



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

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

**CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES**

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ HÍDRICA EN LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI**

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

AUTOR: EDISON DAVID DÍAZ CHAPUÉS

DIRECTOR: ING. DARÍO PAUL ARIAS MUÑOZ MSC.

SEPTIEMBRE, 2020

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

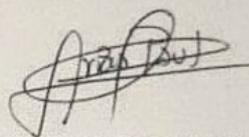
**“DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ HÍDRICA EN LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI”**

Trabajo de titulación revisada por el Comité Asesor, previa a la obtención del Título
de: **INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

APROBADA:

Ing. Darío Paul Arias MSc.

DIRECTOR



.....
FIRMA

Ing. Oscar Armando Rosales MSc.

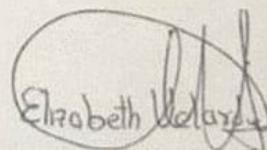
ASESOR



.....
FIRMA

Ing. Delia Elizabeth Velarde Msc.

ASESOR



.....
FIRMA

IBARRA – ECUADOR

SEPTIEMBRE, 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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 de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003755400	
APELLIDOS Y NOMBRES:	DÍAZ CHAPUÉS EDISON DAVID	
DIRECCIÓN:	CARANQUI – CALLE JUANA ATAVALIPA 16-189	
EMAIL:	eddiazc@utn.edu.ec	
TELÉFONO FIJO:	066001336	TELÉFONO MÓVIL: 0983734220

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI
AUTOR (ES):	DÍAZ CHAPUÉS EDISON DAVID
FECHA: DD/MM/AAAA	23/09/2020
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ASESOR /DIRECTOR:	ING. DARÍO PAUL ARIAS MSC.

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 23 días del mes de septiembre de 2020

EL AUTOR:

Nombre: Díaz Chapués Edison David

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por su apoyo incondicional durante cada una de las etapas de mi vida.

A la Universidad Técnica del Norte, institución donde he obtenido conocimientos, valores y he compartido buenos momentos junto con mis compañeros y amigos.

De igual manera agradecer a mi director de Trabajo de Titulación, el Ing. Paul Arias por su apoyo y sobre todo la paciencia durante el desarrollo de esta investigación, sin olvidar a mis asesores Ing. Oscar Rosales e Ing. Elizabeth Velarde quienes con sus observaciones y correcciones han aportado en gran medida a mi trabajo.

David Diaz

DEDICATORIA

A mi familia, mis padres Nubia y Wilson por haberme dado la vida y educarme, mis hermanos, mis sobrinos y primos, todas personas muy importantes en mi vida y que me han brindado su amor y apoyo.

Quiero dedicar este trabajo a una persona que para mí representa el mayor ejemplo de amor, bondad, trabajo y lealtad, a quien más quiero, admiro mucho y es la persona más importante que tengo, mi madre, quien desde el primer día de mi vida ha estado guiando mi camino para ser una mejor persona, me ha enseñado tanto y siempre voy a estar agradecido por tener a la mejor madre del mundo.

A mis grandes amigos, Adriana, Merly, Mirta, Sabrina, Andrés, Rolando, quienes han estado presentes durante todos estos años, y siempre me han brindado su ayuda, consejos y sobre todo con quienes he formado una fuerte amistad.

David Díaz

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO I	14
1.1 Revisión de Antecedentes	14
1.2 Problema de investigación y justificación	6
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Preguntas directrices de la investigación	8
Hipótesis	9
CAPITULO II	10
2.1 Marco teórico referencial	10
2.1.1 Servicios ecosistémicos hídricos.....	10
2.1.2 Oferta y demanda hídrica.....	11
2.1.3 Escasez hídrica.....	11
2.1.3.1 Aspectos de la escasez hídrica	12
2.1.3.2 Indicadores de la escasez hídrica	13
2.1.4 Modelos Hidrológicos.....	14
2.1.5 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	16
2.2 Marco Legal	17
2.2.1 Constitución de la República del Ecuador 2008.....	17
2.2.2 Código Orgánico del Ambiente	18
2.2.3 Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua	19

CAPÍTULO III.....	21
METODOLOGÍA	21
3.1 Descripción del área de estudio	21
3.2 Métodos.....	23
3.2.1 Fase I – Cálculo de la Oferta Hídrica.....	24
3.2.1.1 <i>Delimitación del área de estudio</i>	24
3.2.1.2 <i>Preparación de parámetros edafológicos</i>	26
3.2.1.3 <i>Preparación de parámetros de cobertura de suelo</i>	28
3.2.1.4 <i>Tratamiento de imágenes satelitales</i>	30
3.2.1.5 <i>Preparación de parámetros de clima</i>	30
3.2.1.6 <i>Ingreso de parámetros al software SWAT</i>	32
3.2.1.7 <i>Validación y calibración del modelo hidrológico</i>	34
3.2.1.8 <i>Coefficiente de Nash Sutcliffe</i>	34
3.2.2 Fase II – Cálculo de la Demanda Hídrica	36
3.2.2.1 <i>Preparación de los datos correspondientes a las concesiones de agua emitidas por la Autoridad competente del Agua (SENAGUA)</i>	36
3.2.3 Fase III – Cálculo del Índice de Escasez Hídrica.....	36
3.2.3.1 <i>Determinación del índice de escasez hídrica para la cuenca del río Ambi</i>	36
3.3 Materiales y equipos	39
CAPÍTULO IV.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 Resultados del cálculo de la oferta hídrica en la cuenca del río Ambi para el periodo 1990 - 2017	41
4.1.1 Resultados de la simulación inicial de la cuenca hidrográfica del río Ambi	41
4.1.2 Calibración de datos para la cuenca hidrográfica del río Ambi.....	42

4.1.3 Validación de datos por medio del Índice Nash Sutcliffe	45
4.2 Estimación de la demanda hídrica en la cuenca del río Ambi, para el periodo 1990 - 2017	51
4.2.1 Usos del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Ambi.....	51
4.3 Determinación del índice de escasez hídrica en la cuenca del río Ambi	55
4.3.1 Zonificación del índice de escasez hídrica.....	59
CAPÍTULO V	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
5.1 Conclusiones	68
5.2 Recomendaciones	69
REFERENCIAS.....	70
ANEXOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores de escasez hídrica	14
Tabla 2. Tipos de modelos hidrológicos - determinísticos	16
Tabla 3. Parámetros edafológicos de la cuenca del río Ambi.....	27
Tabla 4. Imágenes de sensores remotos utilizados	29
Tabla 5. Estaciones meteorológicas pertenecientes a la red del INAMHI.....	31
Tabla 6. Codificación de SWAT para el tipo de cobertura vegetal	33
Tabla 7. Valores referenciales para la validación de datos por medio del Índice de Nash Sutcliffe.....	35
Tabla 8. Categorías de acuerdo con el porcentaje del índice de escasez	37
Tabla 9. Materiales y equipos	40
Tabla 10. Resultados de los componentes del Balance hídrico simulados para el período 1990 - 2017	41
Tabla 11. Valores de los caudales promedio simulados respecto a los caudales promedio registrados por la estación hidrológica en el periodo 1990 - 2017	43
Tabla 12. Valores de caudales para la validación en el periodo 1990 – 1996	45
Tabla 13. Valores de caudales para la validación en el periodo 1997 – 2007	46
Tabla 14. Valores de caudales para la validación en el periodo 2008 - 2017	47
Tabla 15. Valores promedio de los caudales simulados y observados para cada periodo de prueba en la cuenca del río Ambi.....	49
Tabla 16. Uso total del recurso hídrico para cada periodo de años en la cuenca del río Ambi	53
Tabla 17. Valores de oferta y demanda hídrica obtenidos para la cuenca del río Ambi	56
Tabla 18. Zonificación del índice de escasez para el periodo 1990 - 1996	60
Tabla 19. Zonificación del índice de escasez para el periodo 1997 – 2007.....	62
Tabla 20. Zonificación del índice de escasez para el periodo 2008 - 2017	64
Tabla 21. Valores del índice de escasez hídrica promedio para las microcuencas del área de estudio (1990 - 2017).....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Ambi	21
Figura 2. Promedios anuales de temperaturas máxima y mínimas, periodo 1990 - 2017.....	22
Figura 3. Precipitaciones medias de la cuenca del río Ambi, periodo 1990 - 2017	22
Figura 4. Modelo digital de elevación DEM	25
Figura 5. Estaciones hidrológicas, ubicadas en el río Ambi.....	26
Figura 6. Textura de suelo de la cuenca del río Ambi	28
Figura 7. Imágenes satelitales sin procesar de los sensores remotos para los periodos 1996, 2007 y 2017.....	29
Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas de acuerdo con el tipo de clima de la cuenca.....	31
Figura 9. Cobertura vegetal referencial para cada periodo de años simulados a través de SWAT	32
Figura 10. Mapa de división por microcuenca en el río Ambi	38
Figura 11. Esquema metodológico de la investigación	39
Figura 12. Valores de los componentes del balance hídrico obtenidos mediante la simulación del modelo hidrológico en SWAT.....	42
Figura 13. Comparación de los valores de caudal simulado respecto al caudal observado en la estación hidrológica Ambi Dj Cariyacu.....	43
Figura 14. Análisis de regresión y correlación de los valores de caudales simulados y observados para el periodo 1990 - 2017	44
Figura 15. Comparación del caudal promedio anual simulado y observado en cada periodo de estudio	50
Figura 16. Mapa de puntos de ubicación de las concesiones de agua en la cuenca del río Ambi	52
Figura 17. Ubicación de las hidroeléctricas y molinos hidráulicos en la cuenca del río Ambi.....	56

Figura 18. Comportamiento de la oferta y demanda hídrica para el periodo 1990 - 2017.....	57
Figura 19. Incremento de las autorizaciones de agua en el área de estudio.....	58
Figura 20. Incremento de la actividad agrícola en el área de estudio.....	58
Figura 21. Incremento del caudal para uso doméstico y riego en el periodo 1990 - 2017.....	59
Figura 22. Oferta hídrica por microcuenca para el periodo 1990 – 1996.....	60
Figura 23. Mapa de zonificación del índice de escasez hídrica para el periodo 1990 – 1996.....	61
Figura 24. Oferta hídrica por microcuenca para el periodo 1997 - 2007.....	62
Figura 25. Mapa de zonificación del índice de escasez hídrica para el periodo 1997 – 2007.....	63
Figura 26. Oferta hídrica por microcuenca para el periodo 2008 - 2017.....	64
Figura 27. Mapa de zonificación del índice de escasez hídrica para el periodo 2008 - 2017	65
Figura 28. Mapa de representación del índice de escasez hídrica por microcuenca del área de estudio para el periodo 1990 - 2017	66

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

“DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ HÍDRICA EN LA
CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI”

Trabajo de titulación

Nombre del estudiante: Edison David Díaz Chapués

RESUMEN

La ausencia del manejo y control integral de las cuencas hidrográficas, sumado a la escasa información en materia de recursos hídricos a nivel nacional como en la provincia de Imbabura, evidencia la falta de investigación en este campo por parte de entidades públicas y privadas. Este estudio, tuvo por objetivo determinar el índice de escasez hídrica para conocer la disponibilidad de agua en la subcuenca del río Ambi en el periodo 1990 - 2017, mediante el modelo SWAT en sistemas de información geográfica. Los valores de caudal y aprovechamiento hídrico se obtuvieron mediante la creación de las Unidades de Respuesta Hídrica y la información de las autorizaciones de agua proporcionada por la SENAGUA. Las HRU se realizaron a partir del procesamiento de datos de: textura, tipo de suelo, cobertura vegetal y los valores de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas del INAMHI. Se identificó ocho tipos de uso del agua, destacando el riego, uso doméstico e industrial. Se obtuvo los valores de oferta y demanda hídrica para los periodos 1990-1996, 1997-2007 y 2008-2017, donde los valores de la oferta hídrica se mantuvieron en un promedio constante de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por periodo, y demanda hídrica aumentó significativamente en los dos últimos periodos con un volumen promedio de 4 a $17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El índice de escasez hídrica para las microcuencas de Alambí, Jatunyacu y Yanayacu fue mayor al 60%. Esto implica que en estas tres microcuencas la demanda hídrica es elevada respecto a la oferta. Mientras que para las microcuencas del río Blanco y Pichaví el índice es menor al 50%, lo que significa que la demanda hídrica es poco apreciable. En conclusión, la subcuenca del río Ambi posee una alta demanda hídrica y por ende una presión sobre el recurso, lo cual significa un aumento progresivo de la demanda frente a un estancamiento de la oferta.

Palabras clave: Oferta, demanda, escasez hídrica

ABSTRACT

The absence of management and integral control of hydrographic basins, added to the scarce information on water resources at the national level as in the province of Imbabura, evidences the lack of research in this field by public and private entities. The objective of this study was to determine the water scarcity index to know the availability of water in the Ambi river sub-basin in the period 1990-2017, using the SWAT model in geographic information systems. The flow and water use values were obtained through the creation of the Hydrologic Response Units and the information on the water authorizations provided by SENAGUA. The HRUs were carried out from the data processing of texture, soil type, vegetation cover, and the precipitation and temperature values of the INAMHI meteorological stations. Eight types of water use were identified, highlighting irrigation, domestic, and industrial use. The water supply and demand values for the periods 1990-1996, 1997-2007, and 2008-2017, remained at a constant average of $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ per period, and water demand increased significantly in the last two periods with an average volume of 4 to $17 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The water scarcity index for the Alambí, Jatunyacu, and Yanayacu micro-basins was higher than 60%, implying that in these three micro-basins, water demand is high compared to supply. While for the Blanco and Pichaví river micro basins the index is less than 50%, which means that the water demand is not appreciable. In conclusion, the Ambi river sub-basin has high water demand and therefore pressure on the resource, which means a progressive increase in demand compared to stagnation of supply.

