un valor de 2 °C para obtener isolíneas y posteriormente agregar los valores a los polígonos utilizando la herramienta de *feature to polygon*.

Para determinar la temperatura real se realizó el análisis de la temperatura determinante y luego estos valores para ser devueltos al ráster se utilizó la fórmula inversa de la temperatura determinante mediante la siguiente expresión (Ruiz et al, 2014):

$$T_{x,y} = T_{det} + (r(Z^{(x,y)DEM} - Z_{det}))$$

Donde:

T: Temperatura

Tdet: Temperatura determinante

Zdem: Altitud de las estaciones

Zdet: Altitud referencial promedio

3.2.2.3. Caudales

Para la estimación de los caudales medios mensuales se empleó la única estación hidrológica con datos completos para el período de estudio, cabe recalcar que los datos de caudales de esta estación serán divididos en un 60% y 40% para la calibración y la validación respectivamente del modelo hidrológico (Ramírez, 2015).

3.2.2.4. Cálculo de la evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración se recopiló, analizó y procesó los datos de temperatura (media), en función del método de Thornthwaite mediante la ecuación modificada, como se indica en la siguiente expresión (Thornthwaite, 1948 y Camargo et al., 1999):

$$ETP = 16 \left(10 \frac{T}{I}\right)^a$$

Donde:

ETP: evapotranspiración potencial en cm/mes;

T: temperatura media mensual en °C

I: Índice calórico anual dado por la siguiente fórmula:

$$I = 12 \left(\left(\frac{T_{anual}}{5} \right)^{1,514} \right)$$

a: exponente dado en función de I, como se indica en la expresión siguiente:

$$a = (675,10^{-9})I^3 - (771,10^{-7})I^2 + (179,10^{-4})I + 0,492$$

En ArcMap después de obtener la temperatura real de la cuenca se empleó la calculadora ráster para determinar el índice calórico anual, la variable exponencial a. Con estos parámetros obtenidos se procedió a obtener la evaporación y mediante la multiplicación con el factor de corrección de cada mes para la latitud 0°, se procedió a la obtención de la evapotranspiración.

3.2.2.5. Cálculo de la infiltración

Para la determinación de la infiltración se realizó un reconocimiento de las características del uso de la cuenca en estudio. Se recopiló información referente a tipo de suelo, cobertura vegetal y pendiente de la cuenca.

Para el análisis de la cobertura vegetal se usaron imágenes Landsat, shapefile (MAGAP, 2003), y algebra de mapas, aplicando las herramientas que proporciona el software ArcMap (Chuvienco, 1995), además se corrigió geoméricamente la posición de las celdas atribuyéndoles coordenadas en el sistema de referencia WGS 84 Modclark (2008).

3.2.2.6. Cálculo de la escorrentía

Para este cálculo se tomó las precipitaciones potenciales y precipitaciones reales de la cuenca, se obtuvo el coeficiente de escorrentía (*ce*) a través de las características del suelo de acuerdo con la siguiente ecuación (Mays, 2011):

$$ce = \left(\frac{\Delta P_n}{\Delta P} \right)$$

Donde:

P_n: Escorrentía Superficial

P: Precipitación total

Una vez obtenido el (*ce*) se multiplicó con las isoyetas antes determinadas y luego se obtuvo los valores de la escorrentía total, las cuales ayudaron a obtener el caudal de la cuenca (Ibáñez et al., 2010).

3.2.3 *Demanda hídrica*

Para el cumplimiento de la estimación de la demanda hídrica, se realizó la recopilación y análisis de información sobre las autorizaciones de uso y aprovechamiento de agua desde el año 2006 al 2015, otorgadas por la Secretaría del Agua.

Se realizó el análisis de la información y se obtuvo la demanda hídrica por uso de agua tanto para consumo humano, riego, abrevaderos de animales y uso productivo y recreativo. Además, este método implicó el procesamiento y depuración de la base de datos, se realizó la ubicación geográfica de las concesiones y se realizó salidas a campo para la verificación de la ubicación de las autorizaciones y de la constatación de los caudales asignados a las autorizaciones mediante la medición de caudales en las tomas de agua que son autorizadas. Se realizó el análisis de los usos de agua para determinar de forma específica para cada sector la demanda de agua que se realiza en el área de estudio.

La demanda hídrica se obtuvo mediante la sumatoria de las demandas sectoriales (Corponariño, 2007), expresadas en unidades de volumen de acuerdo con la siguiente expresión:

$$DT = DUH + DURA + DUP$$

Donde:

DT: Demanda total de agua

DUH: Demanda de agua para consumo humano

DURA: Demanda de agua para riego y abrevaderos de animales

DUP: Demanda de agua para uso productivo

3.2.3.1. Uso de agua para consumo humano

El abastecimiento de agua para consumo humano está comprendido en uso doméstico, el cual está regulado por los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales y Parroquiales los cuales poseen la autorización de agua respectiva para dotar del recurso hídrico a la población.

Se sugiere una dotación bruta (dotación neta más pérdidas) 180 litros/habitante/día. La estimación de este parámetro se realizó en torno a las autorizaciones emitidas por mes y de forma anual en el tiempo de estudio y de esta forma determinar el agua que se extrajo de la cuenca.

Se estimó la cantidad de agua para consumo humano mediante el caudal asignado para este sector, de forma mensual y de forma anual para el período estimado de estudio, la cual atiende a la siguiente expresión (Corponariño, 2007):

$$\widehat{DUH} = \frac{\sum_{i=1}^n DUHi}{n}$$

Donde:

\widehat{DUH} : Promedio de la demanda de agua para consumo humano

DUH: Demanda de agua para consumo humano

n: número de resultados obtenidos de DHU

3.2.3.2. Uso de agua para riego y abrevadero de animales

Este parámetro comprende el uso de recurso hídrico destinado para cultivos y el consumo de agua por los animales. Para este factor se analizó tanto las autorizaciones de riego y las autorizaciones de abrevaderos de animales y se estimó la demanda para este sector que se presentó en los años de análisis y que atienden a la siguiente expresión (Corponariño, 2007):

$$\widehat{DURA} = \frac{\sum_{i=1}^n DURAi}{n}$$

Donde:

\widehat{DURA} : Promedio de la demanda de agua para riego y abrevadero de animales

DURA: Demanda de agua para riego y abrevadero de animales

n: número de resultados obtenido de DURA

3.2.3.3. Uso de agua para uso productivo

En este apartado se analizó la información de todos los sectores productivos que se encuentran con autorización de uso de agua en la cuenca de estudio, sectores productivos como la piscícolas, manufactureras y de recreación y que atienden a la siguiente expresión (Corponariño, 2007):

$$\widehat{DUP} = \frac{\sum_{i=1}^n DUP_i}{n}$$

Donde:

\widehat{DUP} : Promedio de la demanda de agua para uso productivo

DUP: Demanda de agua para uso productivo

n: número de resultados obtenidos de DUP

3.2.3.3.1. Retorno del recurso hídrico al sistema

Del mismo modo que en los sistemas de abastecimientos, los retornos incluyen las aguas residuales tanto de usos domésticos como productivos. Hay que tomar en cuenta que no se dispone de datos reales sobre los volúmenes de retorno, es por ello que según CMAOT (2015), ha estimado un 80% de retorno de aguas residuales tanto para uso de agua para consumo humano como el productivo, mientras que para el sector de riego y abrevaderos de animales no se toma en cuenta este factor debido que es el uso de agua consuntivo de la cuenca.

3.2.4 Balance hídrico

La selección del período a modelar se eligió tomando como referencia la disponibilidad de datos hidrometeorológicos, además de la información pública de las instituciones que tienen en sus competencias la administración y regularización del recurso hídrico.

Se determino el balance hídrico incorporando las entradas y salidas naturales de agua mediante la oferta del recurso hídrico y se restó la demanda de agua en la cuenca del río Ambi. Para esto se realizó la modelación de la cuenca con ayuda del software HEC-HMS, como un modelo semi distribuido (MacArthur y DeVries, 1993).

3.2.4.1 Modelamiento del balance hídrico aplicando el software HEC-HMS

Para la ejecución del modelamiento mediante el software HEC-HMS se requirieron datos de la Curva Número, para ello en el software ArcGIS se realizó una intersección de las capas de la taxonomía y uso de suelo, y se procedió a realizar la clasificación de cada una de las unidades resultantes en base al criterio proporcionado por Núñez, (2011) que se encuentra en la Tabla 2.

Para realizar los cálculos el programa se dividió en microcuencas al área de estudio y se procedió con la obtención del *lag time* que es el tiempo que transcurre desde el centro de gravedad de la precipitación neta hasta la punta del hidrograma unitario, este valor es aproximadamente el 60% del tiempo de concentración y también se necesitó el valor de la abstracción inicial (P_0).

3.2.4.1.1 División en microcuencas

La subdivisión de microcuencas se realizó tomando en cuenta la viabilidad de información presente en cada microcuenca obtenida, en donde se obtuvo el área de drenaje influyente (Tabla 8) para toda la cuenca de estudio la cual contiene el Modelo Hidrológico Conceptual.

Tabla 8. *Microcuencas de influencia para todo el presente estudio*

Microcuencas	Área km ²	Área %
Itambi	225,29	35,02
Blanco	86,37	13,43
Iluman	49,25	7,66
Yanayacu	146,04	22,70
Alambí	136,32	21,19

3.2.4.1.2 Número curva

El método número de curva del Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos (SCS), estima el exceso de precipitación como una función de la precipitación acumulada, cobertura del suelo, uso del suelo, y humedad antecedente del suelo, usando la ecuación siguiente (Gaspari et al., 2008):

$$P_e = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$$

Donde:

Pe: Exceso de precipitación acumulada en el tiempo t.

P: Profundidad de la lluvia acumulada en el tiempo t.

Ia: Abstracción inicial (pérdida inicial)

S: Retención potencial máxima.

El exceso incrementado para un intervalo de tiempo es calculado como la diferencia entre el exceso acumulado al final y comienzo del período. La retención potencial máxima, (S), y las características de la cuenca están relacionadas a través de un parámetro intermedio, el número de curva (NC) mediante (Gaspari et al., 2008):

$$S = \frac{25400 - 254NC}{NC}$$

Para su cálculo se determinó el tipo de suelo de acuerdo con la Tabla 9, expuesta por Gasparí et al., (2009), uso actual del suelo tipo de cobertura vegetal y la velocidad de infiltración.

Tabla 9. *Tipos de suelo y textura del suelo.*

Tipos de suelo	Textura del suelo
A	Arena con poco limo y arcilla suelos muy permeables
B	Arenas finas y arcillas
C	Arenas muy finas, limos suelos con alto contenido de arcilla

Fuente: (Gaspari et al., 2008)

Este parámetro puede ser estimado como una función del uso del terreno, del tipo de suelo, y humedad antecedente en la cuenca (Tabla 2), usando tablas publicadas por el SCS. Con estas tablas y conociendo el tipo de suelo y uso del suelo, puede encontrarse el valor de NC simple. Para una cuenca que consta de varios tipos de suelos y usos del terreno, el NC promedio se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$NC_{promedio} = \frac{\sum A_i NC_i}{\sum A_i}$$

Donde:

NC promedio: NC promedio usado para calcular el volumen de escurrimiento.

I: índice de subdivisiones de la cuenca para usos del terreno y tipo de suelo uniforme.

NC_i: NC por subdivisión i.

A_i: área drenada por subdivisión i.

Se realizó una clasificación de los suelos de acuerdo con lo establecido por el *Soil Conservation Service* en (1986), la cual ordena a los suelos en grupos según el comportamiento ante un evento de lluvia, es decir la capacidad de infiltración o escurrimiento (Gaspari et al., 2008), de esta forma se clasificaron los diferentes tipos de suelo según su estructura textura y permeabilidad de acuerdo con la siguiente Tabla 10.

Tabla 10. *Identificación de la curva número de la microcuenca*

Cubierta del suelo	Número de curva					
	Grupos hidrológicos					
Clases	Laboreo	Infiltración	A	B	C	D
Barbecho	-	-	77	86	91	94
	R	Pobres	72	81	88	91
Cultivos alineados	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88

	C	Buenas	65	75	82	86
	C – T	Pobres	66	74	80	82
	C – T	Buenas	62	71	78	81
	R	Pobres	65	76	84	88
Cultivos no alineados con surcos pequeños o mal definidos	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C – T	Pobres	61	72	79	82
	C – T	Buenas	59	70	78	81
	R	Pobres	66	77	84	88
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buenas	55	69	78	83
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	C – T	Pobres	63	73	80	83
	C – T	Buenas	51	67	76	80
	-	Pobres	68	79	86	89
	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	-	-	30	58	71	78
Montes con pastos (ganadero-forestal)	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
	-	Buenas	25	55	70	77
Bosques (forestales)	-	Muy pobres	56	75	86	91
	-	Pobres	46	68	78	84
	-	Regulares	36	60	70	76
	-	Buenas	26	52	63	69
	-	Muy buenas	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Camino de tierra	-	-	72	82	87	89
Camino de tierra firme	-	-	74	84	90	92

Fuente: (Scharffenberg et al, 2017). (Ibañez et al., 2011)

3.2.4.2. Modelamiento del caudal superficial con HEC HMS

Para el desarrollo de trabajo, se aplicó la modelación del programa HEC-HMS a nivel diario seleccionando métodos de cálculo globales lo cual implicó que las características fisiográficas y climatológicas se consideran homogéneas en toda la Cuenca. El cálculo del caudal superficial está constituido fundamentalmente por el escurrimiento superficial, generado principalmente por las precipitaciones. Para determinar la simulación hidrológica se emplearon los siguientes métodos:

Pérdida: el método que se empleó en esta sección fue la curva número del SCS que permite separar la precipitación efectiva de la total.

Transformación: se obtendrá a partir del hidrograma unitario del SCS, el cual transforma la precipitación efectiva en escorrentía.

Caudal base: se empleó el método de recesión.

3.2.4.2.1. Modelo de pérdida y flujo base

Número de curva ponderada: Para la obtención de este parámetro se estimó el número de curva ponderado de acuerdo con la siguiente ecuación (Gaspari et al., 2008):

$$NCp = \frac{\sum A}{\sum NC}$$

Donde:

NCp: Número de curva ponderada

$\sum A$: Sumatoria del área en ha.

$\sum NC$: Sumatoria del número de curva

Impermeabilidad: Las características de textura y composición de suelo determinan la capacidad de retención de recurso hídrico conocido como impermeabilidad del suelo. Este parámetro se determinó mediante la siguiente ecuación (Ramírez, 2015).

$$NCp = \frac{\sum A}{A1}$$

Donde:

I: Impermeabilidad

$\sum A$: Sumatoria del área

A1: Área del número de curva

La pérdida del agua lluvia como escorrentía superficial se calculó mediante la ecuación (Ramírez, 2015).

$$Po = 0,2 * \left\{ 254 * \left[\left(\frac{100}{NCp} \right) - 1 \right] \right\}$$

Donde:

Po: Pérdida inicial

NCp: Número de curva ponderado

Tiempo de concentración y de retardo: El ultimo parámetro de cálculo fue el tiempo de concentración (Tc) de cada microcuenca en minutos y para calcular el tiempo de retardo (Tr) se multiplicó por 0,35 ya que este tiempo es el que transcurre desde el centro de gravedad (0,35*Tc) y es una recomendación del manual del software HEC-HMS (Ramírez, 2015).

3.2.4.2.2. Selección de datos de lluvia

De acuerdo con Silva (2005), la respuesta hidrológica de una cuenca está estrechamente relacionada por la precipitación que cae sobre su superficie. La precipitación debe ser observada a partir de un evento histórico cuyos datos son útiles para la calibración y verificación de parámetros del modelo, para pronóstico a tiempo real y para evaluar el funcionamiento de diseños propuestos o regulaciones.

Se desarrolló una base de datos de precipitación diaria en (mm) para un periodo de 24 horas de las estaciones que por su ubicación geográfica representa en influencia en el área de la Cuenca de estudio, para aplicarlos dentro del modelo meteorológico en el HEC HMS. La información de precipitación fue proporcionada

por el INAMHI vía correo electrónico y desde los anuarios en la página web. Para determinar el área de influencia de los pluviómetros a la microcuenca del río Ambi, se aplicó el método de polígono de Thiessen utilizando el ArcMap, las estaciones y los períodos de precipitación y temperatura, tanto para la simulación como para las pruebas de calibración y validación.