Key words: Supply and demand, water scarcity index.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Revisión de Antecedentes

El agua constituye un elemento vital para la existencia del ser humano, así como del bienestar del entorno donde éste desarrolla sus actividades sociales y productivas. El desarrollo de estas actividades influye, directa o indirectamente, en las fuentes proveedoras de agua. En las últimas décadas, con la finalidad de producir más alimentos y energía, así como de dotar del servicio de agua potable a una población cada vez más numerosa, la demanda por el líquido ha crecido significativamente (Costa, Domínguez, Rivera y Vanegas, 2005).

La presión excesiva sobre las fuentes de agua puede provocar su deterioro y por consiguiente su desaparición, en este sentido es importante para la planificación sostenible del recurso hídrico conocer la cantidad de agua disponible, los niveles de demanda y las restricciones de uso necesarias para mantener la salud de la fuente abastecedora de agua (Costa et al., 2005). Por tanto, además del aprovechamiento del recurso hídrico para actividades como el consumo humano y las actividades productivas, es necesario que las corrientes abastecedoras mantengan un remanente de agua para atender los requerimientos hídricos de los ecosistemas asociados a sus cauces, preservando así su biodiversidad, productividad y estabilidad (Lux y Rojas, 2005).

Se ha estimado que existen alrededor de $1.4 \times 10^{18} \text{m}^3$ de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% corresponden a agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del mundo. Casi tres cuartas partes del agua dulce están contenidas en los glaciares y mantos de hielo, de los cuales alrededor de 97% son prácticamente inaccesibles para su uso, ya que se encuentran en Antártica, el Ártico y Groenlandia (PNUMA, 2007).

Tomando en cuenta la disponibilidad de los recursos hídricos respecto a la población mundial, destacan diferentes escenarios tales como, Asia tiene el 60% de

la población y sólo el 36% del recurso hídrico, Europa posee el 13% de población y el 8% del recurso hídrico, en África vive el 13% de la humanidad y se dispone del 11% del agua, al contrario, en Centro y Norte América reside el 8% de la población que disfruta del 15% del recurso hídrico. Finalmente, América del Sur tiene únicamente el 6% de la población del mundo, pero posee del 26% de los recursos hídricos, esta gran cantidad de reservas le proporciona a la región una serie de ventajas competitivas, y hasta la fecha solamente el 30% de su potencial ha sido explotado (BID, 2009). Adicionalmente, el recurso hídrico se encuentra distribuido 75% para la agricultura, un 22% para industria y minería, y solo un 4% para el consumo doméstico en las ciudades (Fernández, 1999).

A partir de las estadísticas es importante enmarcar que la gestión de los recursos hídricos debe considerar la relación entre la oferta de estos, con la demanda de la población en función de la utilización que a cada región corresponda (Madróñero, 2006). Los últimos estudios referentes a la cuantificación de los recursos hídricos muestran que la cantidad de agua en el planeta se mantiene constante, pero que sin embargo la calidad se deteriora, dando lugar a una disminución del recurso hídrico en términos de su oferta (Reynolds, 1997; Azqueta, 1994).

A su vez, la demanda del recurso hídrico se incrementa proporcionalmente al crecimiento de la población, lo cual hace suponer que un exceso o déficit de la oferta del recurso hídrico da lugar a un conflicto social (Galarraga, 2000). Acogiendo la idea de que la tendencia de la demanda será siempre a aumentar, llegará un momento en el que la demanda será siempre mayor que la oferta, lo cual podría generar un conflicto socioambiental, ante esto, la única alternativa sería el desarrollo de técnicas eficientes para restaurar el sistema y establecer un equilibrio dinámico entre la oferta y la demanda del recurso hídrico (Barrantes y Vega, 2002).

Diferentes estudios se han realizado alrededor del mundo, por ejemplo, en Chile, de acuerdo con el trabajo de Ferrando (2003), en la cuenca hidrográfica del río Limarí, tomó como base de su estudio la oferta y la demanda del recurso hídrico, y la influencia del comercio con estas variables. La relación oferta-demanda de agua está sufriendo un fuerte desequilibrio que atenta contra la sostenibilidad del modelo exportador. Es así como, mientras la demanda de agua se incrementa

progresivamente, la oferta del recurso hídrico parece reducirse, considerando las tendencias del cambio climático. Relacionando la disponibilidad de recursos, principalmente el hidrológico, con la sostenibilidad del desarrollo, es fundamental contar con una base de recursos sustentable, es decir, sobre la que se apoye y consolide dicho proceso (Ferrando, 2003). También es necesario un manejo de éstos bajo igual óptica, conservando calidad y cantidad en el tiempo.

En Colombia, de igual manera se ha estudiado sobre la oferta y demanda del recurso hídrico por parte del IDEAM (2010), donde el propósito fue determinar en forma general el estado actual y futuro del recurso hídrico del país y sus condiciones de sostenibilidad, a partir de un modelo conceptual sobre los procesos hidrológicos del sistema natural, los balances hídricos nacionales y regionales caracterizando la oferta, la demanda y estimando las restricciones para el uso del agua por presiones sobre la calidad del recurso y por efecto de la regulación hídrica (Costa et al., 2005).

Considerando el estado actual al no existir la suficiente información sobre el recurso, también ha sido necesario plantear proyecciones hidrológicas, pronósticos, etc.; donde es útil la modelación, que partiendo del estado actual puede generar escenarios, proyectando a un nivel futuro el estado y las tendencias actuales del régimen hidrológico (Domínguez, 2000).

La normatividad ambiental colombiana define la reglamentación, como la aplicación conjunta de acciones de orden técnico y jurídico, destinadas a obtener una mejor distribución del agua. En consecuencia, se adelantaron estudios técnicos para conocer el comportamiento de la oferta y demanda hídrica en la cuenca del río Barbas, teniendo en cuenta las características biofísicas e institucionales imperantes en el área de influencia (Paredes y Sabas, 2009). Este tipo de estudios soporta la aplicación de la reglamentación como un instrumento de la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH), que permita su administración eficiente, concentrando esfuerzos de control y vigilancia en las captaciones principales.

En el departamento del Quindío, al occidente colombiano, se encuentra la hoya del río Quindío, en cual se ha estudiado la relación porcentual de la demanda y la oferta hídrica disponible. En el área que abarca el río Quindío la oferta de agua no ha sido

debidamente caracterizada y no han sido reglamentadas todas las corrientes, situación que impide interpretar la realidad para identificar los caudales que pueden ser concedidos para los diferentes usos (León, García y Sandoval, 2011). La demanda se concentra en los centros urbanos, existe una ineficiente administración del agua por parte de las empresas prestadoras del servicio, es evidente el deficiente manejo social del agua y la disminución en la capacidad de regulación de caudales de las corrientes debido a los cambios en el uso del suelo y a la desprotección de nacimientos y partes altas de las cuencas. Los estudios desarrollados por la Corporación Autónoma Regional del Quindío han cuantificado la oferta hídrica en el punto de cierre de cada una de las subcuencas, por lo que ha sido necesario estudiar con mayor detalle la distribución espacial del recurso, ya que existen tramos que se ven afectados por la disminución de caudales en subcuencas que registran un índice de escasez bajo (León, García y Sandoval, 2011).

A su vez, la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), la Corporación Autónoma Regional Valle del Cauca (CVC) y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), han ejecutado un programa de ordenación para la cuenca del río La Vieja, con un enfoque directo en una de las subcuencas, correspondiente al río Cestillal. Tomando los datos actualizados sobre la oferta y demanda hídrica del río Cestillal se ha analizado el indicador del nivel de presión sobre los recursos hídricos (índice de escasez), de tal manera que los resultados obtenidos sean orientados a la atención sobre la problemática regional del recurso hídrico hacia los conflictos por la planificación inadecuada de la ocupación del territorio, al igual que los problemas institucionales para la gestión de un recurso escaso, altamente presionado y de fuerte variabilidad temporal, evaluado como un factor clave para evitar una crisis latente en la gestión local de los recursos hídricos (Sabas y Paredes, 2009).

Otro caso de estudio realizado en Colombia para las direcciones territoriales Tahamíes y Zenufaná de la jurisdicción de CORANTIOQUIA (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia), se hizo la priorización de corrientes a partir del índice de calidad del agua y del índice de escasez, para corrientes receptoras de vertimientos y para corrientes abastecedoras de agua de suministro,

presentándose resultados obtenidos para 22 corrientes abastecedoras evaluadas a través del índice de escasez, y 39 corrientes receptoras de vertimientos evaluadas, mediante el índice de calidad del agua, estos resultados sirvieron como base para la definición de medidas de manejo del recurso hídrico.

En Ecuador estudios similares se han realizado, como por ejemplo el Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en la Hoya de Quito, en donde el diagnóstico del balance entre la oferta y demanda hídrica de la cuenca alta del río Guayllabamba proporciona una información importante sobre la situación actual de los recursos hídricos, necesaria para un proceso de planificación y gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) (FONAG, 2012). Este diagnóstico realizado mediante software ArcGIS con base en la distribución de caudales naturales, forma parte del proceso inicial hacia la GIRH (De Bievre y Coello, 2008).

En la zona sur de Ecuador, correspondiente a la provincia de Loja, se ha trabajado en la determinación del rol de la presión demográfica sobre el recurso hídrico, es decir la relación demanda – oferta hídrica, todo esto relacionado con el desarrollo turístico. Los resultados mostraron una mayor presión demográfica sobre el agua concentrada en un área pequeña del territorio, indicando que la alta concentración poblacional en esta zona, sumado a los factores hidrológicos y climáticos, condiciona a la cantidad de agua disponible y con ello el desarrollo turístico, principalmente de los cantones fronterizos (Arteaga, Massa, Martínez y Viñan, 2017).

De igual manera, considerando el aprovechamiento del recurso hídrico en la zona de la Sierra ecuatoriana, específicamente ligado a la actividad agrícola, se ha realizado un estudio para determinar la eficiencia y disponibilidad del recurso hídrico para el riego de cultivos de la localidad, detectando tanto el déficit como el exceso de agua para determinadas áreas, de forma que se provoca una ineficiencia en el aprovechamiento del recurso, en ocasiones relacionada con la modalidad del reparto equitativo de agua en las comunidades campesinas, mismos que carecen de la asesoría técnica en términos de caudales o volúmenes de agua requeridos (Nieto, Pazmiño, Quishpe y Rosero, 2018).

Adicional se ha realizado un estudio, evaluando los posibles casos de sequía para escenarios presentes y futuros en la cuenca del río Paute, considerando factores como la proyección demográfica, datos de oferta y demanda hídrica, escasez y distribución del agua e índices de sequía. Los valores proyectados indican que para un horizonte cercano, las probabilidades de sequía se presentarían en la cuenca baja, posterior para el 2050 los problemas incrementarían abarcando la cuenca media y baja, y para un hipotético horizonte del 2100 se podría presentar temporadas de sequía hasta en la cuenca alta del río Paute, de esta manera en los mapas elaborados de peligrosidad según la probabilidad de tener déficit de agua en la cuenca, se encontró que tanto temporal como espacialmente existirían déficits mayores en el paso de tiempo (Araneda, 2017).

1.2 Problema de investigación y justificación

Ecuador presenta un amplio panorama de regímenes hidrológicos y de gran heterogeneidad en la distribución espacial del recurso, condicionado por la pluralidad de las condiciones físico-climáticas. Esto último, de hecho, representa ventajas de complementariedad, como es el caso de la generación hidroeléctrica, ya que las épocas de verano en la Sierra y Costa coinciden con las de mayor precipitación en el Oriente, por otra parte, la diversidad geográfica puede generar aspectos poco favorables como son sequías e inundaciones (CEPAL, 2012).

La cantidad de agua disponible en todos los sistemas hidrográficos del país es de 432 km³/año. Ecuador posee 31 sistemas hidrográficos de los cuales 24 pertenecen a la vertiente del Pacífico, con una superficie total de 124 644 km² (49%) y 7 a la vertiente del Amazonas con una superficie de 131 726 km² (51%). Estos sistemas hidrográficos a la vez se encuentran divididos en 79 cuencas hidrográficas: 72 cuencas pertenecen a la vertiente del Océano Pacífico, de las cuales una parte corresponde a áreas costeras con 123 216 km² (48%) y otra parte pertenece a los territorios Insulares aledaños cubriendo 1 428 km² (1%); albergando, a su vez, el 88 % de la población. Mientas siete cuencas pertenecen a la vertiente del Amazonas con 131 726 km² (51%) y el 12% de la población (FAO, 2000).