3.2.4.3. Calibración del modelo hidrológico

La calibración consistió en la experimentación con varias combinaciones de valores de parámetros, en un esfuerzo por minimizar o maximizar la optimización. Este procedimiento se puede realizar de forma manual o automática y la solución apropiada puede depender mucho del criterio utilizando durante el análisis. Las funciones son excepciones matemáticas que expresan una pérdida en la diferencia entre los valores observados y modelados, y por tanto son usados en la calibración como una medida del rendimiento del modelo (Meneses, 2017).

La verificación de los datos obtenidos mediante la optimización se realizó a través de un análisis de correlación entre el hidrograma simulado y el observado para lo cual se aplicó el coeficiente de determinación r^2 , el mismo que es equivalente al cuadrado de la correlación (Tapia, 2012). El coeficiente de correlación representa la variación entre las variables, y sus valores van de 0 a 1, mientras el coeficiente este más cercano a 1, se estima que asociación lineal es buena (Aguirre y Vizcaíno, 2012).

$$R = \frac{Cxy}{\sqrt{Sx^2 xSy^2}}$$

Donde:

R: coeficiente de correlación.

Cxy: covarianza de los valores observados y simulados

Sx²: varianza de los valores observados

Sy²: varianza de los valores simulados

De la misma manera, para comprobar que los caudales calibrados tengan un rango de ajuste alto se determinó el coeficiente de *Nash-sutcliffe* el cual mide la variabilidad de las observaciones de una simulación con respecto a una real. Cuando

la simulación es igual a 1 la calibración se define como buena y si es menor a 0 es mala.

3.2.4.4. Validación del modelo hidrológico

La validación se realizó para asegurar que los datos calibrados son válidos para cualquier período de tiempo que se requiera, es así como se comparó los datos de caudal simulado y el observado con los parámetros ya calibrados en el año hidrológico evaluado.

Se realizó la verificación de los datos obtenidos mediante un análisis de correlación entre caudales simulados y observados; y se aplicó el criterio *Nash-Sutcliffe* para observar el ajuste entre ellos. Este criterio se calculó mediante la siguiente ecuación y se midió el ajuste de acuerdo con la Tabla 11 (Molnar, 2011).

$$E = \frac{\sum(Q_{sim} - Q_o)^2}{\sum(Q_{sim} - Q_p)^2}$$

Donde:

E: criterio *Nash-Sutcliffe*

Qo: caudal observado

Qsim: caudal simulado

Qp: promedio de los caudales observados

Tabla 11. Rango del coeficiente de criterio *Nash-Sutcliffe*

Rango NSE	Ajuste
<0,2	Insuficiente
0,2 – 0,4	Satisfactorio
0,4 – 0,6	Bueno
0,6 – 0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Fuente: (Molnar, 2011)

3.2.4.4.1 Simulación hídrica de la microcuenca del río Ambi

En el software HEC-HMS se generó un nuevo proyecto, luego se añadieron los componentes del modelo con la opción “*Components*”, con esta herramienta se agregó el modelo, y en el editor de componentes se registró el área de la microcuenca, la curva número, la abstracción inicial y el *lag time*. Posteriormente se añadió el campo para registrar los datos meteorológicos, con la herramienta “*Time-series Data Manager*”, se generó el modelo meteorológico con la herramienta “*Meteorologic Model Manager*” y para finalizar con los componentes del modelo se determinaron las especificaciones de control con la herramienta “*Control Specifications Manager*”. Con todos los datos registrados se ejecutó el ícono “*Run*” y se generaron las tablas de registro del modelo (Salazar, 2017).

3.2.4.5 Determinación de caudales

La determinación de caudales se realizó mediante tres simulaciones para la cuenca del río blanco, al ser parte de la microcuenca del río Ambi los valores obtenidos se tomaron como validados (Videla, 2013), además se utilizó esta información para aplicar el coeficiente *Nash Sutcliffe* y observar cuan acertado fue el modelo aplicado.

3.2.5 Materiales y equipos

Para la aplicación del presente estudio se emplearon diferentes materiales que ayudaron en el alcance de los objetivos tanto en las fases de campo en la cual se tomaron datos *ex situ* necesarios para la validación de los datos y la fase de escritorio en la cual se realizaron la recopilación y análisis de los datos (Tabla 12).

Tabla 12. *Detalle de materiales e instrumentos que se empleara en el presente estudio*

	Materiales de campo	Materiales de oficina
Materiales	Cartografía de la zona	Software ArcMap 10.5
	Cámara digital	Resma de papel
	GPS Garmin	Software HEC-HMS
	Cinta métrica	Software office 2016

Estacas	Imágenes satelitales diferentes resoluciones
Pirola	Geo Data Varias escalas
Botas de Caucho	Impresora
Traje impermeable	Folders (Organizador de archivo)

Capítulo IV

Resultados y Discusión

4.1. Estimación de entradas y salidas naturales para la obtención de la oferta hídrica de la microcuenca del río Ambi

Para la determinación de las entradas y salidas naturales de agua en la microcuenca del río Ambi se desarrolló los parámetros morfométricos con el fin de obtener el sistema hídrico, el cual representa los límites hidrogeológicos del presente estudio.

4.1.1. Caracterización morfométrica

4.1.1.1. Parámetros de forma

Las características morfométricas de la microcuenca tienen una correlación positiva directamente proporcional a la precipitación y escorrentía (Arias, 2015), y se calculó los parámetros de forma para evaluar el comportamiento de la microcuenca frente a los fenómenos pluviales, que se presentan en la siguiente Tabla 13.

Tabla 13. *Parámetros de forma*

Parámetros morfométricos	Simbología	Valores	Unidad
Área	A	<u>667,62</u>	Km ²
Perímetro	P	<u>162,84</u>	km
Longitud axial	La	15,38	km
Ancho promedio	Ap	7,10	km
Factor de forma	Ff	0,46	-
Índice de compacidad	IC	<u>1,76</u>	-
Coficiente de Gravelius	Cg	<u>1,47</u>	-

El área del sistema hídrico del río Ambi se encuentra en un rango de 15 000 – 100 000 ha, para Aguirre (2012), si un área de estudio se encuentra en este rango, se clasifica como microcuenca validando la clasificación estipulada por sistema

de clasificación del Ecuador. Por el factor de forma de la microcuenca del río Ambi, se la considera como una cuenca alargada, con una baja susceptibilidad a crecidas de mediana magnitud en época lluviosa y mínima erosión de los suelos (Gaspari et al. 2008). Para Ramírez (2015) en este tipo de cuencas de acuerdo con las ponderaciones del coeficiente de Gravelius establece bajos estancamientos de agua, mantiene un buen drenaje y determina que la microcuenca tiene una forma oval redonda.

4.1.1.2. Parámetros de relieve

Para el Ministerio del Ambiente del Ecuador (2016) la altura promedio y la pendiente media (Tabla 14), indica que la microcuenca pertenece a un piso altitudinal arbustal siempreverde montano alto del norte de los andes y presenta una fractalidad de características a lo largo de la microcuenca del río Ambi (Gómez, 2019).

Tabla 14. *Parámetros morfométricos de la microcuenca del río Ambi*

Parámetros morfométricos		Simbología	Valores	Unidad
	Altura máxima	Hmax	4800	m.s.n.m.
	Altura mínima	Hmin	1800	m.s.n.m.
Relieve	Altitud media	Hm	3300	m.s.n.m.
	Pendiente media	Sm	11.48	%
	Pendiente media del cauce	Ir	35	%

Cuando se presenta una pendiente media del 15% en las cuencas hidrográficas, indica un relieve moderado (Figura 5), provocando que el agua de precipitación se infiltre y se pierda por escorrentía subterránea y evaporación, provocando que la escorrentía se concentre de acuerdo con la capacidad de almacenamiento de la cuenca (Gaspari et al., 2008).

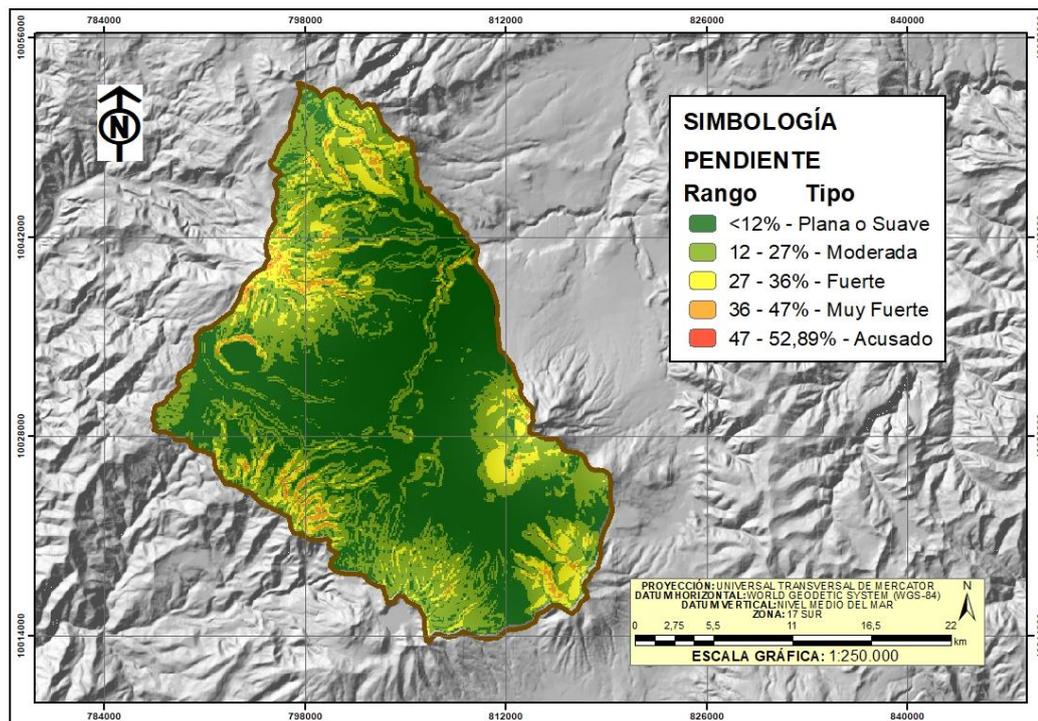


Figura 5. Pendiente media de la microcuenca del río Ambi

4.1.1.3. Parámetros de la red hídrica

Las características naturales de la microcuenca del río Ambi, la extensión y la topografía son condiciones relevantes para la formación de cursos de agua dando el orden del río un valor alto, mientras que por la densidad del drenaje de la microcuenca se puede determinar que tiende a ser moderado, es así como la precipitación se drena de forma acelerada lo que dificulta la percolación para generar fuentes subterráneas de agua (Peña, 2015).

Tabla 15. Parámetros de la red hídrica de la microcuenca del río Ambi

Parámetros red de hídrica	Simbología	Valores	Unidad
Longitud del río principal	L	18,5	km
Densidad de drenaje	Dd	1,44	km/km ²
Orden de la cuenca	N	4	-
Coefficiente de Fournier	F	1,66	-

Tiempo de concentración	Tc	0,16	H
-------------------------	----	------	---

Por otro lado, la pendiente media del cauce principal en similitud con la velocidad media del drenaje y el tiempo de concentración bajo son condiciones propicias para la baja floración de vegetación (Carrera et al., 2017).

Estos resultados indican que la microcuenca tiene crecidas altas solo en época lluviosa, debido a las condiciones topográficas e hidrológicas, lo cual se presenta en el estudio de Espinoza (2017) por su pendiente y densidad media de drenaje el transcurso de agua es rápido en ausencia o presencia de precipitación.

En el estudio realizado por Ramírez (2015) ratifican los resultados obtenidos de los parámetros geo morfométricos y de la red de drenaje hídrica, donde indica que la microcuenca del río Pitura presenta una forma oblonga con crecidas de mayor magnitud, por otro lado, Espinoza (2017), en su estudio obtuvo similar resultado tanto en el factor de forma como en la pendiente media, obteniendo para su área de estudio un relieve accidentado a fuerte, estos dos estudios con concuerdan con las características propias de las cuencas alto andinas de la cordillera occidental a la que pertenece la microcuenca del río Ambi.

Estos resultados determinan que la microcuenca es altamente susceptible a los procesos de erosión debido al promedio de la pendiente de la cuenca; mientras que por la densidad media de drenaje demuestra que el movimiento del agua es rápido en las épocas lluviosas (Ramírez, 2015). Además, Blanco et al. (2013) menciona que, por las características morfométricas, el transporte de sedimentos es consecuencia del aumento de precipitación y de las condiciones de terreno y de vegetación.

Las cuencas que transporta sedimentos y que son susceptibles a crecidas de alta magnitud están relacionadas con vegetación y precipitación. En el estudio de Oyarzún et al. (2011), determinaron que en una microcuenca con presencia de bosque nativo la generación de sedimentos fue menor que en una microcuenca con vegetación forestal de *Eucalipto globulus*.

Huber et al., (2010) encontraron que las características de las vegetaciones forestales, las franjas de protección de los ríos, la intensidad de perturbación de los suelos, y las distintas escorrentías superficiales son determinantes en la cantidad total de sedimentos que transporta una cuenca.

4.1.2. Caracterización biofísica

4.1.2.1. Precipitación

La precipitación media mensual que presentó la microcuenca del río Ambi, se encuentra entre los valores más altos de 129,76 mm y los valores más bajos de 28,75 mm. Sin embargo, las precipitaciones varían según las condiciones físicas de la cuenca y de la cobertura vegetal, lo cual determina la variedad de ecosistemas a lo largo del área de estudio.

Hay que tomar en cuenta que los fenómenos de precipitación se presentan a lo largo del año, incluso en el inicio de la época lluviosa de la microcuenca considerada como época de transición.

El promedio acumulado de precipitación en el área de estudio se encuentra entre 716,64 y 1260,38 mm y se puede visualizar la distribución anual de la precipitación en la microcuenca en la Figura 6.

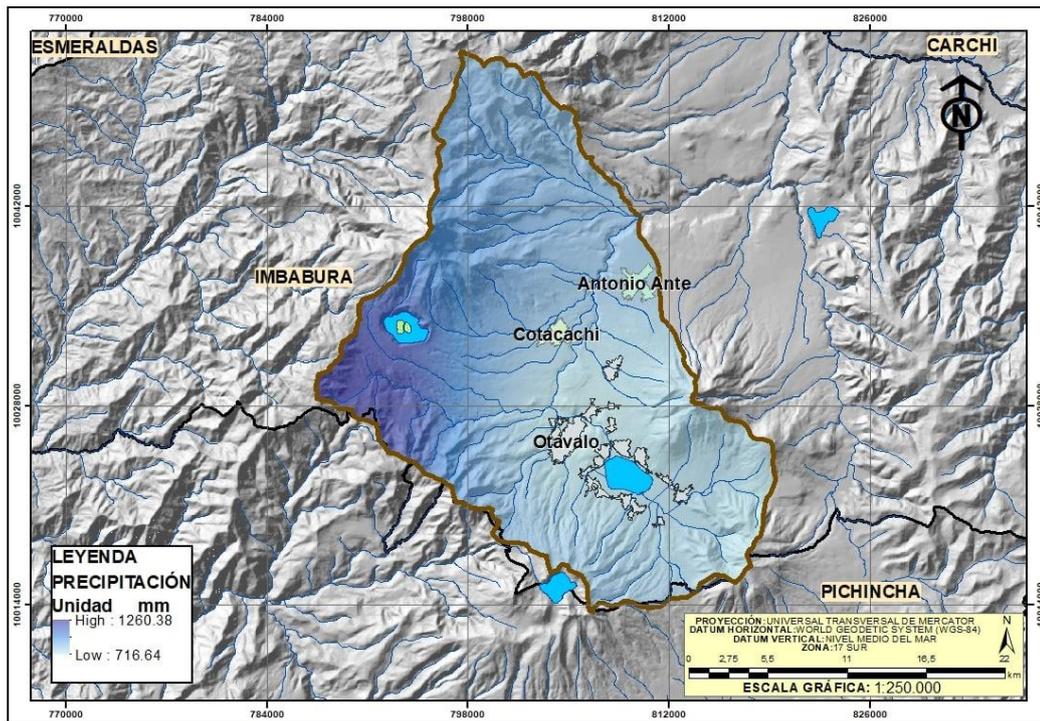


Figura 6. Precipitación media anual de la microcuenca del río Ambí.

García et al. (2015), destacan la variación de la precipitación en función de la altitud, las cuales presentarían mayor incidencia de lluvias en las zonas altitudinales que van desde las estribaciones occidentales de la cordillera hasta los 1800 msnm y sobre los 3000 msnm correspondiente a los páramos, mientras que entre las zonas altitudinales menores a 1800 msnm tendría a disminuir las precipitaciones.

4.1.2.2. Temperatura

De las estaciones evaluadas, se obtuvo la temperatura media mensual la cual nos indica que se mantiene a lo largo del año hidrológico y se debe a que en la región andina la temperatura no presenta una variación marcada (Buytaert et al., 2006).

En la parte más baja se registran temperaturas hasta 16,5 °C, mientras que en la parte alta (superior a los 3600 m.s.n.m.) se registran temperaturas que pueden llegar hasta 1,1°C (Figura 7).

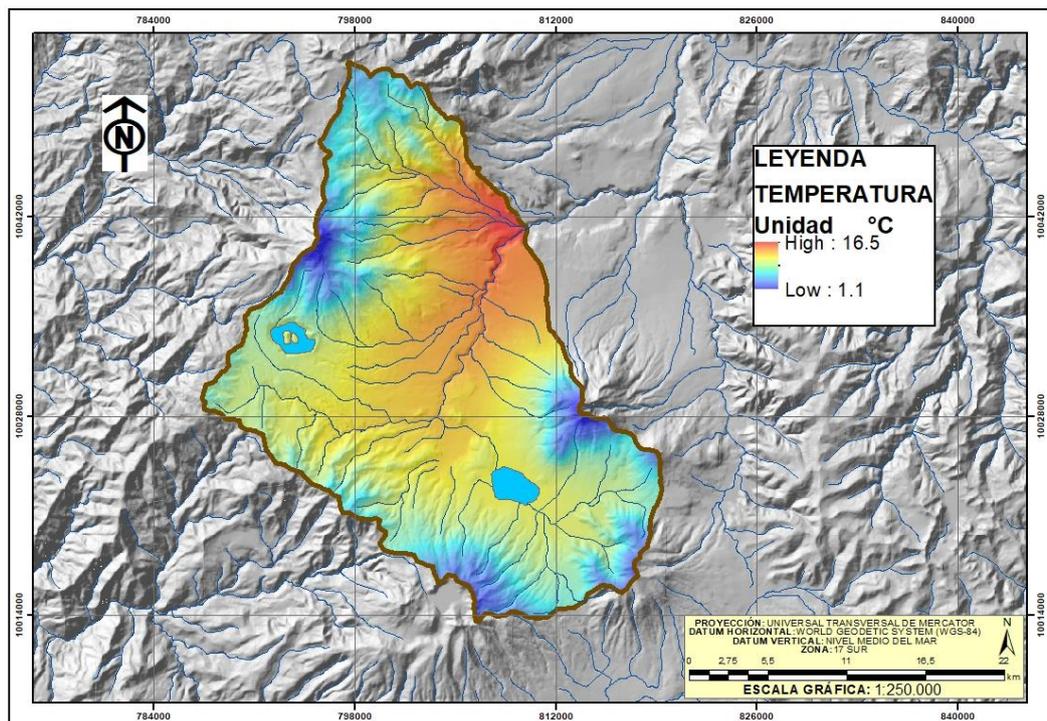


Figura 7. Temperatura media de la microcuenca del río Ambí

En concordancia con el estudio de Guachamin et al. (2015) las cuencas hidrográficas de los estribos de la cordillera de los andes presentan una temporada marcada de lluvias entre los meses de octubre a mayo, mientras que la época de estiaje registra entre los meses de junio a septiembre. También mencionan que, en las partes altas de las cuencas con presencia de páramos, se presenta una mayor precipitación y una baja temperatura. Mientras que, en las cuencas bajas, sobre todo en los valles, la precipitación es menor mientras que la temperatura es mayor.

Además, menciona que, los fenómenos de precipitación a lo largo del año ayudan con la formación de los ecosistemas particulares de cuencas altoandinas y que se establecen con la variación de las temperaturas medias anuales.

Carrera et al. (2018) en su estudio, calculó valores de precipitación que oscilan entre 0 y 2000mm anuales y valores de temperatura entre 6 y 20°C, estos valores están en el rango de precipitación y temperatura determinados en el presente estudio, ya que la microcuenca del río Ambí es parte de la cuenca hidrográfica del

río Mira. Sin embargo, su variación está condicionada por los parámetros de altitud de los ríos y al área geográfica que pertenecen.

4.1.2.3. Clima

La cuenca de estudio por su ubicación geográfica presenta 4 pisos bioclimáticos (Figura 8), predominando los climas, ecuatorial mesotérmico semihúmedo a húmedo y ecuatorial frío seco a semihúmedo (Urrutia., 2016). Sin embargo, de acuerdo con las condiciones de precipitación y temperatura y la fractalidad que se presenta a lo largo de la cuenca, según Gómez, (2019, se determina, en su mayoría, que la microcuenca del río Ambi mantiene un clima semi húmedo mesotérmico, con las excepciones de los valles y rangos altitudinales mayores a los 3000 m.s.n.m.

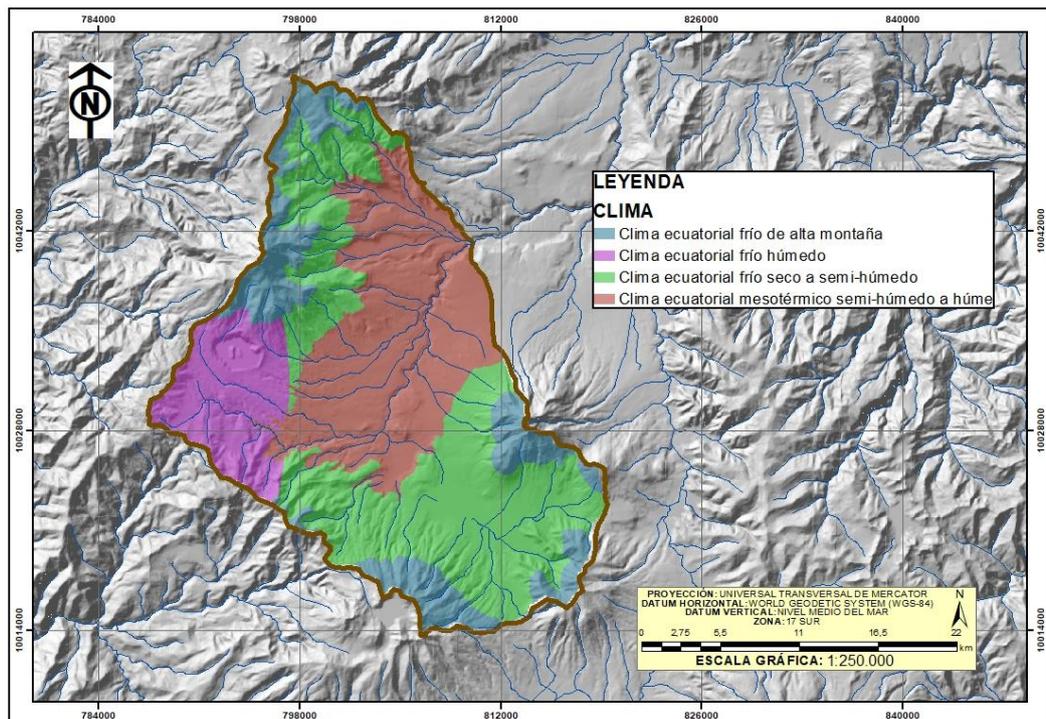


Figura 8. Pisos bioclimáticos de la microcuenca del río Ambi

La formación de vegetación particular de la microcuenca del río Ambi se encuentra determinada por la condición climática, además que su dominancia entre las formaciones vegetales se debe al área total en la que se desarrollan, las

principales formaciones de vegetación se determinaron en el trabajo de campo y se describen en la siguiente (Tabla 16).

Tabla 16. *Especies representativas de la microcuenca del río Ambi*

Familia	Genero	Especie
Poaceae	Calamagrostis	<i>Calamagrostis effusa</i>
Poaceae	Festuca	<i>Festuca spp</i>
Asteraceae	Hypochaeris	<i>Hypochaeris spp</i>
Asteraceae	Baccharis	<i>Baccharis latifolia</i>
Asteraceae	Oritrophium	<i>Oritrophium peruvianum</i>
Gentianaceae	Gentiana	<i>Gentiana sedifolia</i>
Gentianaceae	Gentianella	<i>Gentianella sericeum</i>
Fabaceae	Lupinus	<i>Lupinus smithianus</i>
Gentianaceae	Gentianella	<i>Gentianella ecuaadorese</i>

La microcuenca del río Ambi se ha visto fuertemente presionado en el cambio de uso de suelo y deforestación; esto debido, entre otros factores, al incremento de la densidad de la población y de la demanda de superficie de tierra para destinarlas por áreas de nuevos asentamientos poblacionales, extensiones de las fronteras agrícolas y ganaderas, entre otros (Mas et al., 2004; Miranda et al., 2013).

Los cambios en la cobertura vegetal sin duda alguna repercuten en la presencia de los pisos bioclimáticos, de tal forma que las áreas con mayor incidencia en el cambio de uso de suelo presentan fenómenos climáticos atípicos. En la investigación de Sahagún y Reyes (2018) investigan los cambios en la presencia de fenómenos de precipitación y temperatura debido a los cambios de la cobertura vegetal lo que ratifica los resultados obtenidos en el presente estudio.

4.1.2.3.1. Relación precipitación - temperatura

Mediante la relación entre estos dos parámetros se logró identificar la época seca y la época lluviosa (Figura 9), en donde se presenta la duración e intensidad de la época de sequía en la cuenca del río Ambi para el período 2006 - 2015.

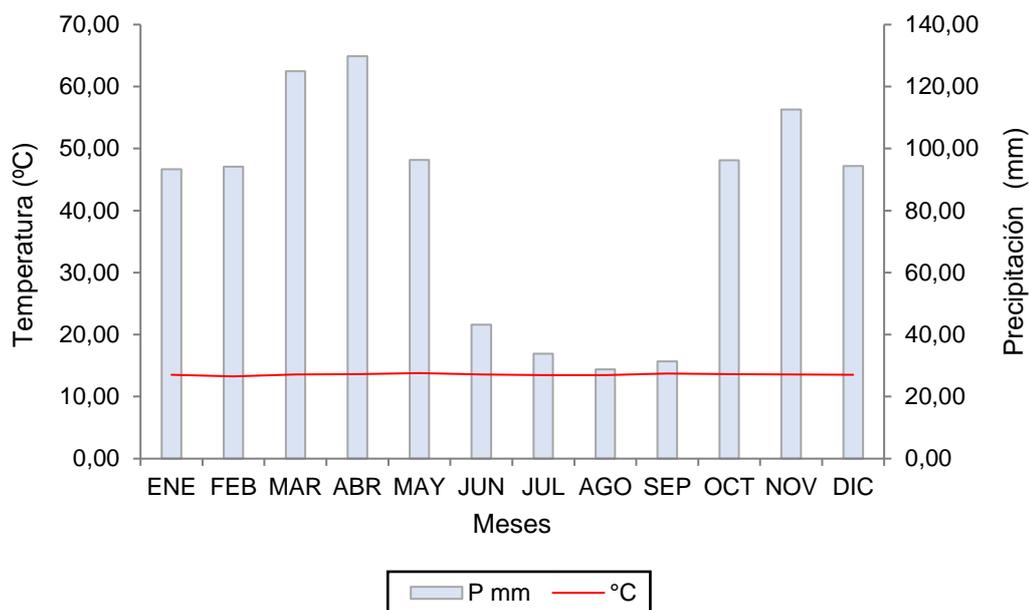


Figura 9. Diagrama ombrotérmico

De acuerdo con el estudio realizado por Miranda (2013), la ubicación del territorio ecuatoriano determina la época seca desde junio a septiembre y la época con presencia de lluvias que va desde octubre hasta abril de cada año hidrológico. Guachamin et al. (2015), determina para la cuenca del río mira las mismas épocas de lluvia y sequía, ratificando los resultados de este estudio ya que la microcuenca del río Ambi es la parte más alta de la cuenca y en donde empieza la red de drenaje con la longitud más larga de todo el sistema hídrico del Ambi.

4.1.2.4. Evapotranspiración

Para la determinación de la evapotranspiración se obtuvo 30 tipos de cobertura vegetal y uso del suelo (Figura 9), y 7 coeficientes de escorrentía de la microcuenca del río Ambi distribuida en el rango entre 0,18 y 0,9.

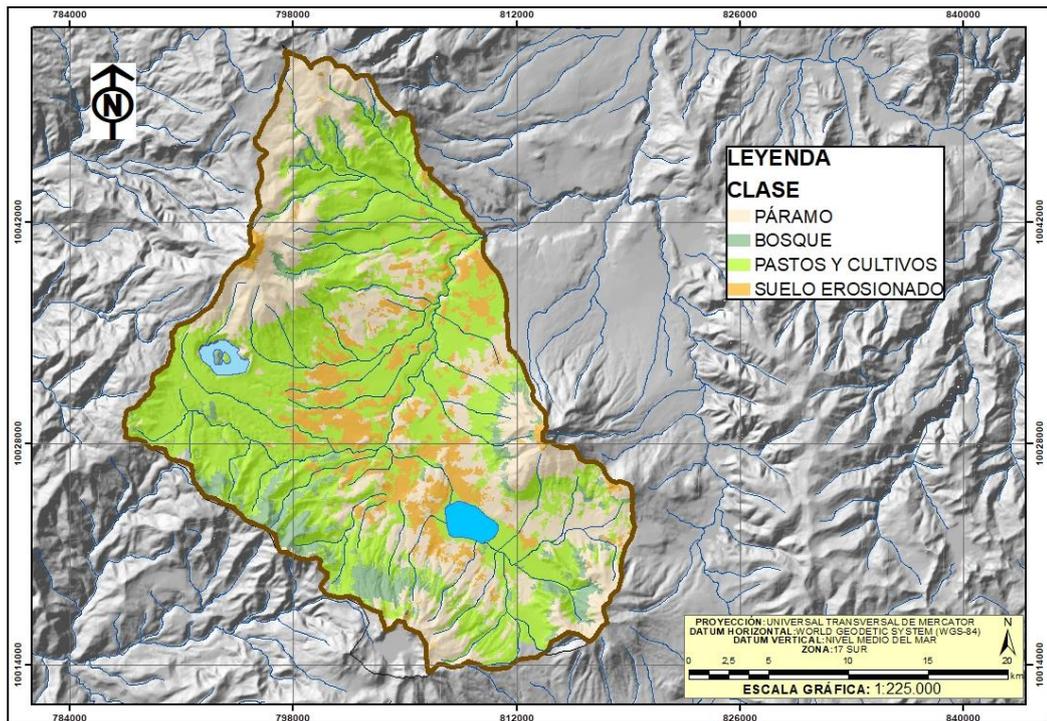


Figura 10. Uso de suelo y cobertura vegetal de la microcuenca del río Ambi

La evapotranspiración en la microcuenca del río Ambi determina la ecuación de continuidad o de balance hídrico que en sinergia con la escorrentía superficial y la infiltración son los factores dominantes para la generación de recurso hídrico superficial y la capacidad de almacenamiento de la microcuenca (Miranda, 2013).

Mediante el uso de archivo de tipo de suelo del IGM se obtuvo tres tipos de permeabilidad (Figura 12), que se produce en la microcuenca de estudio.

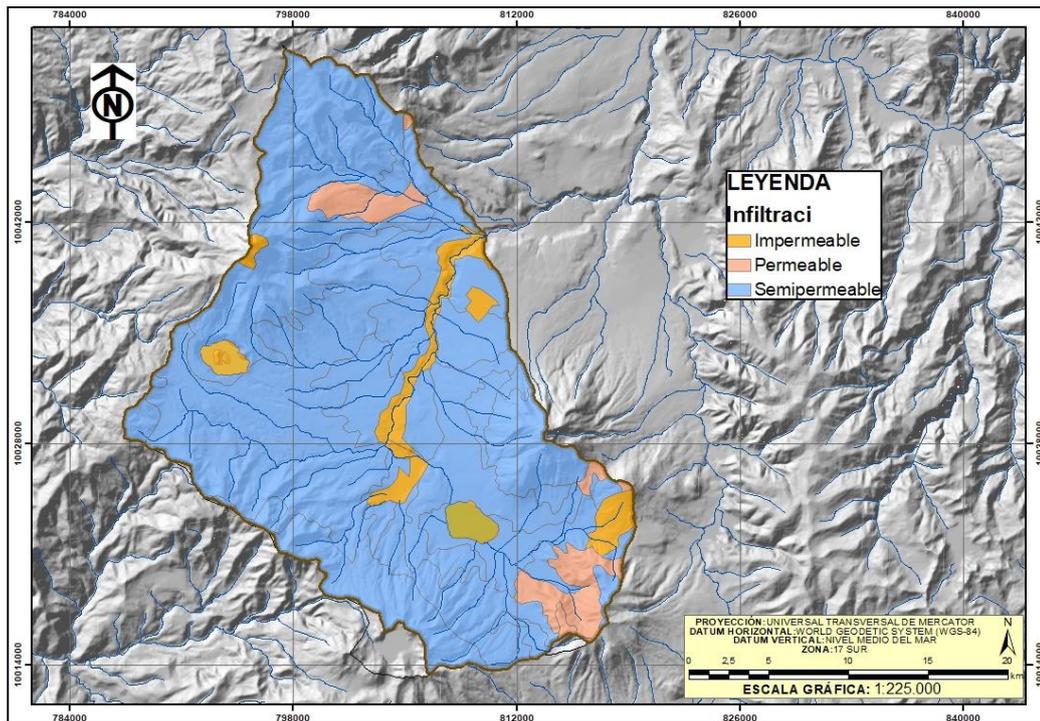


Figura 11. Infiltración de la microcuenca del río Ambi

Para Tapia (2012) la capacidad de infiltración de una microcuenca es un factor físico predominante en la erosión hídrica y que influyen en el escurrimiento como se observa en la parte alta de la cuenca del río guayas y que posee características de una microcuenca alto Andina.