En el año 2005, las extracciones de agua totales fueron de $9.9 \cdot 10^{12} \text{m}^3$, de las cuales $8 \cdot 10^{12} \text{m}^3$ (81%) son para uso agropecuario, $1.2 \cdot 10^{12} \text{m}^3$, (13%) para uso municipal, y $0.5 \cdot 10^8 \text{m}^3$, (6%) para uso industrial. La alta disponibilidad de recursos hídricos ha evitado la competencia entre sectores productivos, pero la alta disponibilidad de recursos hídricos superficiales y los costos que suponen la extracción de aguas subterráneas ha restringido su utilización para riego (FAO, 2000). La extracción de aguas subterráneas es principalmente para uso municipal e industrial, estimándose en 0.312 km^3 (MAGAP, 2011). Muchos abastecimientos de agua de pequeño tamaño y ubicados en zonas rurales dependen, principalmente, de fuentes de agua subterránea (Cabrera et al., 2012).

El Ecuador se encuentra dividido en dos principales vertientes, del Pacífico y de la Amazonía; las cuales, que, a pesar de poseer una cantidad representativa de recurso hídrico, no tienen una distribución equitativa en territorio. En la vertiente del Pacífico se asienta el 80% de la población, con una disponibilidad del 30% del recurso hídrico, mientras que el 20% de la población asentada en la región oriental se beneficia del 69% del recurso hídrico proveniente de la vertiente amazónica (SENAGUA, 2017).

La Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA, 2011), tiene como misión dirigir la gestión integral (e integrada) de los recursos hídricos de todo el territorio ecuatoriano. Tanto la creación de la SENAGUA, como la Nueva Constitución, marcan el punto de inflexión en la institucionalidad gubernamental para la gestión por cuencas hidrográficas. La Secretaría opera a nivel nacional a través de los organismos descentralizados, en la actualidad existen nueve demarcaciones y en cada una operan centros zonales (Sandoval y Günther, 2013).

El presente estudio que se realizará en la zona de la cuenca hidrográfica del río Ambi busca determinar cuál es el índice de escasez para la disponibilidad de agua en esta cuenca hidrográfica, tomando en cuenta la importancia que representa este servicio ecosistémico hídrico, a través de una evaluación de la oferta y la demanda hídrica, con el fin de establecer lineamientos o estrategias que permitan fomentar un equilibrio para el recurso hídrico con miras en un desarrollo sustentable.

Entre las consideraciones analizadas para realizar la investigación en la cuenca del río Ambi, se toma como aspectos importantes la necesidad de conocer la oferta hídrica que ofrece esta cuenca, así como también su demanda, tomando en cuenta la importancia que representa el río tanto para la parte ecológica, social y económica dentro de las zonas donde se extiende (servicio ecosistémico). La cuenca hidrográfica del río Ambi, al extenderse por los cantones de Cotacachi y Otavalo principalmente se ve expuesta a un control y ordenamiento separado por cada uno de los GADs competentes. Dentro de la cuenca se realizan diferentes actividades correspondientes al servicio ecosistémico hídrico, como, por ejemplo: riego, uso industrial, hidroeléctricas, uso doméstico y recreativo, existiendo irregularidades en el control del caudal utilizado para los usos antes mencionados.

Por otra parte, son pocos los estudios realizados en los valles interandinos del norte del país sobre esta temática (Cerón, Franco, Freire y Peñafiel, 2016), por lo que supone una necesidad la obtención de información del estado actual de los mismos, a fin de plantear y desarrollar planes que aseguren la conservación y uso sustentable de los recursos naturales especialmente el agua.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el índice de escasez del recurso hídrico con el fin de conocer la disponibilidad de agua en la cuenca hidrográfica del río Ambi.

1.3.2 Objetivos específicos

- Calcular la oferta hídrica en la cuenca hidrográfica del río Ambi.
- Estimar la demanda hídrica en la cuenca hidrográfica del río Ambi.
- Zonificar el índice de escasez hídrica por microcuenca de los ríos de la cuenca hidrográfica del río Ambi

1.4 Preguntas directrices de la investigación

¿Cuál es el índice de escasez hídrica en la cuenca hidrográfica del río Ambi?

Hipótesis

- La oferta hídrica en la cuenca hidrográfica del río Ambi cubre la demanda de uso existente.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico referencial

2.1.1 Servicios ecosistémicos hídricos

Se definen como los beneficios que brinda una cuenca hidrográfica los cuales contribuyen al bienestar humano y a la naturaleza (Córdova, De Keizer y Guerrero, 2006). Tomando en consideración su carácter multipropósito e insustituible, el recurso hídrico que fluye a través de la cuenca hidrográfica es posiblemente el servicio más importante que brinda un ecosistema, debido a que de ella dependen desde actividades económicas hasta medios de vida sostenibles (Portilla, 2011).

La disponibilidad de agua en cantidad y calidad está estrechamente ligada al estado de conservación del ecosistema. Este servicio involucra procesos de filtrado, retención y almacenamiento de agua en acuíferos y cauces superficiales., todo esto ligado a las condiciones edáficas de la zona, mientras que la capacidad de almacenamiento está estrechamente relacionada a la topografía y características sub-superficiales del sistema ecológico. (De Groot et al., 2002). Desde la perspectiva humana, los servicios hídricos involucran no sólo la provisión de agua para distintos usos, sean estos de consumo humano, industrial, riego, recreación sino también la regulación de los flujos de agua como fuerzas destructoras y/o contaminantes, como inundaciones, salinización, contaminación de reservas de agua (Carpenter y Postel, 1997; MEA 2003).

La relevancia del concepto de servicio ecosistémico para el manejo de los ecosistemas reside en que estos pueden ser considerados como indicadores de la calidad o capacidad de un ecosistema para la obtención de un beneficio específico dirigido hacia un actor social determinado (Cáceres, Conti, Díaz y Quétier, 2007). Desarrollar indicadores adecuados supone una buena comprensión y cuantificación del vínculo entre los beneficios que proveen los ecosistemas y sus propiedades ecológicas, siendo ese el principal desafío que enfrentan los estudios de los

servicios ecosistémicos para producir resultados relevantes (Kremen, 2005, Boyd y Banzhaf, 2007).

2.1.2 Oferta y demanda hídrica

Es aquella porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo – cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar (CORPONARIÑO, 2007). Usualmente esta porción de agua que escurre por los ríos es denominada por los hidrólogos como escorrentía superficial y su cuantificación conforma el elemento principal de medición en las redes de seguimiento hidrológico existentes en los distintos países (IDEAM, 2010).

La oferta hídrica de una cuenca corresponde al volumen disponible de agua para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre (Bustamante, Otoyá y Vásquez, 2008). Al cuantificar la escorrentía superficial a partir del balance hídrico de la cuenca, se está estimando la oferta de agua superficial de la misma, adicional si existe información histórica confiable de los caudales con series extensas, el caudal medio anual del río es la oferta hídrica de esa cuenca (CORPONARIÑO, 2007).

La demanda hídrica corresponde al cálculo con base en las concesiones de agua que existen a lo largo de cada corriente principal y que tributan a ella, dentro de una cuenca hidrográfica, siendo común que el mayor volumen de agua sea utilizado para el consumo humano, seguido del uso agrícola (IDEAM, 2010).

2.1.3 Escasez hídrica

La escasez hídrica se define como el desequilibrio persistente entre la oferta y la demanda disponible que surge cuando la demanda media es mayor que la disponibilidad renovable a largo plazo. (Krammeyer, 2017).

Por otra parte, Winpenny (1997) define a la escasez de agua como un desequilibrio entre el suministro y la demanda bajo las condiciones existentes de precios y/o disposiciones institucionales; una demanda excesiva para el suministro disponible; un alto nivel de uso respecto al suministro disponible, especialmente si el potencial de suministro que queda es difícil o muy costoso de aprovechar. Abrams (2009), la define como un concepto que describe la relación entre la demanda de agua y su disponibilidad, destacando el hecho de que la demanda varía considerablemente entre distintas regiones y países según el uso sectorial del agua, y subraya que también cambia en función de las condiciones climáticas locales. Existen términos relacionados a la escasez hídrica, donde destacan: desabastecimiento de agua y estrés hídrico

- Desabastecimiento de agua: falta de agua de calidad aceptable; bajos niveles de suministro de agua, en un momento y en un lugar determinados, respecto a los niveles de suministro diseñados, como resultado de recursos hídricos insuficientes, ausencia de infraestructuras o un inadecuado mantenimiento de estas; o bajos niveles de recursos hídricos como consecuencia de diferencias estacionales o anuales en el clima o por muchos otros factores hidrológicos o hidrogeológicos (Molle, 2003).
- Estrés hídrico: los síntomas de la escasez o desabastecimiento de agua, por ejemplo, aumento de la competencia y de los conflictos entre usuarios, empeoramiento de la calidad y fiabilidad del servicio, pérdida de cosechas e inseguridad alimentaria. Este término se usa para describir una gran variedad de circunstancias y causas (Molle, 2003).

2.1.3.1 Aspectos de la escasez hídrica

Se dice que la escasez hídrica sucede cuando no hay agua suficiente para cubrir todas las demandas, incluyendo los caudales ecológicos. Los síntomas de la escasez son degradación severa del medio ambiente, reducción del nivel de aguas subterráneas y distribución del agua que favorece a unos grupos frente a otros.

Actualmente la población mundial ejerce más presión que nunca sobre los recursos hídricos. Entre una población en rápido crecimiento y un clima cambiante, el estrés

hídrico, y por lo tanto el riesgo del agua, está aumentando en todo el mundo. El Objetivo 6 de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS) se centra en el agua, con varios objetivos secundarios relacionados con diferentes desafíos asociados al agua (Krammeyer, 2017).

De acuerdo con los informes emitidos por la FAO (2019), existen tres aspectos que se deben considerar.

- Escasez de la disponibilidad de agua de calidad aceptable con respecto a la demanda agregada, en el simple caso de desabastecimiento de agua física.
- Escasez debida a la falta de infraestructuras adecuadas, independientemente del nivel de recursos hídricos, debido a limitaciones financieras, técnicas o de otro tipo.
- Escasez en el acceso a servicios hídricos, debido al fracaso de las instituciones (incluyendo los derechos legales) encargadas de asegurar un suministro de agua fiable, seguro y justo para los usuarios. Este aspecto reúne los elementos organizacionales y de rendición de cuentas propuestos por el Banco Mundial.

2.1.3.2 Indicadores de la escasez hídrica

Un indicador de escasez hídrica es aquel que refleja el estado del recurso hídrico en relación con una preocupación ambiental, la presión que este soporta y la respuesta social. (Manteiga y Ríos, 2000). El indicador más conocido de escasez de agua a nivel nacional es el agua renovable per cápita, para el que se usan valores umbral de 500, 1 000 y 1 700 m³/ persona/año para distinguir entre distintos niveles de estrés hídrico (Falkenmark y Widstrand, 1992). Según este criterio se considera que un país o una región se enfrenta a la escasez absoluta de agua si los recursos hídricos renovables son <500 m³ per cápita, escasez crónica de agua si los recursos hídricos renovables están entre 500 y 1000 m³ per cápita, y estrés hídrico entre 1000 y 1700 m³ per cápita.

Por otro lado, con el objetivo de captar mejor la relación entre suministro y demanda, el indicador de agua de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)

pretende medir el nivel de presión humana sobre los recursos hídricos basándose en la relación entre la extracción total de agua para agricultura, ciudades e industria y los recursos hídricos totales renovables (FAO-AQUASTAT, 2012) (Tabla 1).

Tabla 1. Indicadores de escasez hídrica

Contexto	Indicador
Recurso hídrico	Volumen total anual de recursos hídricos renovables per cápita o "Water Crowding"
Uso del recurso	Intensidad en el uso de los recursos hídricos
	Volumen de agua extraída por los principales sectores como porcentaje de las extracciones totales
Uso doméstico	Población con acceso a fuentes de agua
Producción de alimentos	Cambios en la productividad del agua en la agricultura de regadío
Producción industrial	Cambios en la productividad del agua en el sector industrial
Producción de energía	Cambios en la productividad de energía hidroeléctrica (producción/potencial)
Degradación de recursos hídricos	Cambios en la calidad de los sistemas de agua dulce (% de muestras por encima o por debajo de los niveles normales/límite)

Fuente: FAO-AQUASTAT. (2012)

2.1.4 Modelos Hidrológicos

Un modelo hidrológico es una simplificación de un sistema natural (Bergström, 1991), permite comprender de mejor manera el comportamiento de los distintos componentes del ciclo hidrológico en una cuenca, convirtiéndose en una herramienta útil en procesos de gestión y planeamiento, tanto de calidad y

disponibilidad del recurso hídrico como de distintos tipos de manejo del suelo, ya que permiten simular escenarios futuros a partir de condiciones actuales. Cabrera (2012), menciona que los modelos hidrológicos pueden clasificarse según sus características básicas de la siguiente manera: a) De acuerdo con la conceptualización de procesos básicos: empíricos, conceptuales o basados en procesos. b) De acuerdo con la naturaleza de los algoritmos básicos: pueden ser determinísticos o estocásticos. c) De acuerdo con su representación espacial: agrupados o distribuidos.

Otra forma para clasificación a los modelos es según sus procesos:

- Modelos conceptuales: usa un gran número de procesos por lo que los procesos físicos pierden claridad y descripción. En este tipo de modelo los procesos físicos se representan tal como son observados. Los parámetros de este tipo de modelos no pueden ser medidos directamente requieren y con frecuencia requieren de calibración. Por lo que una adecuada interpretación física es importante para calibrar el modelo.
- Modelos empíricos: Este tipo de modelos se construye y calibra de acuerdo con las mediciones para el modelo entrada y salida. No presenta una descripción interna además no refleja ninguna estructura de un sistema físico, El modelo empírico puede ser condicionado en el periodo de uso por la calibración. Un inconveniente en este tipo de modelos es la dificultad de proveer una interpretación física de los parámetros.
- Modelos físicos: en donde el enlace entre el modelo de entrada y salida se describe por una serie de ecuaciones matemáticas que representan los procesos físicos. De acuerdo con sus características el modelo SWAT se clasifica en este grupo.