Sin embargo, pérdidas de 12,5 mg.ha/año son admisibles como máximo en un suelo profundo de textura media, permeabilidad moderada y con un subsuelo favorable para la formación de vegetación y de almacenamiento de recurso hídrico (López, 2014).

4.1.2.5. Escorrentía

Los valores promedios mensuales de escorrentía (Tabla 17), para el periodo de evaluación en los cuales están distribuidos entre 68,42 y 760,80 litros mensuales entre los valores más bajos y altos.

Tabla 17. *Escorrentía media en litros mensuales (l/mes) de la microcuenca del río Ambi comprendida entre el período 2006 hasta 2015*

Meses	Escorrentía media (l/mes)
Enero	68,42
Febrero	110,77
Marzo	129,84
Abril	540,46
Mayo	528,66
Junio	196,15
Julio	294,50
Agosto	135,24
Septiembre	249,63
Octubre	256,22
Noviembre	760,80
Diciembre	471,09

En la investigación de Corponariño (2007), menciona que al cuantificar la escorrentía superficial de la cuenca se está estimando la oferta de agua superficial de la misma. De esta forma se procedió a determinar los caudales medios mensuales en m³/s.

4.1.2.6. Caudales

Se obtuvo los caudales promedios (Tabla 18) en m³/s para el área total de la microcuenca de estudio, en donde se evidenció los meses con mayor y menor caudal siendo así estos los meses de noviembre y enero respectivamente.

Tabla 18. *Caudales medios mensuales (m³/s) de la microcuenca del río Ambi comprendida entre el período 2006 hasta 2015*

Meses	Caudal medio (m³/s)
Enero	8,82
Febrero	15,29
Marzo	16,19

Abril	69,65
Mayo	65,93
Junio	25,28
Julio	36,73
Agosto	16,87
Septiembre	32,17
Octubre	31,95
Noviembre	98,05
Diciembre	58,75

La distribución de precipitaciones está marcada por una época húmeda con abundantes lluvias durante los últimos meses del año, seguida por una época seca que empieza a partir del sexto mes (Sabas y Paredes, 2009). La precipitación mensual promedio en la microcuenca del río Ambi se registra en el mes de abril el mayor índice de precipitación mensual (129,76 mm de lluvia).

De acuerdo con los mapas de isotermas mensuales, en general en toda la microcuenca no se registran diferencias representativas de temperatura entre la época lluviosa y la época seca, en gran parte este patrón se debe a que la microcuenca no ha sido mayormente intervenida, es decir la cobertura vegetal se mantiene en buen estado de conservación y permite mantener estable la temperatura (Scanlon et al. 2002).

Los valores obtenidos establecen que existen temporadas en donde los caudales tienden a disminuir su aporte de recurso hídrico a la cuenca (Rosales, 2012), sin embargo, se considera que el caudal mensual no está sujeto a la precipitación en ese mes, sino que se almacena alrededor de 3 meses anteriores dependiendo de la capacidad propia de la cuenca para regular el flujo a través del almacenamiento de agua en sus diferentes formas del ciclo del agua (Bievre y Coello, 2008).

4.2. Demanda hídrica de la microcuenca del río Ambi

4.2.1 *Uso de agua para consumo humano*

Del banco nacional de datos del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica se obtuvo los principales actores sociales adjudicados una autorización de agua distribuida en la Tabla 19.

Tabla 19. *Actores dentro del area de influencia del area de estudio*

Actor social	Número de actores
Municipios	3
Juntas Administradoras de Agua Potable Comunitarias	25
Juntas Administradoras de Agua Potable y Saneamiento	18
Asociaciones	9
Barríos	4
Compañías	4
Comunas y comunidades	130
Cooperativas	7

Fuente: (MAAE, 2019)

Los usuarios de uso de agua con mayor caudal registrado son las empresas públicas que administran el agua, quienes cuentan con autorizaciones de 135, 51.52 y 200 l/s para los cantones de Otavalo, Cotacachi y Antonio Ante respectivamente, de acuerdo con los expedientes de autorización de uso de agua para consumo humano.

4.2.2 *Uso de agua para riego y abrevadero de animales*

Se determinó los actores sociales con autorización de uso de agua para regadío y abevaderos de animales (Tabla 20), mediante el banco de datos de Ministerio del Ambiente y Agua, se pudo identificar que el mayor número de autorizaciones están administradas por las juntas de agua de riego.

Tabla 20. *Actores con autorizaciones de riego*

Actor social	Número de actores
Asociaciones	9
Barríos	2
Compañías	20
Comunidades	46
Cooperativas	4
Empresas	2
Haciendas	5
Juntas de aguas	54
Demas usuarios	142

Fuente: (MAAE, 2019)

La presión del recurso hídrico a través de la demanda por uso de riego se evidencia por el número total de autorizaciones emitidas y la cantidad de recurso hídrico que se usa para las actividades productivas y de soberanía alimentaria a lo largo de la microcuenca del río Ambi.

4.2.3 *Uso de agua productivo o industrial*

Se determinó en la base de información del Banco Nacional de Autorizaciones del Ministerio del Ambiente y Agua, que se entregaron 49 autorizaciones de uso productivo (Tabla 21), las cuales están distribuidas en 6 usos diferentes de agua. Cabe recalcar que el caudal autorizado total es de 10103,87 l/s para uso productivo.

Tabla 21. *Actores con autorizaciones de uso productivo.*

Actor social	Número de actores
Balneología	2
Fuerza mecánica	4
Hidroeléctrica	8
Industrial	22
Piscícola	12
Termal	1

Fuente: (MAAE, 2019)

El caudal de uso productivo que se determinó fue en su mayoría en la industria de generación eléctrica, este uso es de carácter no consuntivo. Sin embargo, el uso del agua en la industria tiene un valor representativo y al igual que en el estudio de (Carchi, 2015), el uso del recurso hídrico en este sector productivo de industria es de carácter consuntivo y se lo contabiliza para la determinación del índice de eszaces.

4.2.4 Caudales autorizados

Los caudales autorizados para los diferentes usos de agua se emplearon para estimar el caudal que demanda el área de estudio (Tabla 22), sin embargo, se tomó en cuenta el agua que regresa al sistema en las actividades no consuntivas como la actividad piscícola.

Tabla 22. Caudales autorizados por uso de agua

Uso	Caudal (l/s)
Consumo Humano	1280,44
Riego	9926,40
Abrevadero	10,08
Industrial	4548,20

Fuente: (MAAE, 2019)

El caudal total autorizado en la microcuenca del río Ambi es de 15,77 m³/s, este valor se empleará para determinar el balance hídrico y se lo restará a cada caudal mensual obtenido en la oferta hídrica anteriormente. En el balance hídrico de la cuenca del río Machángara (Carchi, 2015) se desestimó el consumo de agua destinado para la generación eléctrica ya que este uso al ser no consuntivo vuelve al cauce natural., de igual manera que el uso de agua en la generación eléctrica en la cuenca del río Ambi no se lo contabilizo para la determinación de la demanda hídrica.

El uso de agua consuntivo predominante en la cuenca del río Ambi está destinado a la actividad agrícola, pues representa el 62,96% del caudal utilizado,

ejerciendo así la mayor presión sobre el recurso hídrico (García, 2009), seguido por el uso en la industria de 28,85%, el uso de consumo humano con un 8,12% y finalmente el uso para abrevaderos de animales con un 0,06%.

La alta presión hídrica que se ejerce sobre la microcuenca del río Ambi es producto del riego en la actividad agrícola, debido a la gran cobertura de suelo que presenta la microcuenca destinada para la siembra de cultivos como maíz, cebolla, hortalizas y particularmente pastizales para consumo del ganado, el cual implica una ganadería semi-intensiva e intensiva. Corponariño (2007), plantea llevar a cabo la construcción de infraestructura complementaria como reservorios de agua para almacenar y proveer de agua a los sembríos en la cuenca hidrográfica.

La cuenca del río Ambi ha experimentado cambios a lo largo de los años sobre todo en su cobertura vegetal, todo esto debido a un mayor apogeo de la actividad agrícola y florícola, principalmente en las áreas con presencia de asentamientos humanos, lo que supone una mayor demanda hídrica para abastecer con el riego para las tierras que se encuentran cultivadas. Sabas y Paredes, (2009) evidenciaron y registraron similar situación en la cuenca del río Quindío, aquí el uso del suelo mostró una evolución estrechamente ligada al proceso económico mediante la agricultura y ganadería desde la época de la colonización.

La demanda y la oferta hídrica se ven afectadas por la calidad del recurso hídrico, debido a que gran parte del agua generada en las cuencas hidrográficas suele ser usada para el uso doméstico, por lo que, de llegar a existir problemas de contaminación, se restringiría su uso. Por ejemplo, en el estudio realizado en el río Sarapiquí, Costa Rica, se determinó al recurso hídrico como no potable en cuanto a la calidad biológica (coliformes totales, fecales y potabilidad), debido al alto grado de contaminación bacteriana. Los usuarios del recurso hídrico han coincidido que el río ha experimentado cambios en poco tiempo, principalmente por la sedimentación en los cauces, la disminución de agua en pozos, quebradas y nacientes, y la deforestación de las riberas, las causas actuales y potenciales de degradación obedecen a la existencia de características biofísicas y antropogénicas

particulares que afectan tanto la calidad como la cantidad de agua aprovechable (Pacheco, 2012).

Por otra parte, la cuenca del río Ambi, es considerada como un lugar de interés hidrológico, debido a la cantidad de fuentes de agua que se encuentran en la cuenca, mismas que de llegar a ser afectadas por los factores mencionados anteriormente las actividades y usos del recurso estarían comprometidos para su acceso seguro en cantidad y calidad. Cabe mencionar que varios asentamientos humanos que se encuentran cerca de las fuentes hídricas suelen tener problemas de acceso al agua debido a los factores de presión antrópico (Jácome, 2015).

4.3. Modelación del balance hídrico de la microcuenca del río Ambi

Para la aplicación del modelo del balance hídrico en la microcuenca el río Ambi, es necesaria la información general de la cuenca. Estos valores se los obtuvo con el tratamiento de información como se muestra en la Tabla 20.

4.3.1 Determinación del número de curva de la microcuenca del río Ambi

El valor del número de curva para toda la microcuenca del río Ambi (Tabla 23), se obtuvo mediante el mapa del tipo de suelos aplicando la metodología del SCS.

Tabla 23. *Datos empleados para el modelamiento hidrológico HEC-HMS en la microcuenca del río Ambi*

Dato	Simbología	Valor
Curva Número	CN	69,49
Tiempo de Concentración	Tc	4,67 h / 168 min
Tiempo transcurrido desde el centro de gravedad (60% del Tc)	Lag Time	66
Abstracción inicial	P0	28,19169

Se identificó suelos francos, arcillosos y limosos en la parte alta de la microcuenca, esta información se ratifica de acuerdo con el estudio realizado por Gómez (2019), determinando que los tipos de suelo de la microcuenca del río Ambi,

tienen origen ígneo, estos suelos poseen textura arenosa, limos y franco-arenosa, y están localizados en la parte alta y baja de la microcuenca.

Los tipos de suelos encontrados en la microcuenca del río Ambi son similares a los suelos obtenidos en el estudio de Andrade (2016), quienes realizan una propuesta de manejo en dos quebradas ubicadas en el cantón Antonio Ante las mismas que son parte de la microcuenca.

4.3.2 División de las microcuencas

Para obtener los datos necesarios para la modelación en el software HEC-HMS se obtuvo como resultado 5 microcuencas (Figura 13), los parámetros obtenidos del análisis de la información en ArcMap muestran el Número de Curva a partir de la relación del tipo de suelo y el uso de la cuenca. Mientras que para el método de transformación lluvia-escorrentía se empleó el Hidrograma Unitario del SCS, este hidrograma unitario emplea un solo parámetro (*Lag time*), que se obtuvo a través del 35% del tiempo de concentración en las subcuencas del área de estudio (López et al., 2012).

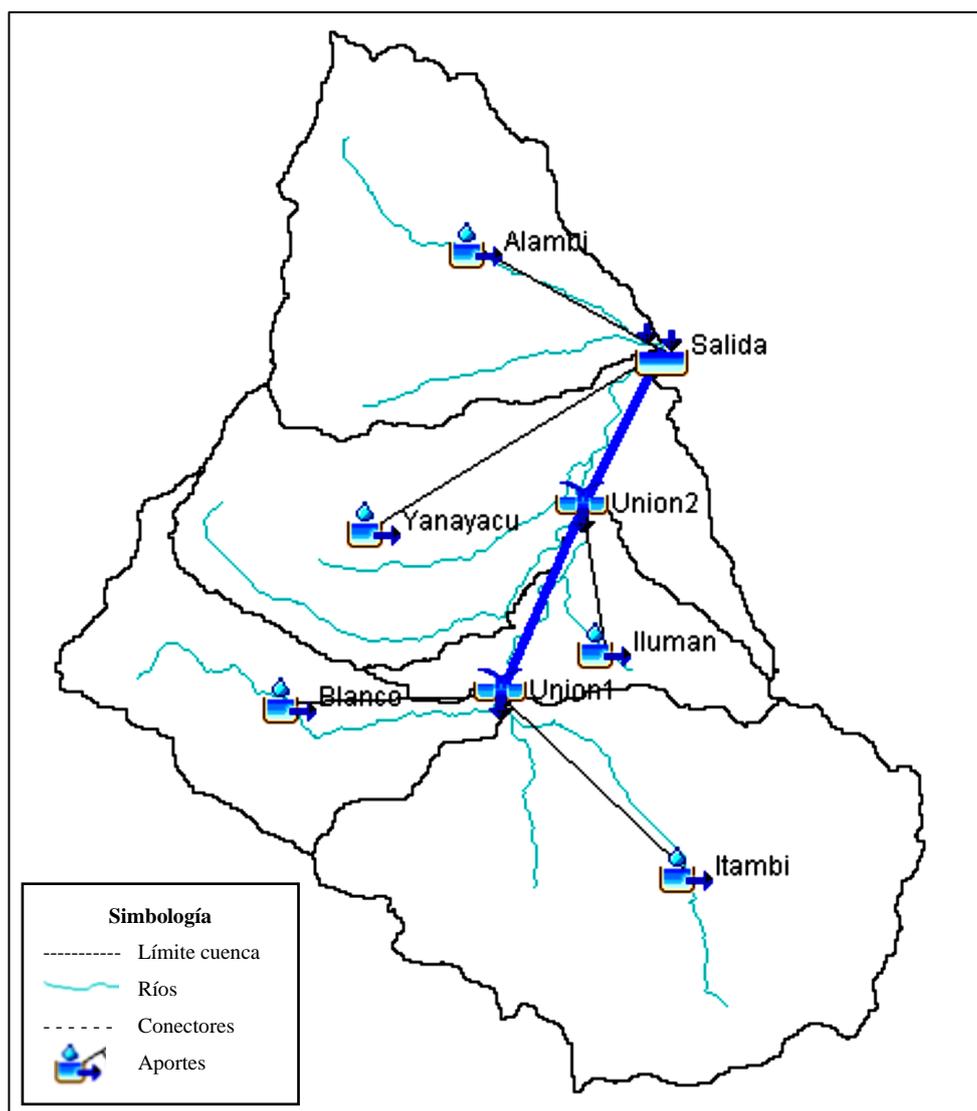


Figura 12. Modelo Hidrológico Conceptual (MHC) de la microcuenca del río Ambí

Las subdivisiones de la microcuenca del río Ambí se establecieron a partir de la red de drenaje que fue la delimitación que proporcionó el software ArcMap, dando como resultado el área de cada una en (km²) Tabla 24.

4.3.2.1. Determinación de la curva número de las subdivisiones

Los datos de curva número para cada división de microcuenca representan la evaluación de la textura del suelo, capacidad de impermeabilidad y de las características físicas del suelo como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. *Tabla de Curva Número y porcentaje de impermeabilidad*

División de microcuencas	Área km²	CN	Impervious %
Alambi	136,32	70,26	1,41
Yanayacu	146,04	80,24	1,24
Iluman	49,25	82,64	1,21
Blanco	86,37	73,35	1,35
Itambi	225,29	77,98	1,28

Los valores de la curva número determinan el tipo de suelo, por ende, el valor más bajo representa a suelos de tipo C, mientras que los valores más altos corresponden a suelos de tipo D. Los suelos tipo C se caracterizan por estar cubiertos de cobertura vegetal mientras que los de tipo D son sueños desnudos o sin vegetación (Días y Mercado, 2017). Estos resultados se ratifican con los datos obtenidos en Carrera et al., (2017) en donde determinaron que la subcuenca del río Ambi presenta suelo de tipo inceptisoles y gran parte de la subcuenca son suelo de tipo molisoles. La capacidad de escorrentía de la microcuenca depende mucho del tipo de suelo y la vegetación, ya que existe una de densidad alta, la infiltración será mayor y disminuirá la escorrentía (Sabas y Paredes, 2009).

Carrera et al. (2017), determinaron que el número de curva con valores altos en la parte central de la microcuenca se debe a los cultivos agrícolas, mientras que en la parte alta encontraron valores bajos de número de curva por la existencia de bosques, cobertura herbácea y arbustiva. Estos resultados son similares a los del presente estudio bajo el criterio al que llegaron los autores, es importante mencionar que se obtuvo diferentes tipos de número de curva de acuerdo con el tipo de suelos encontrados en la microcuenca del río Ambi.

4.3.3 Modelamiento del cauce superficial con HEC-HMS

Para la simulación de la microcuenca del río Ambi se ingresó en el programa las 5 sub-microcuencas, los ríos y el punto de aforo.

La información meteorológica respecto a la precipitación estuvo registrada en intervalos de tiempo de 24 horas. El resultado obtenido es el caudal durante todo el

tiempo de modelación en la microcuenca del río Ambi, el software presenta un hidrograma de los elementos de la microcuenca y un cuadro resumen donde indica el caudal generado (Carrera et al., 2017). La información necesaria para la aplicación del modelo en el software se determina en la siguiente Tabla 25:

Tabla 25. *Parámetros iniciales para el modelamiento de las subdivisiones hidrográficas*

Subdivisiones hidrográficas	Área km²	CN	AI	IP %	TC (min)	TR (min)
Alambi	136,32	70,26	21,50	1,41	2,89	173,40
Yanayacu	146,04	80,24	12,51	1,24	4,25	255,00
Iluman	49,25	82,64	10,67	1,21	2,80	168,00
Blanco	86,37	73,35	18,46	1,35	3,31	198,60
Itambi	225,29	77,98	14,34	1,28	3,71	222,60

NC: Número de curva; AI: Abstracción inicial; IP: Impermeabilidad TC: Tiempo de concentración; TR: Tiempo de retardo.

4.3.4 Calibración del modelo hidrológico

En la simulación del modelo los valores de recesión no presentaron cambios en la optimización, mientras que los valores de la curva número fueron optimizados por el software. En la siguiente tabla se presenta los nuevos valores de los parámetros.

Tabla 26. *Valores optimizados de los parámetros del método de Curva Número*

Elemento	Parámetro	Valor inicial	Valor optimizado
Blanco	SCS - Curve Number	68	78.833
Itambi		77.98	80.518

Se realizó una nueva corrida de calibración del modelo donde se obtuvo el hidrograma de la prueba de calibración como se puede observar en el siguiente gráfico:

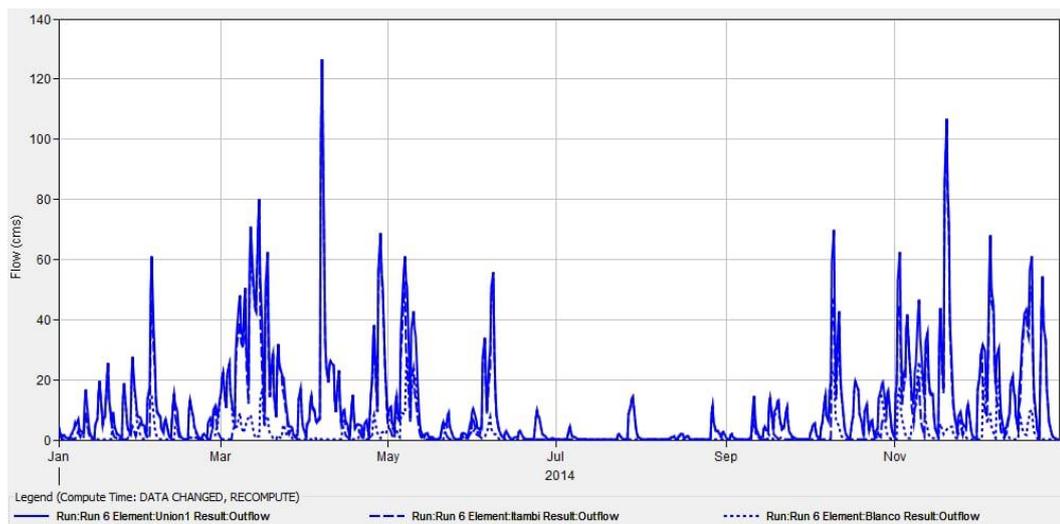


Figura 13. Hidrograma de la prueba de calibración.

El caudal observado tiene relación con el caudal simulado, por lo que realizar un análisis estadístico para su comprobación resulta adecuado.

Sin embargo, para efectos de una nueva corrida los valores fueron ajustados de la curva número y con valores más cortos de análisis de precipitación, el modelo pueda ser nuevamente ajustado.

A continuación, se muestra un resumen de los valores obtenidos después de la calibración (Tabla 27):

Tabla 27. Resultados de la calibración del modelo hidrológico.

Resultados calculados	Pico de descarga:	12,8(m ³ /s)	Fecha/Tiempo del pico de descarga:	14may2011, 00:00
	Precipitación volumen:	376,28 (mm)	Volumen de escorrentía directa:	228,45 (mm)
	Pérdida de volumen:	147,87 (mm)	Volumen de flujo base:	179,84 (mm)
	Exceso de volumen:	231,25 (mm)	Volumen de Descarga:	423,82 (mm)
Hidrograma del caudal observado	Pico de descarga:	10,5 (m ³ /s)	Fecha/Tiempo del pico de descarga:	14may2011, 00:00
	Error medio:	0,9 (m ³ /s)	Error RMS:	1,6 (m ³ /s)
	volumen:	368,27 (mm)	volumen Residual:	92,14 (mm)
	Nash-Sutcliffe: 0,786			

Los valores calibrados del presente estudio se encuentran dentro de los parámetros aceptables de acuerdo con el coeficiente Nash-Sutcliffe de se puede

observar en el coeficiente de no se encuentra dentro de los parámetros aceptables para este modelo. De acuerdo con el estudio de Cabrera (2017), que evalúa el modelo HEC-HMS para una simulación de una cuenca de páramo, se puede observar que todos los parámetros del programa fueron calibrados ya que se utilizaron los que vienen por defecto, los valores calibrados del estudio mencionado dan un valor de 0,65 al coeficiente *Nash Sutcliffe*, lo que indica que el ajuste entre sus caudales es muy bueno. Para la presente investigación el coeficiente tiene un valor de 0,786, lo que indica que el ajuste también es muy bueno. Lo mencionado muestra que los valores de caudal simulado y observado tienen una relación aceptable, lo que permite realizar pruebas de validación y simulaciones para periodos de tiempo diferentes.

4.3.5 Validación del modelo hidrológico

Una vez calibrado el modelo generado, se validó usando datos de caudales de un periodo diferente de tiempo, en este caso se realizó tomando en cuenta los meses de enero a junio del 2011, bajo los mismos parámetros iniciales en la calibración, como se muestra en la Figura 13:

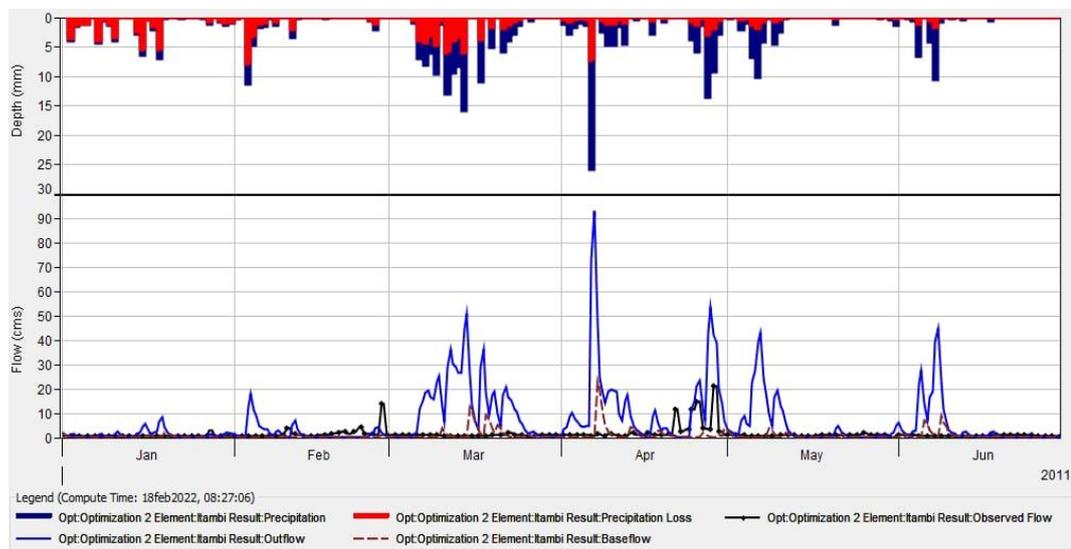


Figura 14. Hidrograma de la prueba de validación

Con el hidrograma obtenido se aplicó el criterio de Nash-Sutcliffe donde se obtuvo como resultado un valor de 0,674 y de acuerdo con los valores de Molnar (2011), la validación del modelo tiene una buena aceptación.

En la siguiente Tabla 28 se muestra el resumen de la prueba de validación del presente modelo:

Tabla 28. *Resultados de la validación del modelo hidrológico*

Resultados calculados	Pico de descarga:	18,2(m ³ /s)	Fecha/Tiempo del pico de descarga:	24sep2011, 00:00
	Precipitación volumen:	589,04 (mm)	Volumen de escorrentía directa:	368,71 (mm)
	Pérdida de volumen:	157,03 (mm)	Volumen de flujo base:	292,88 (mm)
	Exceso de volumen:	374,01 (mm)	Volumen de Descarga:	672,65 (mm)
	Hidrograma del caudal observado	Pico de descarga:	12,9 (m ³ /S)	Fecha/Tiempo del pico de descarga:
	Error medio:	1,3 (m ³ /S)	Error RMS:	1,6 (m ³ /S)
	volumen:	768,10 (mm)	volumen Residual:	92,14 (mm)
	Nash-Sutcliffe:	0,674		

La precipitación obtenida fue de 589,04 mm, la cual es proporcional a las precipitaciones obtenidas en el estudio de investigación de Carrera (como se citó en Carrera et al, 2017) ya que en la subcuenca del río Ambi aplicaron métodos de extrapolación con la ecuación en función del área, precipitación media y el periodo de retorno, estos métodos aritméticos y de isoyetas dieron como resultado 788,49mm y 864,25mm respectivamente. Carrera et al, (2017) hace referencia que esta metodología se aplica en base a la extensión de las cuencas evaluadas, y la correlación obtenida en ese estudio es cercano a uno por lo que los datos de validación con el presente trabajo son aceptables.

En la investigación de Tapia (2012) modeliza un área experimental de la cuenca del río Guayas, los valores de validación fueron aceptables debido a que su calibración dio como resultado un valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,64; lo cual indica que el ajuste entre sus caudales es muy bueno. En la presente investigación el coeficiente es mayor con un valor de 0,674 por lo que el ajuste es

bueno. Los valores del coeficiente son diferentes en ambas investigaciones debido a la precisión de las estaciones de las que se obtuvo los caudales observados.

En el caso de la subcuenca del Ambi, los datos observados mostraron algunas inconsistencias, mismas que fueron solventadas con el ingreso de datos de descargas y con la optimización del aporte de agua subterráneas por el método *gridded soil moisture accounting*. Pese a esto los datos observados siguieron mostrando inconsistencias como la falta de respuesta a precipitaciones de gran magnitud y crecidas atípicas en periodos sin precipitación.

Por otro lado, el ajuste es aceptable por lo que los valores de calibración son correctos y estos mismos pueden ser aplicados para cualquier periodo de tiempo en el modelo. Por lo tanto, se puede realizar la simulación de toda la subcuenca del río Ambi y las microcuencas que la forman, como es el caso de la microcuenca del río Chorlaví.

4.3.6 Índice de escasez

El balance hídrico de la microcuenca del río Ambi mediante la oferta y demanda obtenida mediante el tratamiento de la información sistemático en ArcMap, dio como resultado el mes de enero con un déficit de recurso hídrico, mientras que el mes noviembre presenta el mayor superávit de recurso hídrico, esto se debe a la influencia de la esorrentía de los meses previos y de la capacidad de almacenamiento de la microcuenca (Tabla 29).

Tabla 29. *Índice de escasez obtenido del cálculo de la oferta y demanda hídrica manual*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oferta Hídrica (m³/s)	8,82	15,29	16,19	69,65	65,93	25,28	36,73	16,87	32,17	31,95	98,05	58,75
Demanda Hídrica (m³/s)	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77

Balance Hídrico (m³/s)	- 6,95	-0,48	0,42	53,88	50,16	9,51	20,96	1,1	16,4	16,18	82,28	42,98
--	-----------	-------	------	-------	-------	------	-------	-----	------	-------	-------	-------

El balance hídrico obtenido de forma automática en el software HEC-HMS incorporando las entradas y salidas naturales y la demanda de agua de la microcuenca del río Ambi (Tabla 30), no tuvieron mayor grado de diferencia.

Tabla 30. *Índice de escasez obtenido del cálculo de la oferta y demanda hídrica automática.*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oferta Hídrica (m³/s)	8,80	15,27	16,17	69,53	65,81	25,23	36,67	16,84	32,11	31,90	97,87	58,64
Demanda Hídrica (m³/s)	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77	15,77
Balance Hídrico (m³/s)	-6,97	-0,5	0,4	53,76	50,04	9,46	20,9	1,07	16,34	16,13	82,1	42,87

El caudal simulado por Angulo y Saavedra (2018), cuantifica los periodos de precipitación del tiempo evaluado, es así que mediante la calibración realizada con los datos de caudales obtenidos en campo se valida el estudio con un 90%, rango aceptable para el software HEC-HMS.

En el trabajo realizado de Pacheco (2012), sobre modelación hidrológica en cuencas andinas menciona que el modelo de lluvia en escorrentía, logra reproducir los gastos máximos y que presenta un tiempo de pico con errores menores que el 10%, similares resultado obtenidos en el modelo hidrológico de la microcuenca del río Ambi.

Los caudales obtenidos a través del modelamiento hidrológico se contrastan con el estudio de (Angulo y Saavedra, 2018), la cual se observa que el volumen de la

cuenca de recurso hídrico está en los niveles óptimos y no se encuentra con déficit incluso en la época seca de la cuenca, además López et al. (2012) mencionan que, si el comportamiento del caudal superficial es como mínimo 0,9 l/s entonces el caudal es aceptable.

Por otro lado, el balance hídrico del presente estudio se lo puede tomar como positivo ya que los ingresos fueron mayores a los egresos. El modelo de transformación de lluvia en escorrentía del presente estudio va de acuerdo con el principio de la conservación de masa o la ecuación de continuidad (Fleming y Doan, 2009), bajo este principio, cualquier diferencia entre las entradas y las salidas se reflejarán en un cambio en el almacenamiento de agua dentro del área de estudio y si el caudal es positivo la cuenca tiene un superávit de agua mientras que si el caudal calculado es negativo se considera como déficit hídrico (Mejía et al., 2015).