Tabla 2. Tipos de modelos hidrológicos - determinísticos

Modelos determinísticos	Ejemplos
Modelos conceptuales	Modelo ABC
	Modelo HBV
Modelos empíricos	Método Kostikov
	Método Green Ampt
Modelos físicos	TOPMODEL
	TOPKAPI
	SHE
	SWAT

Fuente: Refsgaard y Abbott. (1996)

La evolución de este tipo de modelos han permitido mejorar la representación de los procesos hidrológicos en los últimos años, actualmente el avance tecnológico se ha convertido en una herramienta indispensable para los procesos de simulaciones en espacio y tiempo, como datos digitales, de teledetección y herramientas que permiten medir datos climáticos (Daofeng, Ying, Changming y Fanghua, 2004; Ruelland, Ardoin-Bardin, Billen, y Servat, 2008) Comparados con los modelos empíricos y analíticos, los modelos físicos se caracterizan por una mayor precisión intrínseca al momento de predecir los efectos del cambio climático o de un determinado manejo de la tierra. Sin embargo, estos modelos requieren de datos más detallados.

2.1.5 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Aguilar y Oñate, 2017).

La herramienta SWAT presenta gran potencial con respecto al análisis especialmente de variables físicas que aportan valiosa información para procesos de toma de decisiones, incorporando instrumentos y rutinas para áreas de agricultura, ordenamiento y zonificación, agropecuaria, manejo de cuencas, entre otros (Araya, Arroyo y Heidinger, 2010).

A partir del cruce de tipos de suelo, pendiente y la cobertura vegetal presente se obtienen las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), dividiendo a la cuenca en subcuencas obteniendo así los cálculos (Valdivieso y Naranjo, 2003). Las HRU son áreas que presentan características similares, por lo que se plantea la teoría de que zonas con propiedades similares, generan respuestas similares. Aunque la desventaja que se presenta es la falta de conectividad entre áreas (Del Rio, 2010).

La simulación hidrológica puede ser dividida en dos fases. La primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico, siendo primordial para el presente estudio, debido a que en esta fase se controla la cantidad de agua presente en el sistema. Y la segunda fase es la de enrutamiento hidrológico. (Barbudo, Ochoa y Verbel, 2016).

2.2 Marco Legal

En el presente marco legal se incluye las normas jurídicas que tienen relación con el Estudio, tomando en consideración a la Constitución de la República como referente en la legislación del país y demás leyes aplicables dentro del presente estudio sobre la determinación del índice de escasez hídrica en la cuenca del río Ambi.

2.2.1 Constitución de la República del Ecuador 2008

De acuerdo con el artículo 12 de la Constitución de República del Ecuador, se reconoce al agua como un derecho fundamental para el ser humano, irrenunciable, que constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y que por lo tanto es esencial para la vida

El Artículo 14 de la Constitución de la República del Ecuador reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que

garantice la sostenibilidad y el Buen Vivir, Sumak Kawsay, y declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la recuperación de espacios naturales degradados. Por otra parte, en los derechos de la naturaleza, la Constitución en su Artículo 71 le concede a la naturaleza o Pacha Mama, el derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos.

El Artículo 83 de la Constitución, numeral 6, señala que son deberes y responsabilidades de las ecuatorianas y los ecuatorianos, respetar los derechos de la naturaleza, preservar un ambiente sano y utilizar los recursos naturales de modo racional, sustentable y sostenible. De acuerdo con el Artículo 411, el Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico, regulando toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua.

2.2.2 Código Orgánico del Ambiente

De acuerdo con el Código Orgánico del Ambiente, el cual ha entrado en vigencia el 12 de abril del año 2018, en remplazo de diferentes leyes entre ellas la Ley de recursos hídricos, uso y aprovechamiento de agua, a través de su Artículo 3, en donde indica los fines de esta nueva normativa, señala:

- Regular los derechos, garantías y principios relacionados con el ambiente sano y la naturaleza, previstos en la Constitución y los instrumentos internacionales ratificados por el Estado.
- Regular las actividades que generen impacto y daño ambiental, a través de normas y parámetros que promuevan el respeto a la naturaleza, a la diversidad cultural, así como a los derechos de las generaciones presentes y futuras.
- Establecer, implementar e incentivar los mecanismos e instrumentos para la conservación, uso sostenible y restauración de los ecosistemas,

biodiversidad y sus componentes, patrimonio genético, Patrimonio Forestal Nacional, servicios ambientales, zona marino-costera y recursos naturales.

La presente Ley en su Artículo 5, el cual trata sobre el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado hace mención de lo siguiente:

- La conservación, preservación y recuperación de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico.

De igual manera el Artículo 30 de esta ley, anuncia que el Estado posee objetivos relativos a la biodiversidad tal como:

- Adoptar un enfoque integral y sistémico que considere los aspectos sociales, económicos, y ambientales para la conservación y el uso sostenible de cuencas hidrográficas y de recursos hídricos, en coordinación con la Autoridad Única del Agua

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

De acuerdo con esta ley se han considerado los siguientes artículos:

Artículo 12. Protección y conservación de fuentes, indica que la parte social que se abastece del agua de las fuentes hídricas naturales, son responsables de la protección, recuperación y conservación de estas. Las autoridades y los usuarios de las fuentes que manejan para sus actividades son los principales actores de dar un manejo sustentable al recurso hídrico.

Artículo 14. Cambio del uso del suelo. El estado es el encargado de regular las actividades antrópicas que causen deterioro al recurso suelo, ya que se han demostrado estudios en los que el cambio del uso del suelo altera la disponibilidad del recurso agua.

Artículo 64. Conservación del agua. Se manifiesta que el agua de los afluentes de los ríos de la microcuenca abastece con su caudal a la mayor parte de la población de la zona y desemboca en el Lago San Pablo de Otavalo, lugar turístico, entonces

es primordial la conservación del agua para mantener sanas las fuentes naturales de este recurso.

Artículo 78. Áreas de protección hídrica. Las áreas consideradas de interés público deben mantener la integridad de los ecosistemas y beneficiar a la sociedad con un ambiente sano.

Artículo 111. Protección en fuentes de agua. La mayor parte de la microcuenca tiene un uso del suelo para la agricultura y abastecimiento de alimento para la población, por consiguiente, la protección de las fuentes de agua garantizará la soberanía alimentaria.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

El área del estudio para el presente trabajo se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del río Ambi, la cual está ubicada al norte del país, en la provincia de Imbabura (Figura 1) misma que se extiende por los cantones de Otavalo, Cotacachi, Antonio Ante, Urcuquí e Ibarra, cubriendo una extensión de 1129.8 km², además que de que cuenta con la mayoría de los lagos de la provincia (Andre y Piedra, 2017). Los afluentes del río Ambi son el río Itambí que aporta su caudal al lago San Pablo que posterior con el nombre de Jatunyacu se une al río Blanco y al Yanayacu formándose así el río Ambi (Almeida, 2014). De acuerdo con los datos de los anuarios meteorológicos del INAMHI el valor de la temperatura está en un rango de 5 a 23°C y el promedio anual de precipitación es de 800 mm (Figura 2 y 3).

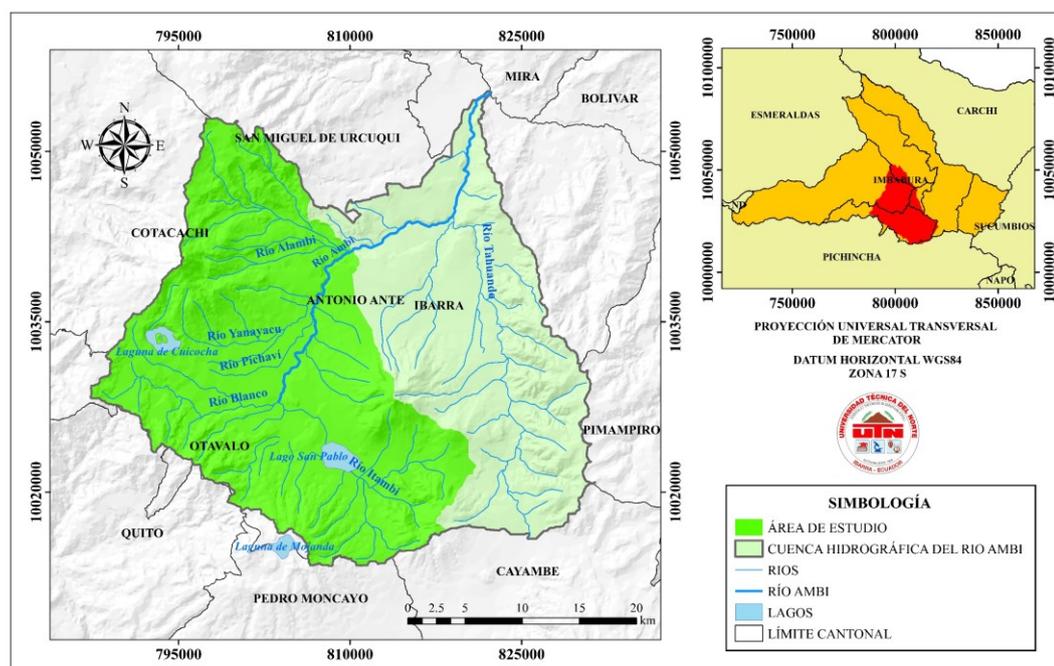


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Ambi

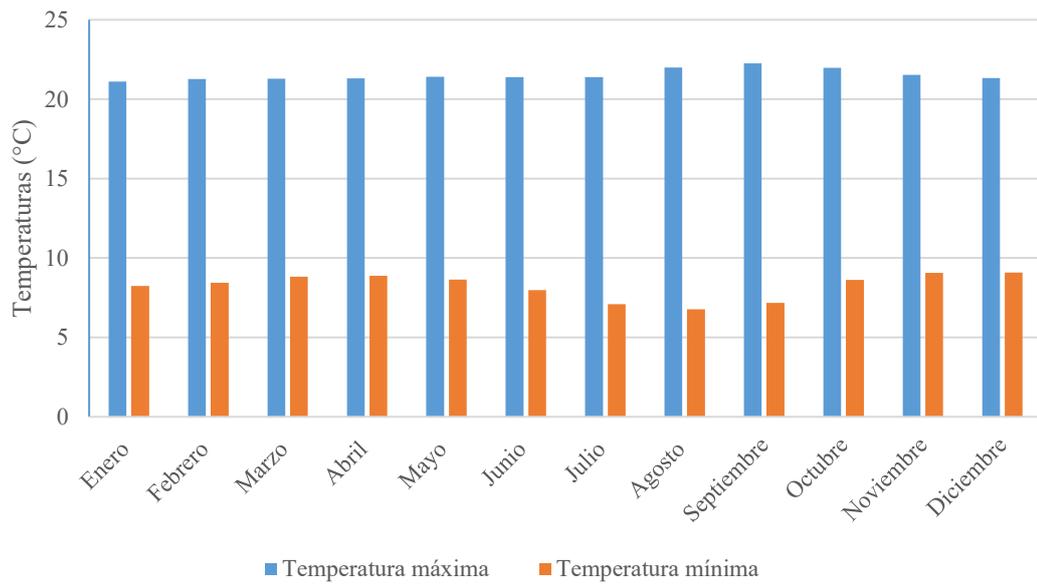


Figura 2. Promedios anuales de temperaturas máxima y mínima, periodo 1990 - 2017

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

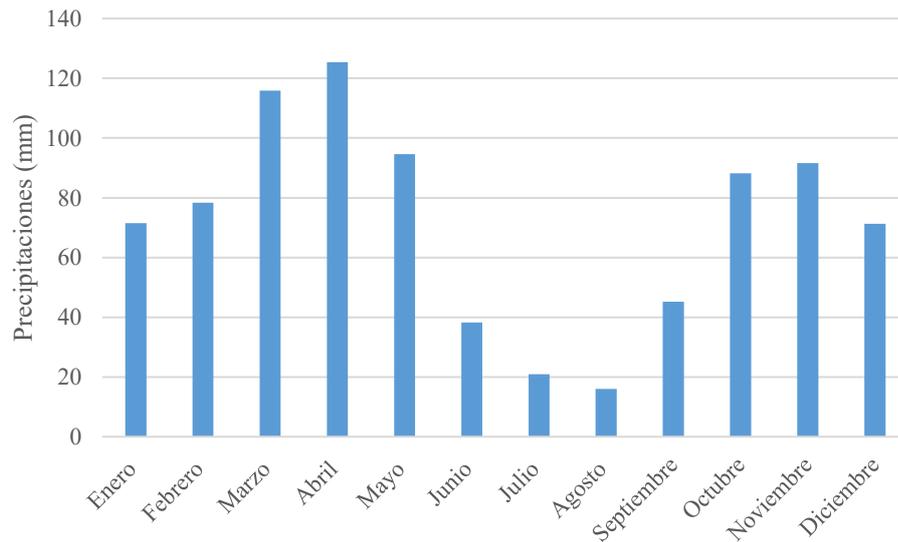


Figura 3. Precipitaciones medias de la cuenca del río Ambi, periodo 1990 - 2017

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Dentro de la cuenca del río Ambi, el uso del recurso hídrico se encuentra distribuido para distintos sectores o fines, en una mayoría para riego abarcando un 59%, para el uso industrial 35% y el porcentaje restante equivalente al 6% es destinado para el uso doméstico (Almeida, 2014). Por otra parte, la calidad de agua de la cuenca se encuentra altamente contaminada por los desechos que son depositados en los cuerpos de agua, por tal razón existe una contaminación del agua por materia orgánica y bacterias pertenecientes al grupo de las coliformes, mismas que son una amenaza para la salud de la población local (Cabrera, 2002).

El área de estudio se encuentra delimitada antes de la confluencia del río Ambi con el río Tahuando, tomando como punto de referencia para la delimitación la Estación Hidrológica Ambi DJ Cariyacu; abarcando un área de 683.04 km² (Figura 1).

De acuerdo con los parámetros morfométricos los cuales permiten tener una percepción de la distribución del recurso hídrico sobre el territorio. El coeficiente de compacidad presenta un valor de 1.26 próximo al valor ideal 1. Los valores de las altitudes del área de estudio, se encuentra entre 4600 y 1500 m s.n.m. El valor de la pendiente media del río principal indica que por cada metro horizontal en el terreno la elevación del río Ambi aumenta en 0.024 m presentando corrientes de agua suaves. Por otra parte, con el valor calculado, la densidad de drenaje se clasifica como subcuenca altamente drenada, ya que el valor supera el rango de 1.50 km/km². El tiempo de concentración calculado es de 0.67 h, dado a que este es mayor a 30 minutos se concluye que no se producen inundaciones en la cuenca hidrográfica

3.2 Métodos

La metodología que se planteó está enfocada para alcanzar los objetivos de la investigación, mediante el uso de información cartográfica y climática preexistente, así como también lineamientos y parámetros establecidos por distintas fuentes de tal manera que se llegue a obtener el producto final que consiste en el índice de escasez de la cuenca hidrográfica. El método utilizado fue no experimental longitudinal.

3.2.1 Fase I – Cálculo de la Oferta Hídrica

El cálculo de la oferta hídrica se realizó a través el uso de SWAT del software ARCGIS, para el cual es necesario poseer previamente diferentes parámetros, estos son las características de la textura del suelo, la cobertura vegetal y la información climática procedente de las estaciones meteorológicas del INAMHI.

3.2.1.1 Delimitación del área de estudio

Para la delimitación del área de estudio se realizó su proceso a través del software ArcGIS, tomando en cuenta cada uno de los elementos necesarios para la obtención del límite, desde la generación de un DEM y el establecimiento de un punto de aforo.

- *Generación del modelo digital de elevación DEM*

Para la generación del modelo de elevación digital DEM, se utilizó las capas de curvas de nivel, obtenidas del portal web del SNI, mismas que fueron recortadas y procesadas para la creación del TIN y posterior el DEM considerando un tamaño de celda (pixel) de 30 metros. Adicionalmente se descargó un DEM a través del portal web USGS, mismo que fue comparado con el DEM creado mediante las curvas de nivel a través de la herramienta “Flow direction” (dirección de flujo) del software ArcGIS, de tal manera que se eligió el DEM descargado al no presentar vacíos de información del ráster.

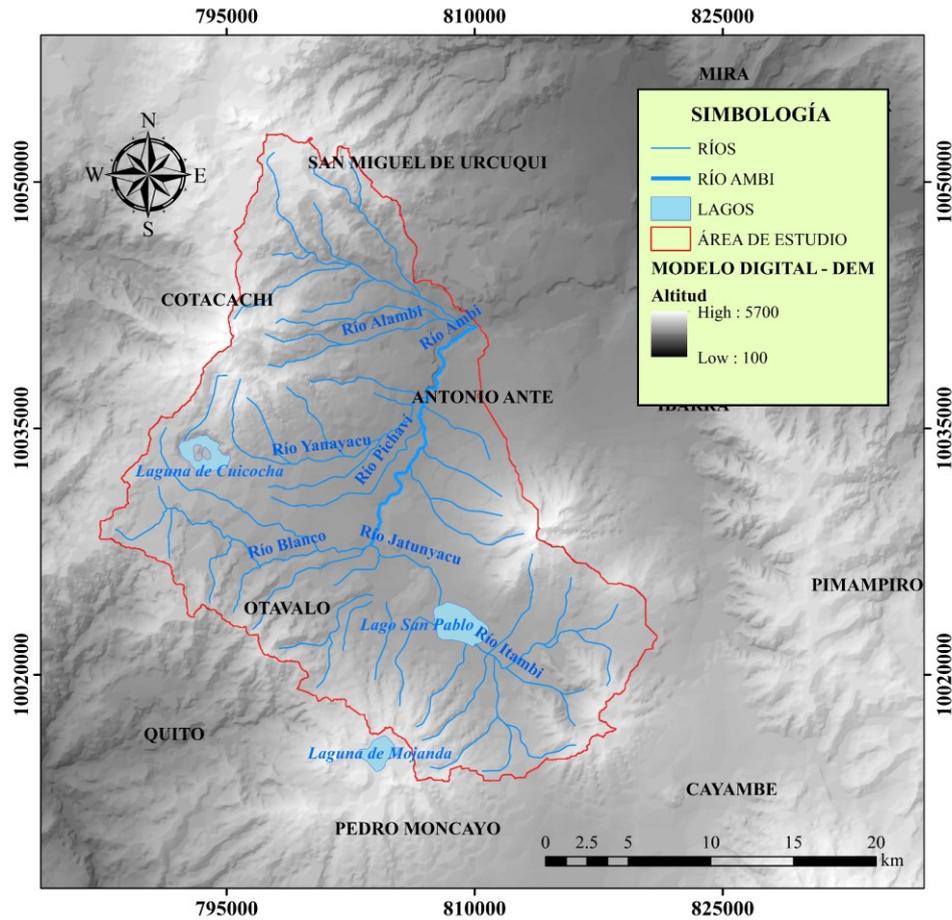


Figura 4. Modelo digital de elevación DEM

- *Establecimiento del punto de aforo*

Para el punto de aforo o salida de la cuenca, se consideró las estaciones hidrológicas presentes a lo largo del río Ambi, siendo la estación Ambi Dj Cariyacu con la cual se estableció el punto de aforo para la delimitación de la cuenca (Figura 5).

Para la elección de la estación Ambi Dj Cariyacu, se tomó en cuenta la información hidrológica (valor de caudales) proveniente de esta, debido a que estos datos fueron usados posteriormente para la validación de modelo hidrológico de la cuenca.

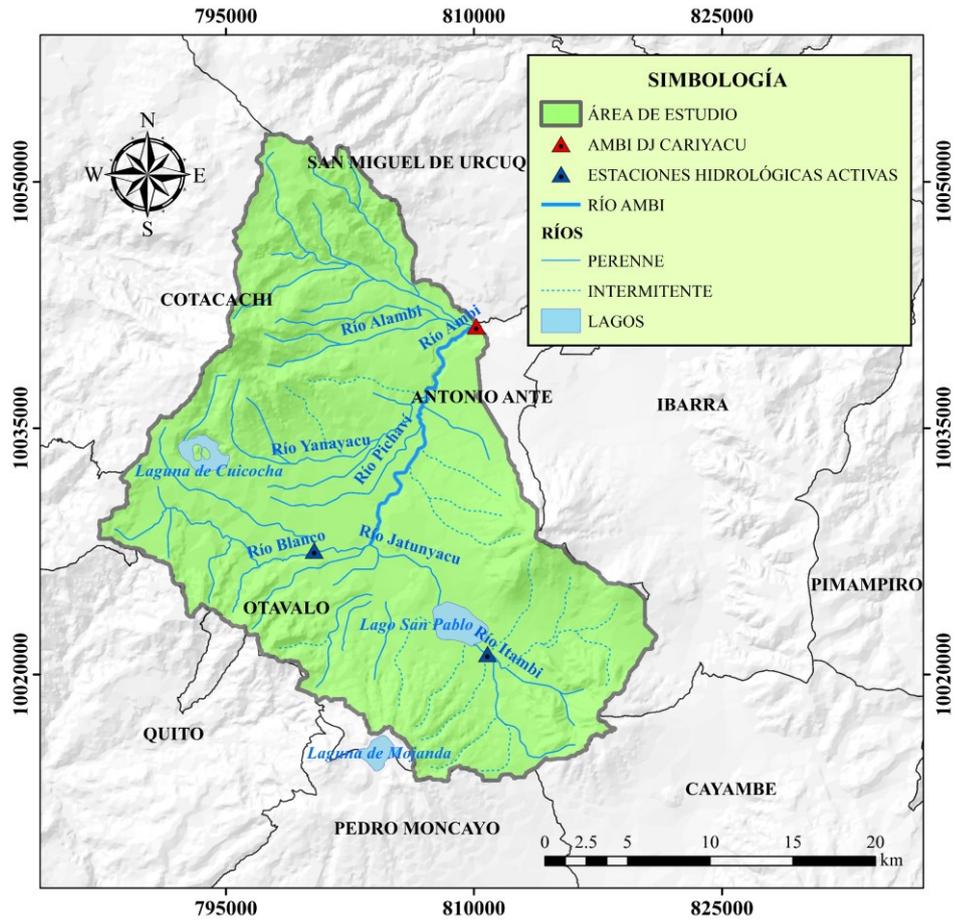


Figura 5. Estaciones hidrológicas, ubicadas en el río Ambí

3.2.1.2 Preparación de parámetros edafológicos

Los parámetros edafológicos requeridos para el modelo se obtuvieron a partir de la información de textura / tipo de suelo (Figura 6), elaborada por el Ministerio de Agricultura Ganadería, Acuacultura y pesca (MAGAP) a escala 1:50000. Con esta información y el uso del software libre Soil water characteristics se procedió a realizar una tabla detallada de la textura del suelo correspondiente a la cuenca del río Ambí (Tabla 1).

Tabla 3. Parámetros edafológicos de la cuenca del río Ambi

Tipo De Suelo	Textura	H	Anion Excl	Sol_Z	Sol Bd	Sol Awc	Sol K	Sol Cbn	Rock	Sol Alb	Usle K
Argiustoll	Arcilloso fino	A	0.50	(50 - 100)	1.28	0.10	0.63	1.74	10.00	0.18	0.05
Duriudoll	Arcillo arenoso fino	C	0.50	(20 - 50)	1.46	0.11	2.14	1.74	10.00	0.18	0.18
Durustoll	Franco arcillo arenoso medio	C	0.50	(20 - 50)	1.49	0.09	12.11	1.74	10.00	0.18	0.39
Dystrandept	Franco medio	C	0.50	(50 - 100)	1.37	0.16	11.19	1.74	10.00	0.18	0.36
Dystrandept'	Franco limoso moderadamente grueso	B	0.50	(>100)	1.34	0.22	32.44	1.74	10.00	0.18	0.60
Dystropept	Franco arenoso moderadamente grueso	A	0.50	(>100)	1.11	0.14	82.20	4.06	10.00	0.04	0.31
Eutrandept	Franco limoso moderadamente grueso	A	0.50	(>100)	0.89	0.25	92.89	4.06	10.00	0.04	0.34
Hapludoll	Franco arenoso moderadamente grueso	A	0.50	(>100)	1.11	0.14	82.20	4.06	10.00	0.04	0.31
Haplustoll	Franco arenoso moderadamente grueso	B	0.50	(>100)	1.42	0.11	49.79	1.74	10.00	0.18	0.55
Haplustoll (Argiustoll)	Franco arenoso moderadamente grueso	B	0.50	(>100)	1.42	0.11	49.79	1.74	10.00	0.18	0.55
Ustorthent	Arcillo arenoso fino	C	0.50	(0 - 20)	1.51	0.11	1.15	0.58	10.00	0.40	0.25
Vitrandept	Arenoso grueso	A	0.50	(>100)	1.51	0.05	77.05	0.87	10.00	0.33	0.64

Los valores de arena, limo y arcilla se calcularon utilizando el triángulo textural y la herramienta “Soil Characteristics Tool versión 6.02.70” (Rawls y Saxton, 2009). Por otra parte, para estimar el albedo en la superficie del suelo en función de la materia orgánica mediante la siguiente ecuación: $A=0.6\exp(0.4.OM)$ (Baumer, 1990). A partir de la ecuación general desarrollada por Wischmeier et al., (1971) se calculó el factor de erodabilidad del suelo cuando el contenido de limo y arena muy fina llegan a ser menores que el 70 % de la distribución del tamaño de la partícula del suelo.