El resultado del índice de escasez fue de 23,8%, corresponde a un nivel medio, lo que se interpreta cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible. En el estudio realizado por el IDEAM, (2010) se determinó los mismos valores por lo cual menciona que es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda hídrica, además se menciona que es menester asignar prioridad a los distintos usos y prestar atención a los ecosistemas acuáticos con el fin de garantizar el aporte hídrico requerido para su existencia.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Los meses de noviembre, marzo y abril son los de mayor incidencia de lluvias, mientras que los meses de julio, agosto y septiembre son los meses más secos a lo largo del año. La oferta hídrica de la microcuenca dio como resultado un caudal promedio de 39.64 m³/s.

El promedio de la demanda de agua en el intervalo estudiado del presente trabajo de investigación fue de 15,77 m³/s dando a entender que es un caudal de alta presión hídrica en la microcuenca del río Ambi debido a que en los meses de enero y febrero genera un déficit hídrico.

El modelo hidrológico de la microcuenca del río Ambi fue aceptable con un valor de 0,674 en el coeficiente de *Nash Sutcliffe*. Mientras que el índice de escasez de la microcuenca del río Ambi determinó que existe un superávit general de recurso hídrico, de acuerdo con el caudal promedio de 23,8 m³/s.

5.2. Recomendaciones

Tomar en cuenta los resultados obtenidos sobre la precipitación y los meses en donde existe una disminución de lluvias con el fin de planificar estrategias de conservación y almacenamiento de recurso hídrico.

Identificar los consumos de agua que se realizan de forma ilegal, usos indebidos de las autorizaciones emitidas por la autoridad competente., además tomar como referencia la pérdida de recurso hídrico que se realiza en los cultivos, plantaciones forestales entre otros, con la finalidad de acercarse a una mayor realidad del consumo de agua y de la presión ejercida sobre los recursos hídricos.

Realizar los balances hídricos en áreas de menor extensión aplicando la misma metodología para determinar de forma puntual la oferta y demanda hídrica y obtener un resultado ajustado a la realidad de cada zona.

Referencias

- Aber, J., Ollinger, S., Driscoll, C., Likens, G., Holmes, R., Freuder, R. y Goodale, C. (2002). Inorganic nitrogen losses from a forested ecosystem in response to physical, chemical, biotic, and climatic perturbation. *Ecosystem* 5, 648-658
- Aguirre, C., y Vizcaino, M. (2012). Aplicación de estimadores de estadísticos y diseños experimentales en investigaciones forestales. *Editorial universitaria*
- Aguirre, M. (2010). *Diseño experimental dentro de un modelo hidrológico*. [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- Aguirre, N. (2007) Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. *Universidad Nacional de Loja*.
- Anaya, O. (2012). Caracterización morfométría de la Cuenca hidrográfica Chinchao, Distrito de Chinchao, provincia Huánuco, región Huánuco, *Tingo María*: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Andrade, D. (2016). *Análisis multitemporal de la cobertura de Páramo en la producción de agua en la Cuenca alta del río Apuela - cantón Cotacachi*. Ibarra, Ecuador.
- Andre, V. y Piedra, P. (2017). Análisis de especies orgánicas e inorgánicas del sistema hidrográfico del río Ambi, a través de modelos unidimensionales y geoestadísticos. (Trabajo de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador.
- Andrews, D. (1972). Plots of High Dimensional Data. *Biometrics*, 28 (1), 125-136
- Angulo, M. y Saavedra, O. (2018). Modelación Hidrológica de la Cuenca Maylenco utilizando HEC-HMS. *Investigación y Desarrollo*, 18 (1), 53-67.
- Arias, p. (2015). *Guía de aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Ejemplos prácticos*. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio

Echeverría. La Habana, Cuba.

Beltrán, G (2010). Apuntes de cuencas hidrográficas SIG. *Universidad Técnica del Norte*. Ibarra, Ecuador

Betancourt, L. y Garnica, C. (2017). *Estudio hidrológico y evaluación de demanda en la cuenca hidrográfica del embalse Tominé*. [Tesis de maestría, Universidad Católica de Colombia].

Bievre, B. y Coello, X. (2008). *Diagnóstico del balance entre oferta y demanda hídrica, Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en la Hoya de Quito*. Quito., Ecuador: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

Blanco, J., Taborda, A., Amortegui, V., Arroyave, A., Sandoval, A., Estrada, E. y Vivas, A. (2013). Deforestación y sedimentación en los manglares del Golfo de Urabá. Síntesis de los impactos sobre la fauna macrobiótica e ictica en el delta del río Turbo.

Breña, A. (2008). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana].

Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bievre, B., y Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of hydrology*, 329(3-4), 413-421.

Cabrera, J. (2017). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].

Camargo, A., Marin, P., Sentelhas, P. y Picini, A. (1999). Adjust of the thornthwaite`s method to estimate the potential evapotranspiration arid and superhumid climates, based on daily temperature amplitude. *Revista Brasileira de Agrometeorología*. 7: 251 - 257

Carchi, E. (2015). Elaboración de un balance hídrico de la cuenca del río

- Machángara. [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca] Repositorio UCUENCA. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/23005/1>
- Cardona, B. (2012). *Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas*. Universidad de San Carlos de Guatemala. San Carlos. Guatemala
- Carrera, D., Sandoval, W., Andrade, V., Piedra, P. y Sánchez, V. (2017). Cálculo de caudales hidrológicos de la subcuenca del río Ambi utilizando el programa HEC-HMS para la comprobación de su aplicabilidad en el Ecuador. En Pérez (Comp), *Ciencias de la Química y Agronomía* (pp. 70-77). México, México: ECORFAM-México, SC.
- Chica, J. (2018). Interpolación spline y aplicación a las curvas de nivel. [Tesis de pregrado, Universidad de Barcelona]. Repositorio UB: <http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/122512/2/memoria.pdf>
- Chow, V., Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Illinois, Estados Unidos: Mc Graw Hil.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos De Teledetección Espacial*. Madrid, España: RIALP.
- CMAOT. (2015). *Plan Hidrológico. Usos y Demandas de Agua*. Andalucía, España. FEDR
- Código Orgánico del Ambiente (COA). (2016). Promulgado por la Asamblea Nacional en el *Registro Oficial N° 983* del 12 de abril del 2007. Quito: Asamblea Constituyente.
- Código Orgánico de Organización territorial, Autonomía y Descentralización del Ecuador (COOTAD). (2010). Promulgado por la Asamblea Nacional en el *Registro Oficial N° 303* del 19 de octubre del 2010. Quito: Asamblea Constituyente.
- Collado, M. (2017). Modelación hidrológica e hidráulica para la estimación de

caudales máximos en el área urbana de Matagalpa, Nicaragua. Universidad San Carlos de Guatemala

CORANTOQUIA. (2004). Estudio de la oferta y demanda hídrica en la cuenca de la quebrada La Aguacatala. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

CORPONARIÑO. (2007). *Propuesta de ordenamiento del recurso hídrico para la Quebrada Miraflores*. Pasto, Colombia. CARN

Díaz, L. y Alarcón, J. (2018). *Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare*. Universidad Católica de Colombia, Bogota, Colombia

Echeverría, L., y Montoya, R. (2015). Disponibilidad del recurso Hídrico en la microcuenca del río Bermúdez. Región Central de Costa Rica. *Observatorio Medioambiental; Madrid, 18, 165-181*.

Erasum, V., Sapriza, G., Failache, N., Gamazo, P., Arcelus, A. y Nardin, A. (2019). Modelación Hidrológica para la gestión del riesgo de inundaciones en subcuencas tributarias al río Uruguay. *Aqua-LAC. 11(1)*. 21-38

Espinoza, Y. (2017). Análisis de vulnerabilidad social por amenaza de flujos de lodo en la parroquia de San Antonio de Ibarra.

Estrada, V. y Pacheco, R. (2012). Modelación Hidrológica con HE- HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería hidráulica y Ambiental*. Vol 33. Pag. 94-105

Faustino, J., Jiménez, F., Velázquez, S., Alpízar, F y Prins, C. (2006). Gestión integral de cuencas hidrográficas, *Turrialba, CR, CATIE*.

Fleming, M. y Doan, J. (2009). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modelling Extension: User's Manual Version 4.2*. California, Estados Unidos: Army

Corps of Engineers, HEC

García, G. (2009). *Análisis del aprovechamiento hidroenergético del río alambi, provincia de pichincha*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Nacional].

García, W. (2013). *El Sistema Complejo De La Cuenca Hidrográfica*. Medellín, Colombia: UNAL

Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez, A., y Besteiro, S. (2008). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. [Tesis de maestría, Universidad de La Plata].

González, A., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, V y López, J. (2011). Análisis del modelo HEC-HMS para la simulación de avenidas del río Arga en Pamplona. Pamplona. España Revista. Ingeniería del agua

Guachamin, W., Cadena, J., Carvajal, J y García, F. (2015). *Cuenca del Río Mira. Mapa de Escurrimiento*. Quito, Ecuador: INAMHI Publicaciones

Gutiérrez, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall.

Hernando, L., Ruiz, A y Solís, K. (2012). Disponibilidad del recurso hídrico en la microcuenca del río Segundo. Región Central de Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central* (Vol. 1, pp. 117-132) San José, Cr: Red Univer5sidad Nacional de Costa Rica

Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C., y Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 31(3), 219-230

Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2010). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2018). *Anuarios Meteorológicos*.

Quito, Ecuador: INAMHI

- Jácome, G. (2017). Propuesta de gestión de los conflictos socioambientales generados por el agua de consumo humano dentro de la microcuenca de la Laguna de Yahuarcocha. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Uso y Aprovechamiento del Agua. (2014). Promulgada por la Asamblea Nacional del Ecuador en el *Registro Oficial N° 305* del 6 de agosto de 2014. Asamblea Constituyente. Quito, Ecuador: MacArthur
- Lind, D., Marchal, W. y Mason, R. (2004). estadística para administración y economía. (11ª edición). Colombia: Algaomega, p, 830.
- López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. y Gimena, F. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca del río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y Proyectos*, 12 (1), 15-30.
- López, W. (2014). Analisis del manejo de cuencas como herramienta para el aprovechamiento sustentable de recursos naturales. *Revista Chapingo series zonas Áridas*, 13 (2)
- MacArthur, R. y DeVries, J. (1993). *Introduction and Application of Kinematic Wave Routing Techniques Using HEC-1*. California, Estados Unidos: Army Corps of Engineers HEC
- Mancini, M., Menduni, G., Rabuffetti, D. y Ravazzani, G. (2003). A Real Time Flood Forecasting System Based on Rainfall Thresholds Working on the Arno Watershed : Definition and reliability analysis. *Mediterranean storms*. 232 (3), 24-31.
- Mas, J., Velázquez, A., Díaz, R., Mayorga, R., Alcántara, C., Bocco, G. y Pérez, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nation wide multidecade spatial database for México. *International Journal of Applied Earth Observation and*

Geoinformation. 5(4): 249-261

Mays, W. (2011). *Water Resources Engineering*. Editorial Wiley. ISBN: 978-0-470-57416-4

Medina, B., Medina, J y Ríos, B. (2010). *Relación precipitación escorrentía*. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Metropolitana].

Mejía, A., Rossel, F., Gironás, J. y Jovanovic, T. (2015). Anthropogenic controls from urban growth on flow regimes. *Advances in Water Resources*, 84 (1), 125–135.

Meneses, G. (2017). *Modelamiento del Servicio Ecosistémico de Suministro Hídrico ante un Escenario Prospectivo de Minería en la Microcuenca del Río Chalguayacu, Cotacachi-Imbabura*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].

Ministerio del Ambiente. (2016). *Áreas Protegidas del Ecuador, socio estratégico para el desarrollo*. Quito, Ecuador: Mentefactura y PFS

Miranda, L., Treviño, E., Jiménez, J., Aguirre, ., González, M., pompa, M., y Aguirre, C. (2013). monitoreo de la deforestación mediante técnicas geométricas en el centro norte de México. *Ciencia UANL*. 16 (4): 43-54

Modclark, A. (2008). *Instrucciones Para Realizar Un Análisis Hidrológico*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña].

Molnar, P. (2011). “Calibration”. *Watershed Modeling. Institue of Enviromental Engineering. Chair of Hydrology and Water Resources Management*. (20) 11, 0-11.

Montoya, S. (2014). *Modelamiento Hidrológico*. Lima, Perú: Gidahatari.

Mora, V., Tarlé, T. y Galbiatti, J. (2009). Morphometric characterization and classification of the bobo river watershed in the Nariño department, Colombia.

Revista Ingeniería e Investigación, (29)3, 97-101.

- Morad, M. y Triviño, A. (2001). Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*. 31 (1), 23-46.
- Mosquera, S., Nieto, O. y Tapia, C. (2015). Humedales para la gente: visiones desde lo local. Bogotá, *Instituto de Investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt*. 98
- Murillo, D., Ortega, I., Pardo, A., Carrillo, J y Rendon, J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. *USBMed*, 3, pp. 62-68.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J. y King, K. (2002). *Soil and Water Assessment Tool*. Theoretical documentation. Verison 2000
- Núñez, M. (2011). La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos. *Revista Virtual REDESMA*, 5(1), 1-12.
- Ordóñez, J. (Eds.). (2011). *¿Qué es Cuenca Hidrológica?*. Editora. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Organización Mundial de las Naciones Unidas, (1992). Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo aprobada en la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Río de Janeiro, Brasil: Organización de las Naciones Unidas.
- Oyarzún, C., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A., y Hervé, P. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosque (Valdivia)*, 32(1), 10-19

- Pacheco, C. y Barrios, A. (2004). Evaluación de métodos de interpolación en la construcción de un modelo digital de elevación con fines hidrológicos: Aplicación en una cuenca Andina de montaña. *Revista Forestal Venezolana*, 48 (2), 118-126.
- Pacheco, R. (2012). Modelación hidrológica con Hec-Hms en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 33 (1), 94-105.
- Peña, C. (2015). Estudio morfo métrico y estimación de caudal de creciente de la Quebrada la calle hasta la desembocadura en río San Pablo del municipio de Guicán Boyacá utilizando el método racional.
- Ramírez, J. (2015). *Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de la Plata].
- Rojas, R. (2002). *Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. Lima, Perú.
- Rosales, E. (2012). *Metodología y estimación del balance hídrico de la cuenca del Usumacinta*. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional].
- Ruiz, T. (2014). *"modelación cartográfica - hidrológica de la cuenca alta del río Tahuando para el manejo del recurso hídrico mediante herramientas SIG"*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Del Norte].
- Sabas C y Paredes D. (2009). Estudio de oferta y demanda hídrica en la cuenca del río Barbas. *Scientia et Technica Año XV*, 42 (1), 405-410.
- Sahagún, F. y Reyes, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central De la Sierra madre oriental, México. *Ciencia UAT* 12(2).

- Salazar, J. (2017). Análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la microcuenca del río Pisque y su incidencia en la producción de agua, provincia de Imbabura
- Sánchez, F. (2008). HEC-HMS, Manual elemental. Universidad de Salamanca, España.
- Sánchez, H. (2010). *Simulación Hidrológica de la Cuenca del Río Alambi en Nanegal frente al Cambio de Uso de Suelo y su Impacto en el Recurso Hídrico*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].
- Sarango, P., Cajamarca, R., Wemple, B. y Delgado, M. (2019). Estimación del balance hídrico de una Cuenca andina tropical. La Granja: *Revista de Ciencias de la Vida*. 29(1). 56-69
- Scanlon, B., Christman, M., Reedy, C., Porro, I., Simunek, J. y Flerchinger, N. (2002). Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions. *Water Resources Research*, 38 (12), 59-65.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M. y Karlovits, G. (2017). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. California, Estados Unidos: United States Government Printing Office.
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan Creando Oportunidades*. <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025-de-ecuador>
- Sistema Nacional de Información. (2014). Servidores WMS con información base del Ecuador, Quito Ecuador.
- Soil Conservation Service. (1986). *National engineering handbook. Section 4: Hydrology*. Washington D.C., Estados Unidos: United States Government Printing Office.
- Tapia, J. (2012). *Modelización Hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en la producción de caudales y sedimentos*. [Tesis de

posgrado, Universidad Nacional de la Plata].

Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *American Geographical Society*. 38: 55-94

Torres, J. (2019). Evaluación del ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen del cantón Loja. Universidad Nacional de Loja. Loja, Ecuador.

Urrutia, M. (2016). *Aplicación del modelo SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la cuenca alta del río San Juan Bajo. La influencia de la actividad minera*. [Tesis de pregrado, Escuela Colombiana de Ingeniería].

Vera, M. (2019). Análisis multitemporal de cobertura vegetal y la implicación del recurso hídrico en la microcuenca del río Yanayacu, cantón Cotacachi. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Ibarra. Ecuador.

Videla, Y. (2013). *Modelación hidrológica de la cuenca alta del río maipo mediante la aplicación del software "cold region hydrological model"*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile].