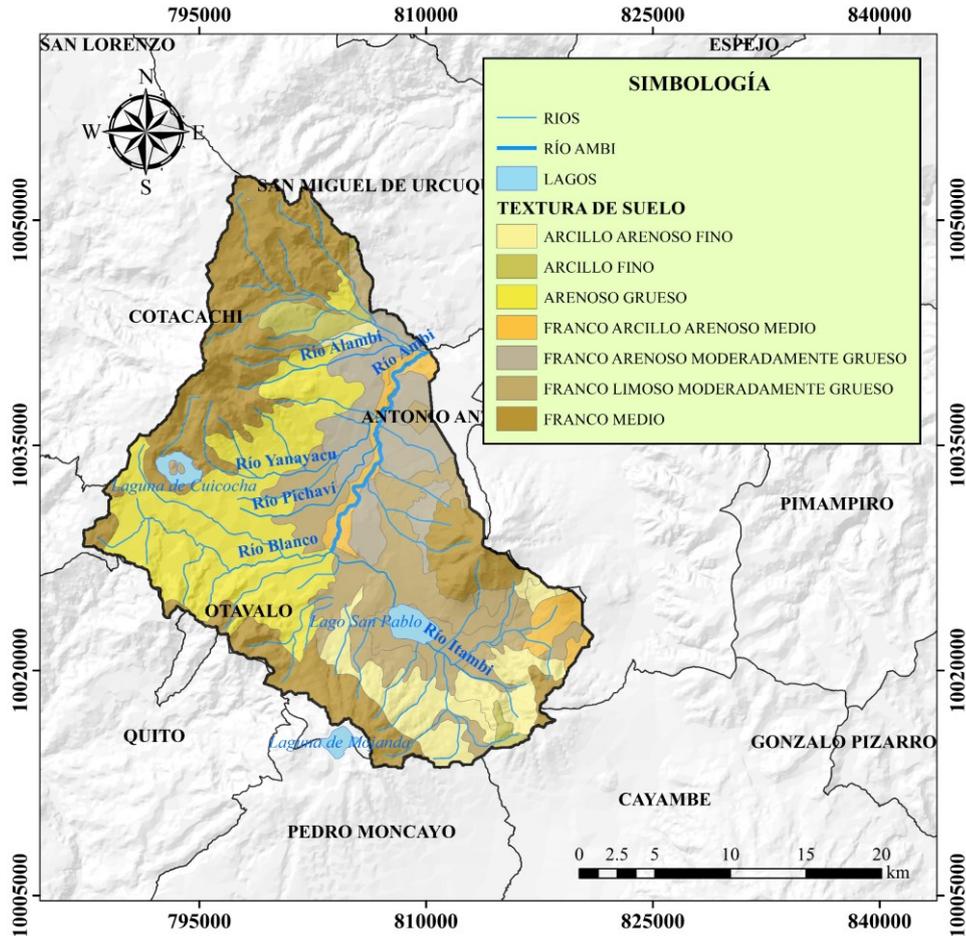


Figura 6. Textura de suelo de la cuenca del río Ambí

3.2.1.3 Preparación de parámetros de cobertura de suelo

Para conocer la cobertura de suelo comprendida entre el periodo de 1990 al 2017 se emplearon imágenes satelitales recuperadas de Landsat 8 OLI/TIRS, obtenidas de manera digital del sitio web de la NASA earthexplorer.usgs.gov., con una resolución espacial de 30 x 30 metros. La imagen fue seleccionada considerando la poca nubosidad presente sobre el área de estudio (Tabla 2) (Figura 7).

Tabla 4. Imágenes de sensores remotos utilizados

PATH ROW	TIPO IMAGEN	CÓDIGO IMAGEN SATELITAL	FECHA (DD/MM/AA)
	LANDSAT 5	LE07_L1TP_010060_19961114_20170126_01 _T1	14/11/1996
10 - 60	LANDSAT 7	LE07_L1TP_010060_20070210_20170126_01 _T1	10/02/2007
	LANDSAT 8	LC08_L1TP_010060_20170423_20170126_01 _T1	23/04/2017

Fuente: Portal web USGS

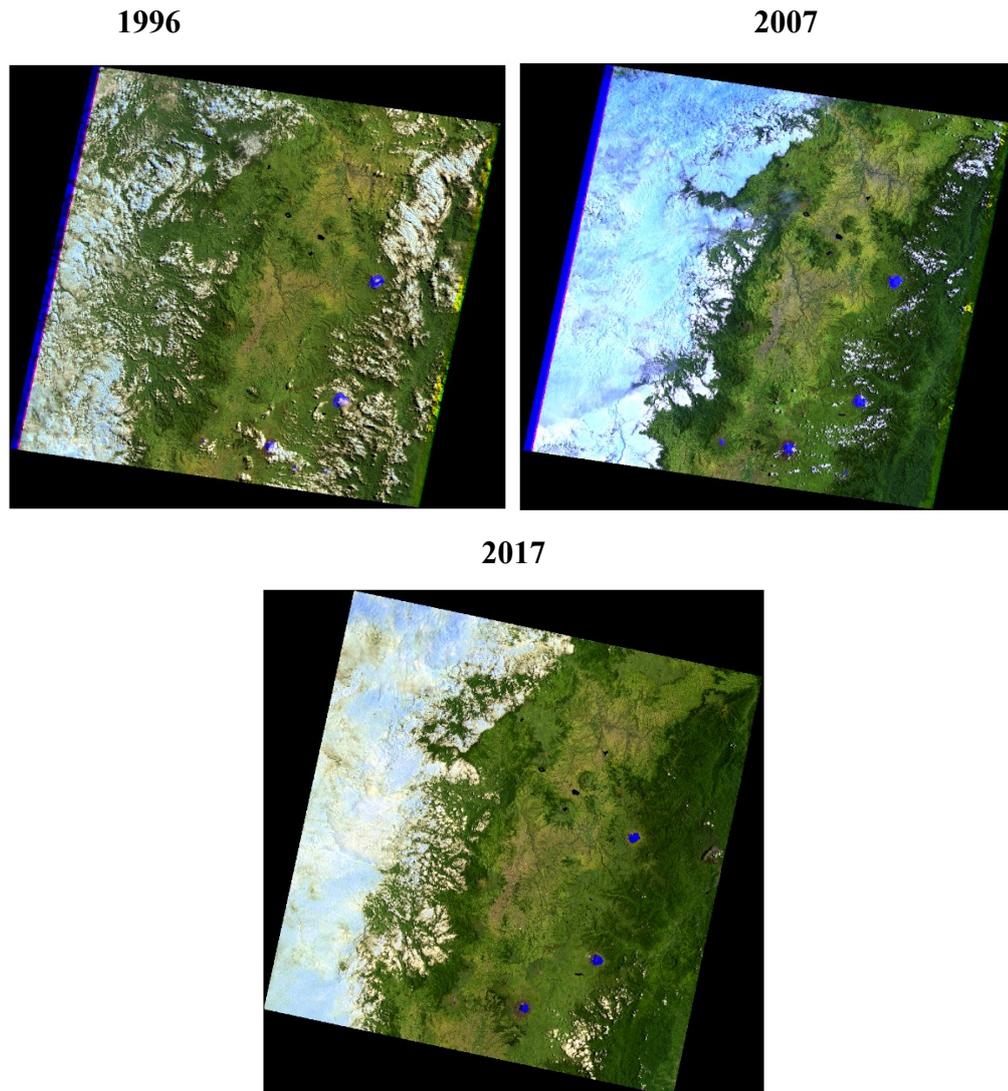


Figura 7. Imágenes satelitales sin procesar de los sensores remotos para los periodos 1996, 2007 y 2017

Fuente: Portal web USGS

3.2.1.4 Tratamiento de imágenes satelitales

El tratamiento de imágenes consiste en eliminar cualquier cambio ocurrido en los números digitales (ND) que conforman los píxeles de estas, mediante correcciones geométricas y radiométricas (Chuvieco, 1996).

- Corrección geométrica. La corrección geométrica consiste en proyectar la imagen satelital en un sistema de coordenadas determinado, con el propósito de eliminar cualquier distorsión geométrica. Para esta investigación se proyectó la imagen satelital en el sistema de coordenadas UTM, con proyección 17 Sur.
- Corrección radiométrica. Adicionalmente las imágenes fueron sometidas a un realce radiométrico para eliminar efectos atmosféricos como partículas y nubosidad presente.
- Corte de imagen satelital. Una vez realizadas las correcciones geométricas y radiométricas se cortó las imágenes para el área de estudio. Se utilizó la herramienta extract by mask de ArcGis 10.4 y se cargó la microcuenca en formato vector (shapefile), obteniendo un archivo de salida en formato *.img. En el proceso se debe considerar que tanto la imagen y el shapefile de la cuenca deben estar en el mismo sistema de coordenadas.
- Combinación de bandas. Se realizó un realce multiespectral combinando las bandas de la imagen satelital en RGB 4, 3, 2; para obtener una imagen en infrarrojo o falso color, útil para discriminar e interpretar las diferentes coberturas existentes en la microcuenca.

3.2.1.5 Preparación de parámetros de clima

Para esta parte es necesaria hacer una recopilación de los datos climáticos que presentan las estaciones del INAMHI que se encuentran dentro de la cuenca hidrográfica a estudiarse. Para el caso de la cuenca hidrográfica del río Ambi, se tomó en consideración dos estaciones, Inguincho y Otavalo (Tabla 3). Además, de que esta selección fue considerada respecto a que cada una se encuentra dentro de un tipo de clima distinto en la cuenca (Figura 8).

Tabla 5. Estaciones meteorológicas pertenecientes a la red del INAMHI

Codigo	Nombre	X	Y	Elevación (m s.n.m)
M0001	Inguincho	789081	10028216	3140
M0105	Otavalo	805884	10026560	2550

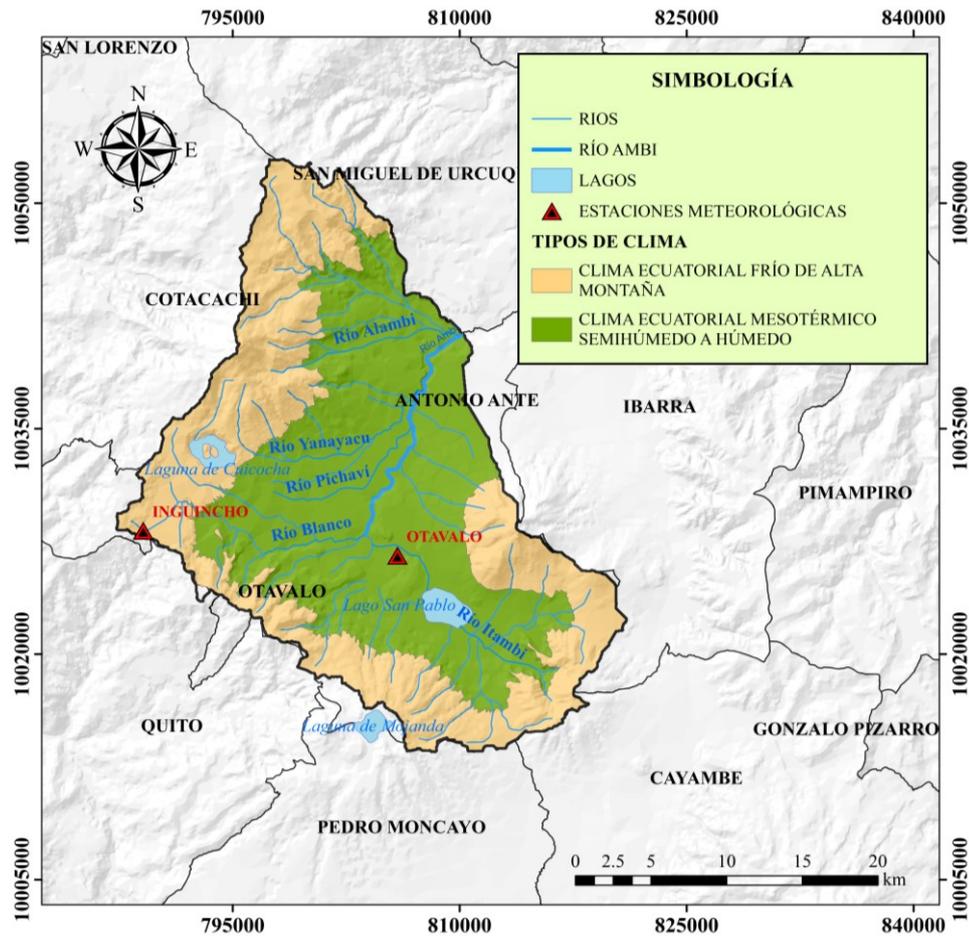


Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas de acuerdo con el tipo de clima de la cuenca

Para el ingreso de los datos meteorológicos en SWAT, principalmente se tomó en cuenta a los valores diarios de precipitación y temperatura, y sobre todo en estos últimos tanto los valores máximos y mínimos, los cuales fueron organizados en una sola columna y guardados en formato “.txt”, formato que es compatible con el software utilizado.

3.2.1.6 Ingreso de parámetros al software SWAT

Una vez que ya toda la información requerida se encuentra organizada se procede a ingresarla a través de SWAT para de esta manera realizar la simulación que permita conocer los valores de caudales generados en la cuenca, mismos que son necesarios para el cumplimiento del primero objetivo.

Posterior a la delimitación se debe cargar la información de la textura y la cobertura vegetal al SWAT, de modo que se generen las unidades de respuesta hidrológica, esta información debe ser ingresada en formato ráster.

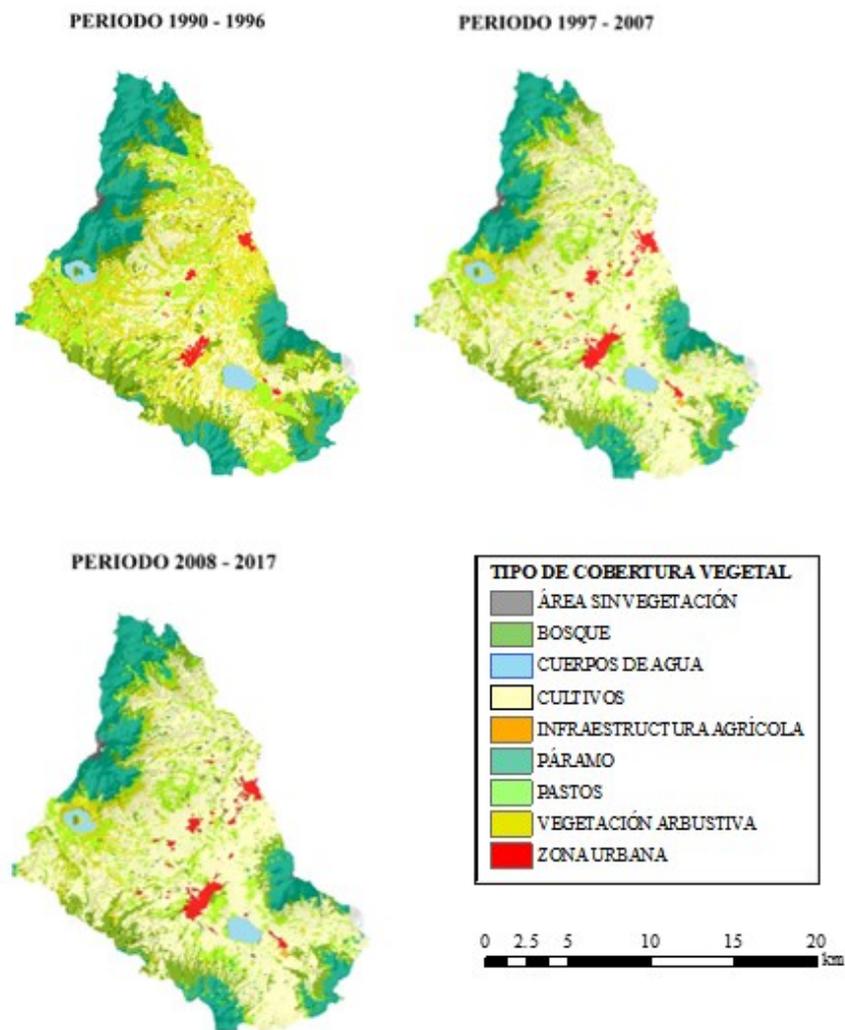


Figura 9. Cobertura vegetal referencial para [redacted] a través de SWAT

La información de cobertura vegetal se ingresó de acuerdo con los códigos establecidos para tipo de cobertura en SWAT (Tabla 3)

Tabla 6. Codificación de SWAT para el tipo de cobertura vegetal

Tipo de Cobertura	Código SWAT
Área sin vegetación	BARR
Cultivos	AGRL
Páramo	FRST
Pastos	PAST
Vegetación arbustiva	FRSD
Bosque	FRSE
Cuerpo de agua	WATR
Infraestructura agrícola	AGRR
Zona urbana	URBN

Ya creadas las unidades de respuesta hidrológica (HRU), se carga la información climática diaria de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, de esta manera se puede ya realizar la simulación mediante SWAT, para posterior proceder con la calibración y validación del modelo.

La disponibilidad real de agua puede verse afectada por la variabilidad del régimen hidrológico de las fuentes abastecedoras y la calidad de esta, además una corriente con un régimen hidrológico muy variable es poco confiable como fuente abastecedora, por tal motivo es recomendable tomar en cuenta la irregularidad temporal de la fuente para la estimación de la oferta hídrica (Costa et al., 2005).

Es conveniente definir tanto la oferta total que refleja el agua que circula por la fuente abastecedora y la oferta neta que constituye la cantidad de agua que ofrece la fuente luego de haber descontado la cantidad de agua que debe quedar en ella para efectos de mantener la dinámica de aguas bajas y para tomar en cuenta los efectos adversos de la irregularidad temporal de la oferta (Costa et al., 2005).

3.2.1.7 Validación y calibración del modelo hidrológico

El modelo hidrológico obtenido a través de SWAT proporciona datos de caudales, que en parte se asemejan a los valores observados, es decir a los valores que presentan las tablas de caudales de las estaciones hidrológicas del INAMHI.

Para llegar a tener valores mucho más precisos y que no distorsionen respecto a los valores observados, se aplica una calibración a los datos, la misma que se puede realizar con la misma extensión de SWAT, a través de una calibración manual, tomando como parámetro de calibración a la Curva Numero (CN2), la calibración automática realizada en SWAT consiste en la combinación de un método de optimización global llamado método aleatorio de evolución compleja Shuffle Complex Evolution Method (Griensven, Francos & Bauwens, 2002). En esta etapa se puede utilizar otros medios de calibración como por ejemplo la aplicación SWAT-CUP, una aplicación propia de SWAT la cual permite hacer estimaciones entre el caudal simulado y el observado (Muleta, Nicklow, & Bekele, 2007)

Debido a que en la información proporcionada por el INAMHI presenta vacíos en los meses de algunos años, para la validación del modelo hidrológico ya calibrado, se procede a realizar una regresión lineal con el fin de conocer si el valor del coeficiente de correlación de Pearson (R^2) sea mayor a 0,7, todo esto previo a la aplicación de un índice que de mayor veracidad al modelo.

Para la validación del modelo se deben considerar los años que contengan valores de caudales medios mensuales para todos los meses, ya que de faltar algún valor mensual no sería eficaz la validación (Moriassi, Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel, & Veith, 2007).

3.2.1.8 Coeficiente de Nash Sutcliffe

Es una forma de normalizar la función objetivo de mínimos cuadrados. Determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de datos medidos, un ajuste perfecto de este criterio viene dado por la unidad, un ajuste negativo indica que un modelo es —pobre y no se ajusta a los datos observados.

Mientras más cercano a uno sea este criterio estadístico mejor será la bondad de ajuste (Moriasi, Arnold, Van Liew, & Bingner, 2007).

Coeficiente de Nash Sutcliffe

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde:

Q_{simi} = Caudal simulado.

Q_i =Caudal observado.

\bar{Q} =Caudal medio observado

Cuando el valor de NSE =1, la simulación es perfecta.

Fuente: Ritter, Muñoz y Regalado (2011)

Según Ritter, Muñoz y Regalado (2011), no existen criterios globalmente aceptados sobre los rangos utilizados en la interpretación de los valores del coeficiente, por tanto, se puede considerar criterios de diferentes autores. Para la presente investigación se consideraron los criterios de Demissie, Knapp, Singh, y Xie (2007).

Tabla 7. Valores referenciales para la validación de datos por medio del Índice de Nash Sutcliffe

Rango	Eficiencia del ajuste
<0,7	No aceptable
0.7 – 0.8	Aceptable
0.8 – 0.9	Bueno
>0.9	Muy bueno

Fuente: Demissie, Knapp, Singh, y Xie (2007)

3.2.2 Fase II – Cálculo de la Demanda Hídrica

3.2.2.1 Preparación de los datos correspondientes a las concesiones de agua emitidas por la Autoridad competente del Agua (SENAGUA)

Después de obtener los valores de la oferta hídrica (caudales) de la cuenca hidrográfica del río Ambi, se procedió a la preparación de los datos entregados por parte de la SENAGUA, los cuales indican la salida de caudal que existe a lo largo de la cuenca, mismo que es destinado para diferentes fines socioeconómicos.

La Demanda Hídrica, que es la sumatoria del agua extraída para usos sectoriales, en un periodo de tiempo determinado, se establece a través de la fórmula.

$$Dh=Ch+Csp+Csm+Css+Cea+Ce+Ca+Aenc$$

Dónde:

Dh: demanda hídrica; Ch: consumo humano o doméstico; Csp: Consumo sector agrícola; Csm: consumo sector industrial; Ccss: consumo sector de servicios; Ce: consumo sector de energía; Ca: consumo del sector acuícola; Aenc: extraída no consumida

Fuente: IDEAM (2010)

3.2.3 Fase III – Cálculo del Índice de Escasez Hídrica

3.2.3.1 Determinación del índice de escasez hídrica para la cuenca del río Ambi

El índice de escasez es la relación porcentual de la demanda de agua, ejercida por las actividades sociales y económicas en su conjunto para su uso y aprovechamiento, con la oferta hídrica disponible (neta) (IDEAM, 2010). Tomando en cuenta esta definición el índice de escasez se establece como la siguiente relación:

Índice de escasez

$$I_e = \frac{D}{O_n} \times 100\%$$

Dónde:

I_e : Índice de escasez

D: Demanda de agua (m³)

O_n : Oferta superficial neta (m³)

Fuente: (IDEAM, 2010)

En este contexto y para este estudio, el índice de escasez se agrupará en cinco categorías:

Tabla 8. Categorías de acuerdo con el porcentaje del índice de escasez

Categoría	Índice de escasez	Características
No significativo	<1%	Demanda no significativa con relación a la oferta
Mínimo	1 – 10%	Demanda muy baja con respecto a la oferta
Medio	11 – 20%	Demanda baja con respecto a la oferta
Medio Alto	21 – 50%	Demanda apreciable
Alto	>50%	Demanda alta con respecto a la oferta

Fuente: IDEAM (2010). *Estudio nacional del agua, Balance hídrico y relaciones de demanda-oferta de agua en Colombia.* Pag. 25

El índice de escasez se lo aplicó a través de una división del área de estudio por microcuenca, tomando en cuenta las estaciones hidrológicas que se encuentran repartidas a lo largo de la misma (Figura 10), de igual manera en la división por microcuencas se considera los afluentes principales de la cuenca como tal.

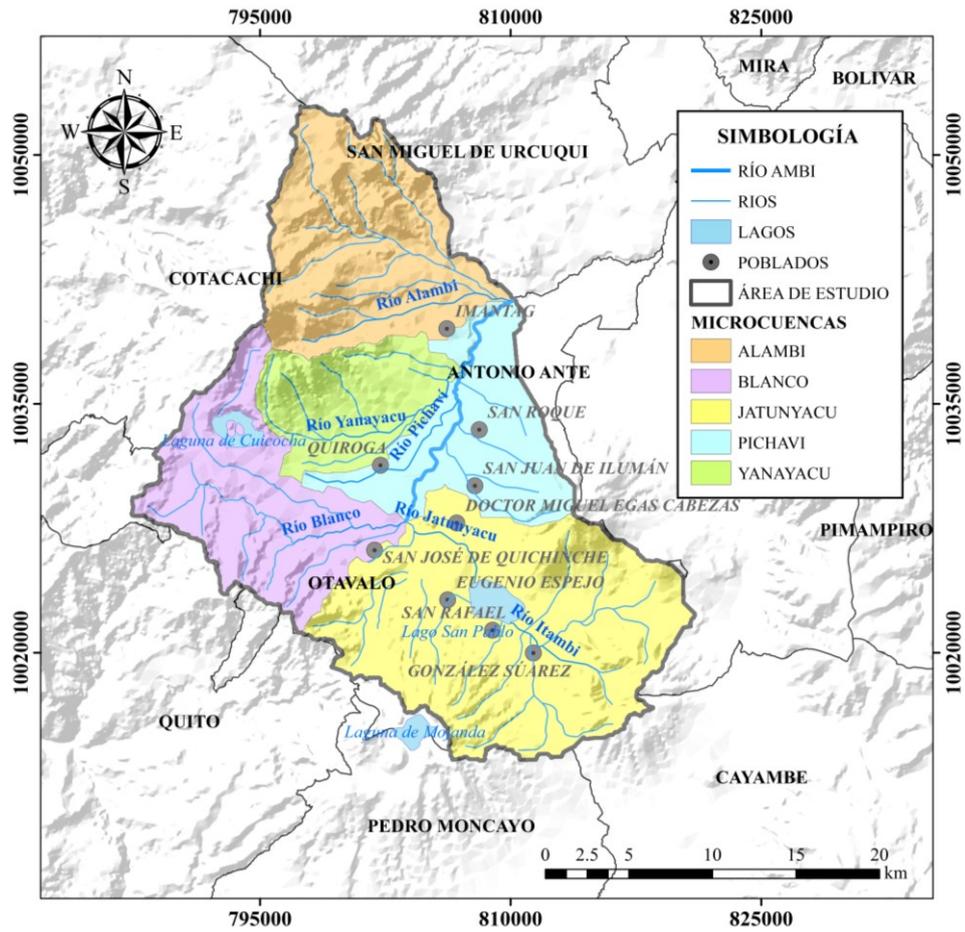


Figura 10. Mapa de división por microcuenca en el río Ambi

Finalmente, en la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo de metodología utilizada en la presente investigación.