Wani, S., Sreedevi, T., Reddy, T., Venkateswarlu, B. y Prasad, C. (2008). Community watersheds for improved livelihoods through consortium approach in drought prone rainfed areas. *Journal of Hydrological Research and Development*. 23 (1), 55-77.

Zhong, X. y Dutta, U. (2015). Engaging Nash-Sutcliffe Efficiency and Model Efficiency Factor Indicators in Selecting and Validating Effective Light Rail System Operation and Maintenance Cost Models. *Traffic and Transportation Engineering*, 3 (1), 255–265.

Anexos

Anexo 1. Datos de precipitación y temperatura promedio

1. Matriz de precipitación y temperatura media mensual del intervalo de tiempo de 2006 -2016

Tiempo	Precipitación media mensual (mm)	Temperatura media mensual (°C)
Enero	93,36	13,51
Febrero	94,18	13,23
Marzo	124,98	13,59
Abril	129,76	13,63
Mayo	96,39	13,80
Junio	43,21	13,56
Julio	33,81	13,45
Agosto	28,75	13,45
Septiembre	31,35	13,74
Octubre	96,19	13,62
Noviembre	112,61	13,58
Diciembre	94,37	13,52

Anexo 2. Figuras.

Figura 1. Perfil topográfico longitudinal de la microcuenca del río Ambi

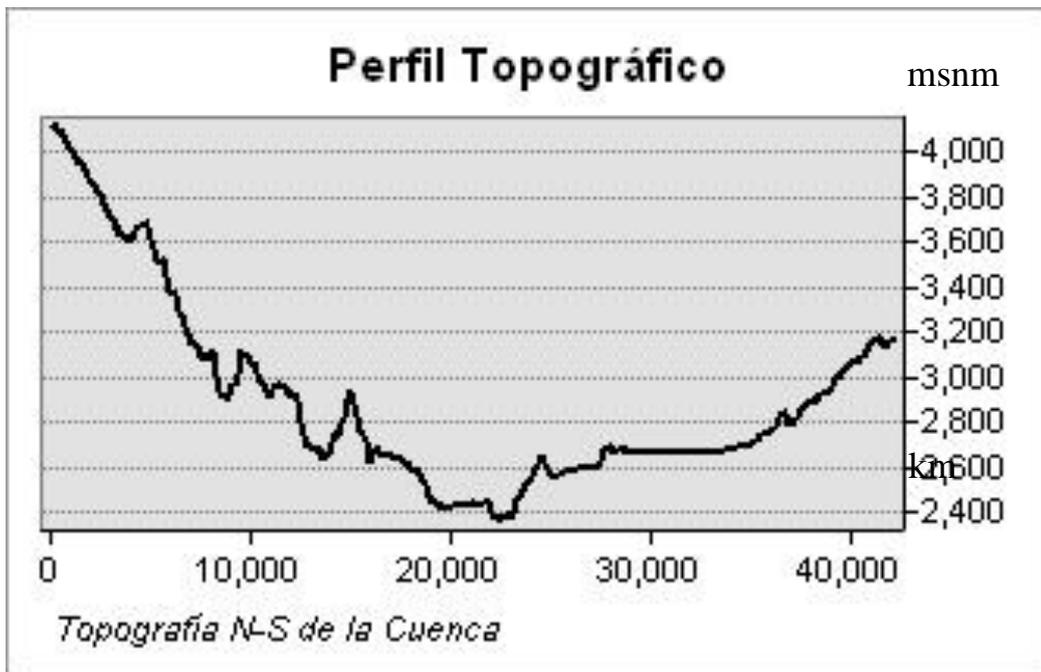
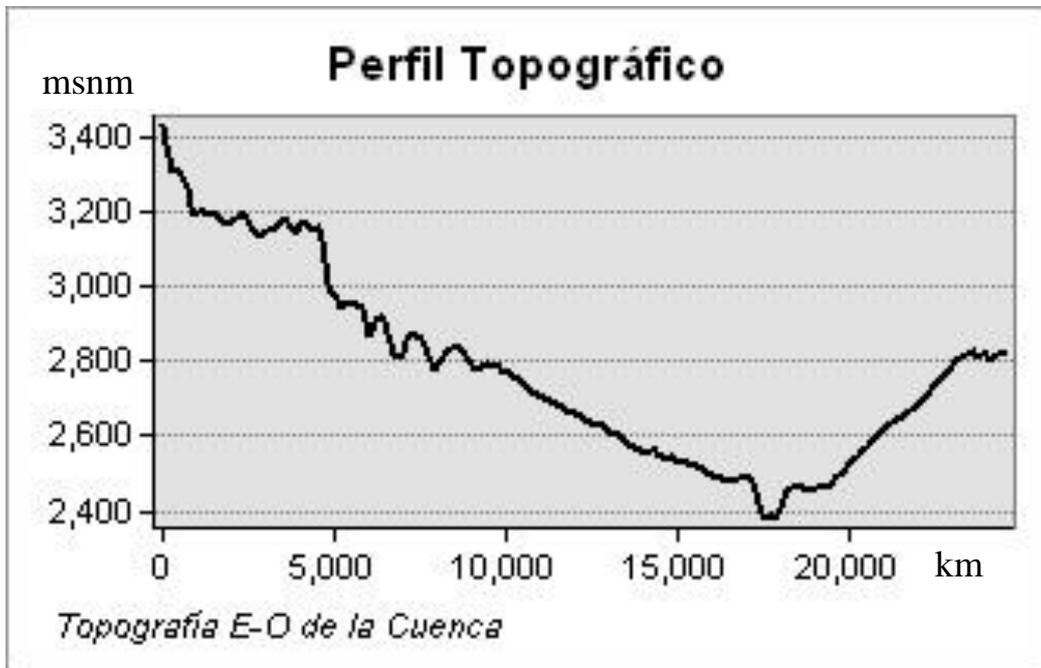
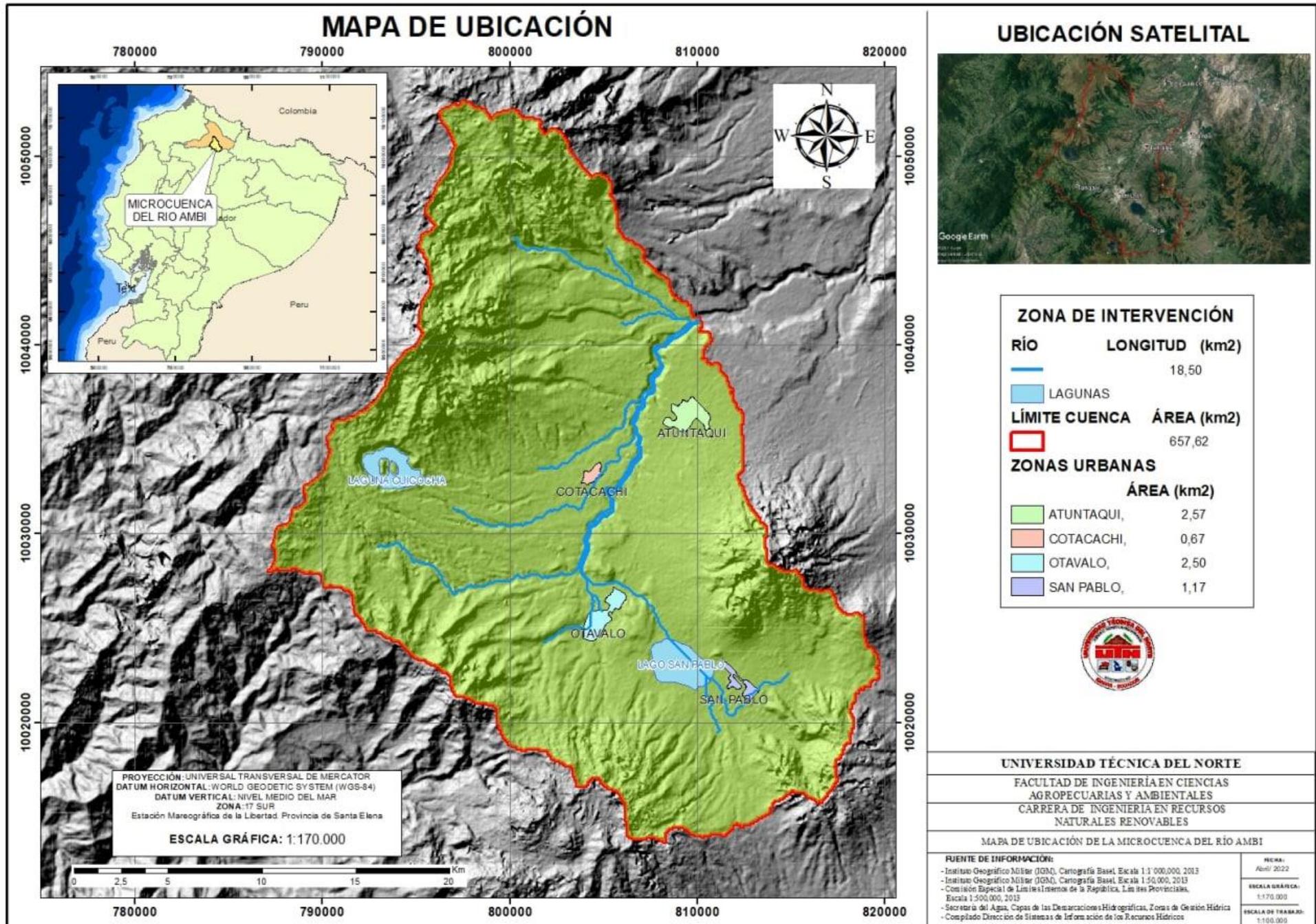


Figura 2. Perfil topográfico transversal de la microcuenca del río Ambi

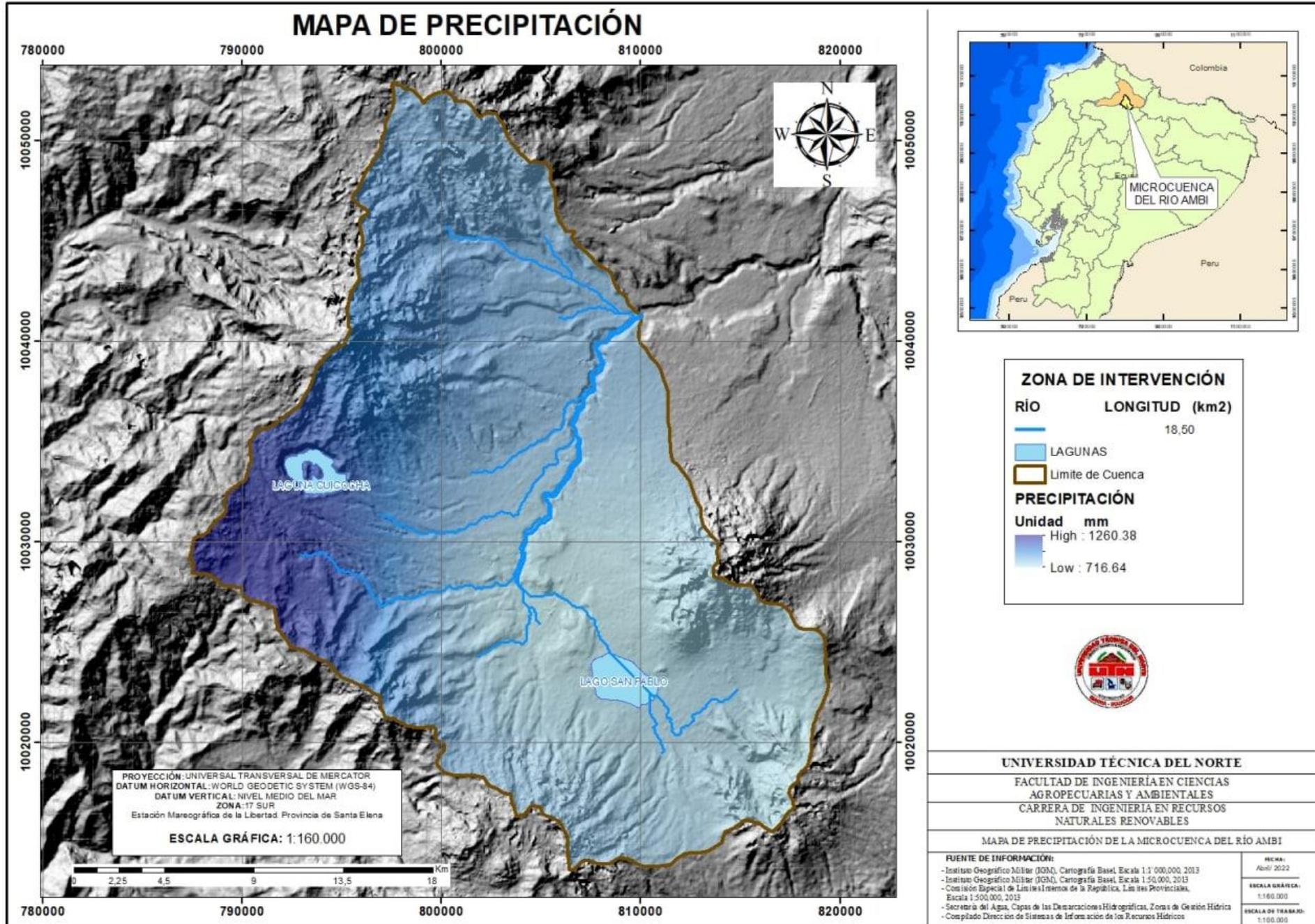


Anexo 3. Cartografía

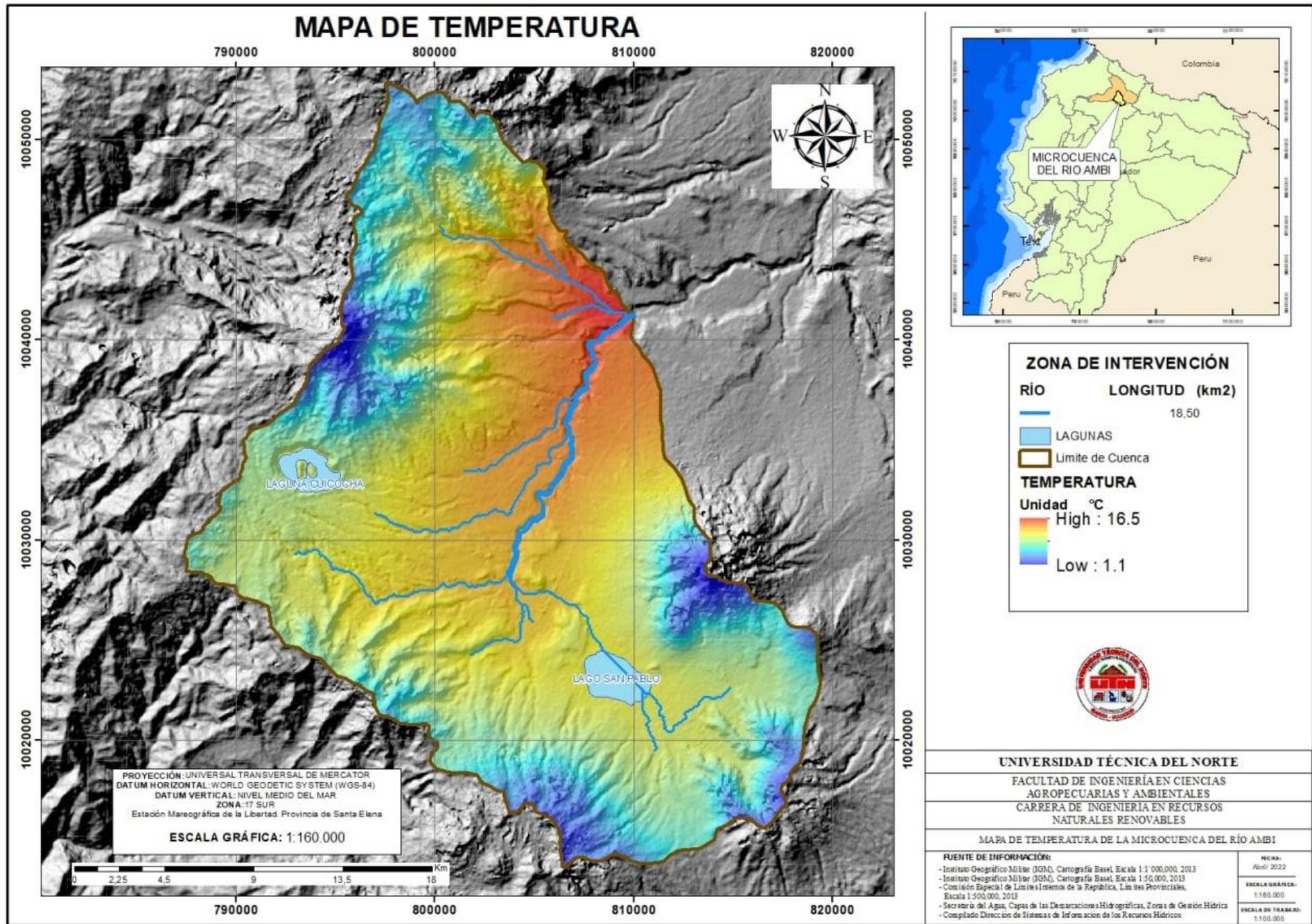
Mapa 1. Ubicación de la microcuenca del río Ambi



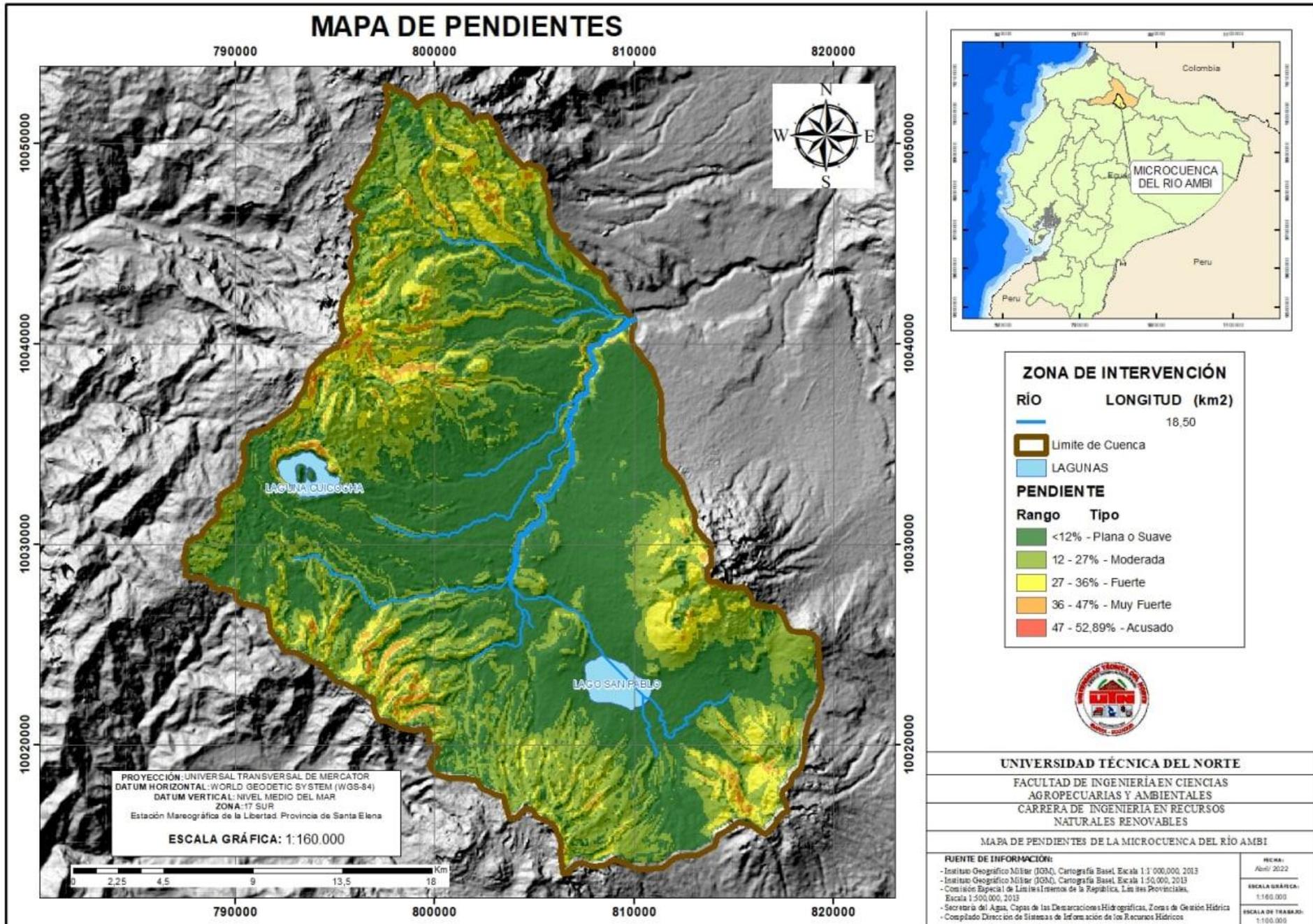
Mapa 2. Precipitación de la microcuenca del río Ambi



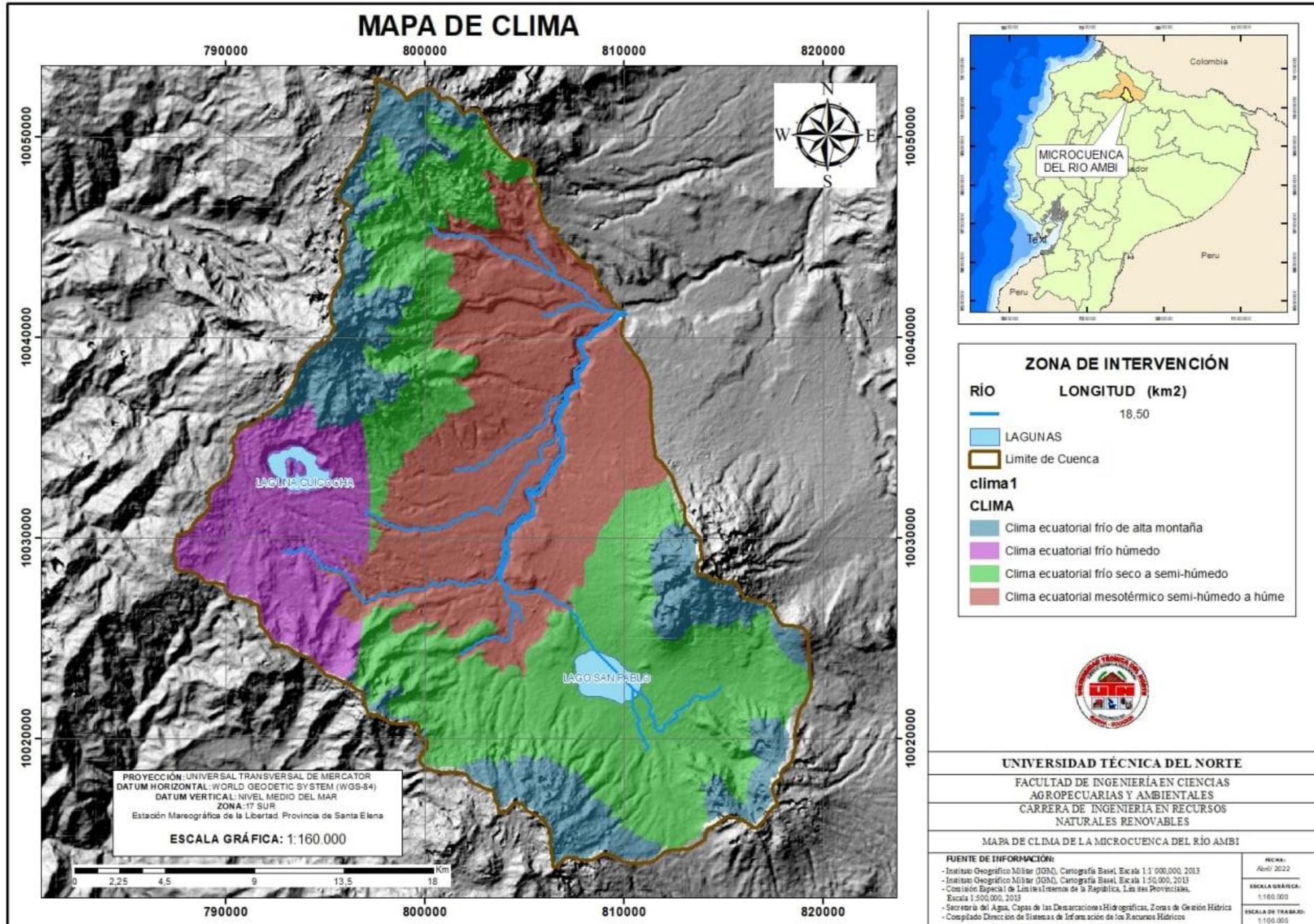
Mapa 3. Temperatura de la microcuenca del río Ambi



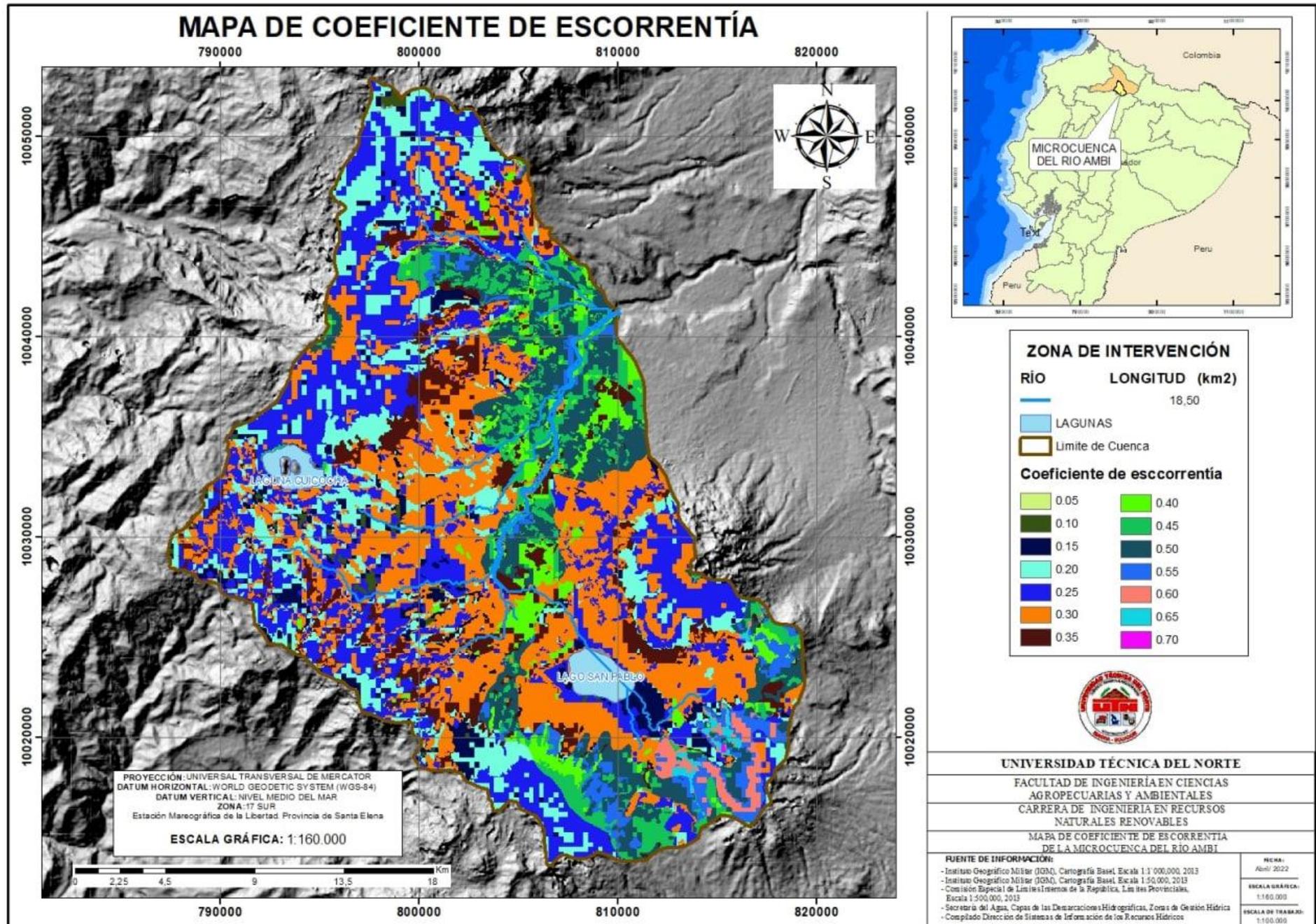
Mapa 4. Pendientes de la microcuenca del río Ambi



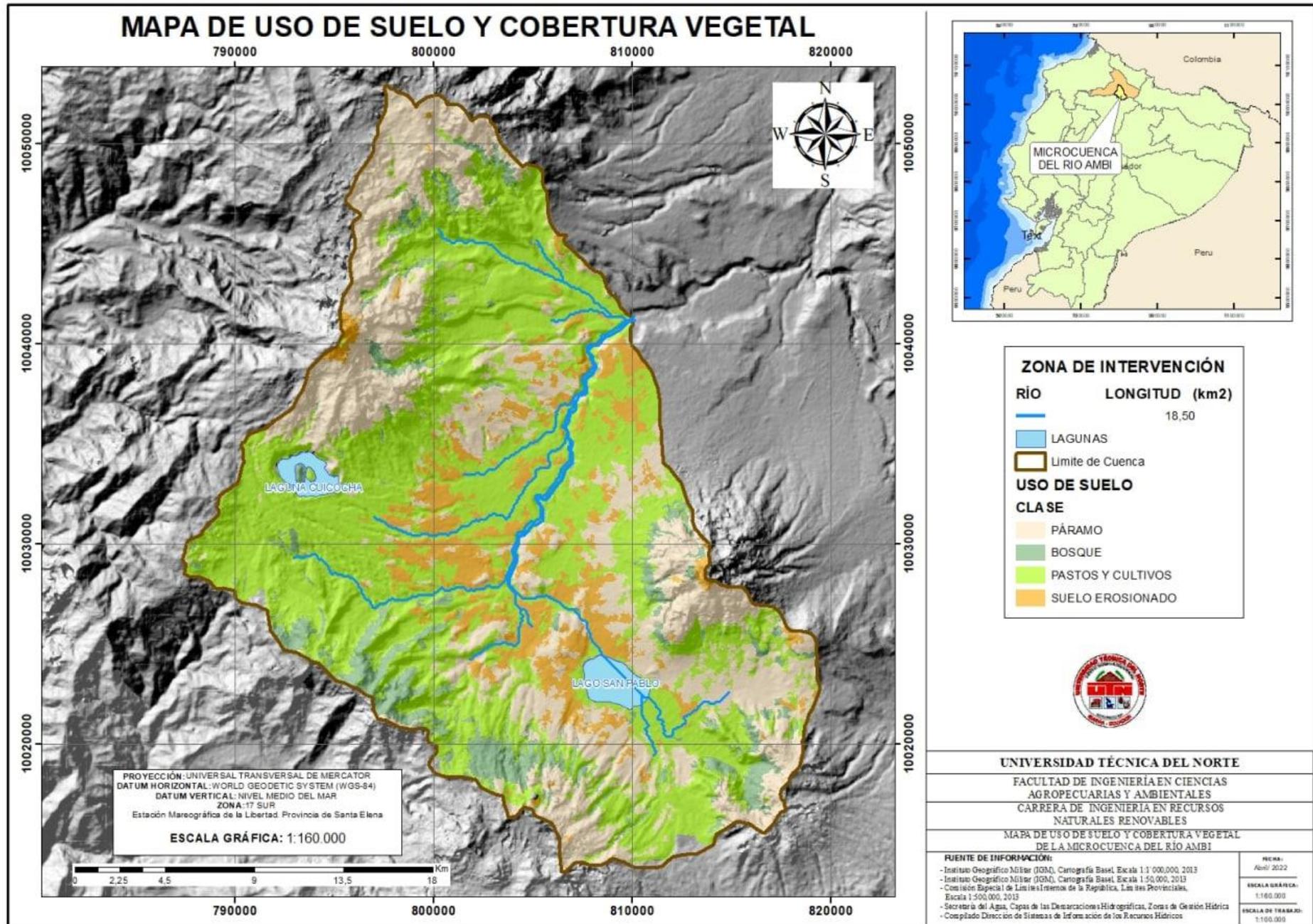
Mapa 5. Coeficiente de escorrentía de la microcuenca del río Ambi



Mapa 6. Coeficiente de escorrentía de la microcuenca del río Ambi



Mapa 7. Uso de suelo de la microcuenca del río Ambi



Anexo 3. Fotografías de campo

Fotografía 1. Identificación de la Vegetación



Fotografía 2. Determinación de los perfiles de la microcuenca



Fotografía 3. Aforo de caudales en el Río Blanco



Fotografía 4. Aforo en la microcuenca del Río Itambi



Fotografía 5. Identificación de caudales de demanda de la microcuenca