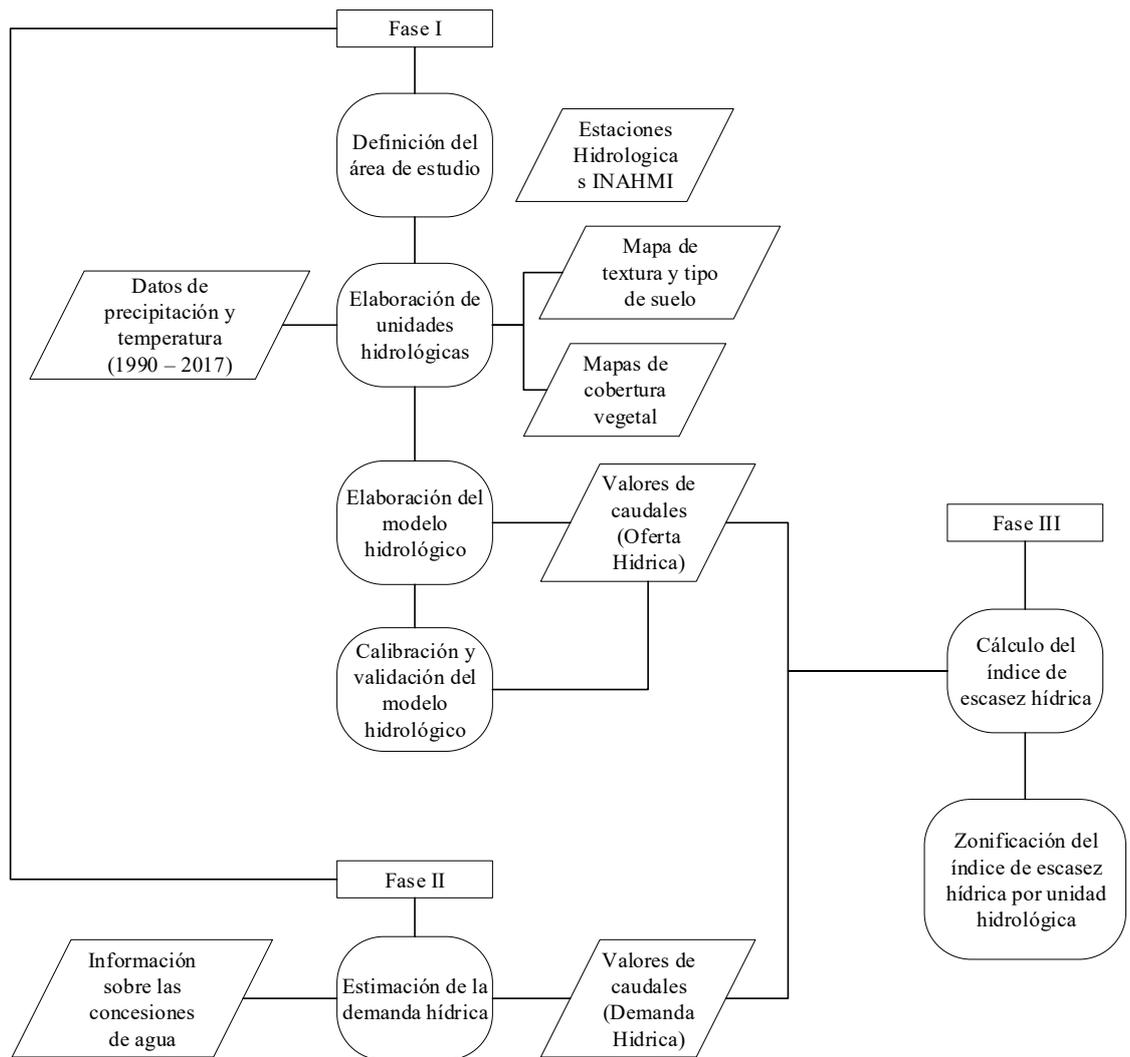


Figura 11. Esquema metodológico de la investigación

3.3 Materiales y equipos

Para la realización del trabajo de investigación son indispensables diferentes materiales y equipos, adicionalmente se hará uso de softwares para los procesos de modelamiento y simulación de las variables hidrológicas (Tabla 7).

Tabla 9. Materiales y equipos

Equipos	Computador
	Navegador GPS Garmin
	Molinete Electrónico
	Cámara fotográfica
	Flexómetro
Materiales	Libreta de campo
	Anuarios hidrológicos y meteorológicos del INAMHI
	Cartografía base digital del IGM a escala 1:50000
Software	ArcGIS 10.4 con licencia temporal
	Extensión Soil and Water Assessment Tool
	Software Soil Water characteristics

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados del cálculo de la oferta hídrica en la cuenca del río Ambi para el periodo 1990 - 2017

4.1.1 Resultados de la simulación inicial de la cuenca hidrográfica del río Ambi

Realizado el trabajo de simulación para el periodo 1990 – 2017, con el fin de conocer la generación hídrica (oferta) en la cuenca del río Ambi se obtuvieron diferentes datos, tales como: precipitación (PREC), escorrentía superficial (SURQ), escorrentía lateral (LATQ), escorrentía subterránea (GWQ), percolación (PERCOLA), contenido inicial de agua en el suelo (SW), evapotranspiración real (ET), evapotranspiración potencial (ETP), y caudal total mensual (CAUDAL) (Tabla 8).

Tabla 10. Resultados de los componentes del Balance hídrico simulados para el período 1990 - 2017

Mes	Prec (mm)	Surq (mm)	Latq (mm)	Gwq (mm)	Perco (mm)	Sw (mm)	Et (mm)	Pet (mm)	Caudal (mm)
Enero	119.4	14.951	2.081	2.601	42.701	91.636	28.159	32.118	19.661
Febrero	164.9	23.555	5.935	26.847	107.09	89.74	28.789	29.963	56.778
Marzo	108.1	7.481	5.175	57.949	59.472	90.281	36.228	38.747	71.864
Abril	181.9	35.916	6.217	64.977	109.19	90.637	28.89	30.075	108.926
Mayo	53.6	1.391	4.878	79.809	20.43	88.285	32.461	36.002	88.627
Junio	45.6	0.338	1.575	50.997	12.256	87.931	32.162	36.927	55.372
Julio	24.3	0.012	0.792	29.511	3.475	80.63	27.674	38.778	32.522
Agosto	23.5	0.341	0.254	14.199	0	81.907	21.589	49.731	16.562
Septiembre	26.3	0.1	0.356	1.615	0	77.692	30.125	49.458	3.387
Octubre	117.1	12.272	3.236	9.695	59.484	85.847	32.557	36.555	26.348
Noviembre	36.8	0.957	2.007	24.224	10.31	84.997	25.386	32.587	28.406
Diciembre	74.1	7.383	1.557	20.825	35.016	90.152	23.819	26.073	30.973

Los resultados de la simulación del balance hídrico indica los valores promedio tanto de precipitación (792.9 mm), evapotranspiración (514.1 mm), así como también el caudal superficial o escorrentía (75.86 mm) y el caudal de retorno al cauce principal una vez terminado el ciclo (124.95 mm).

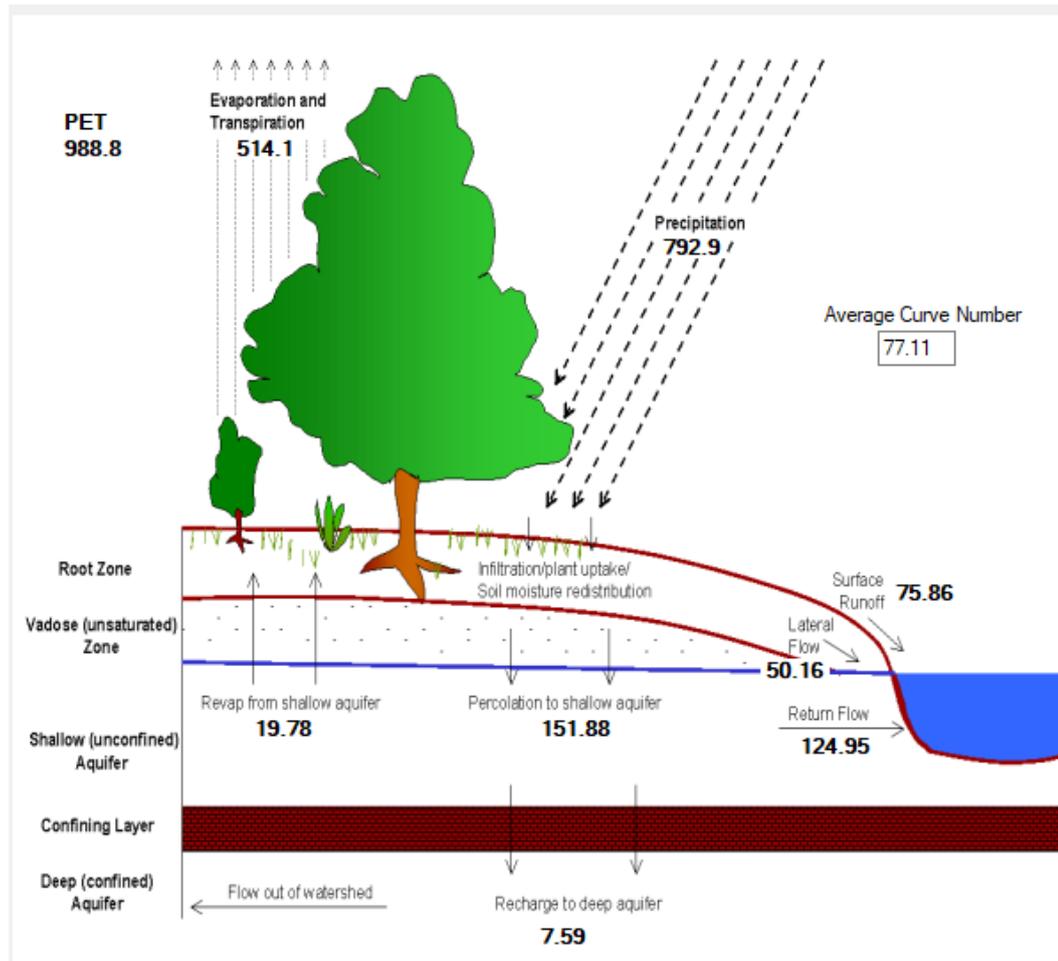


Figura 12. Valores de los componentes del balance hídrico obtenidos mediante la simulación del modelo hidrológico en SWAT

4.1.2 Calibración de datos para la cuenca hidrográfica del río Ambi

El análisis realizado a nivel mensual multianual en el periodo de 1990 a 2017 para determinar la oferta hídrica en la cuenca del río Ambi, permitió obtener valores sobre el comportamiento del caudal generado en la cuenca, los mismos que se compararon y calibraron respecto con los valores de caudales proporcionados por el INAMHI registrados en la estación hidrológica Ambi Dj Cariyacu (Tabla 9).

Tabla 11. Valores de los caudales promedio simulados respecto a los caudales promedio registrados por la estación hidrológica en el periodo 1990 - 2017

Mes	Simulación (m ³ /s)	Datos – Inamhi (m ³ /s)
Enero	4.52	4.58
Febrero	5.43	4.85
Marzo	6.99	6.07
Abril	8.09	5.98
Mayo	8.07	6.82
Junio	5.26	4.27
Julio	3.61	3.32
Agosto	2.23	3.14
Septiembre	1.70	3.31
Octubre	3.03	4.05
Noviembre	4.40	5.23
Diciembre	5.55	4.90

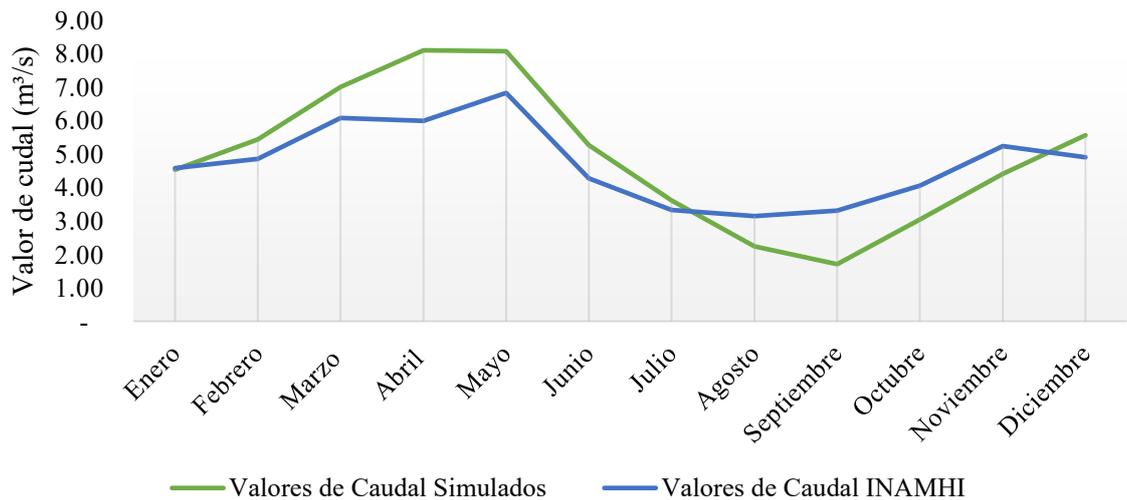


Figura 13. Comparación de los valores de caudal simulado respecto al caudal observado en la estación hidrológica Ambi Dj Cariyacu

Estos valores son el promedio obtenido de la división de periodos de años simulados en el software ARCGIS 10.4, comprendidos en los años 1990 – 1996, 1997 – 2007

y 2008 – 2017, para los cuales se utilizó como variables los valores de precipitación, temperatura y las coberturas vegetales extraídas de las imágenes satelitales para cada periodo (Figura 9).

Los caudales simulados muestran un mayor valor en los meses de abril y mayo, 8.09 y 8.07 m³/s respectivamente, correspondiente a los meses del año de la época lluviosa de mayor precipitación, y los meses a partir de julio a septiembre poseen un valor menor en su caudal, debido a que corresponde a la época seca del año con un valor promedio de no más de 2.5 m³/s (Tabla 9).

Los valores de caudal obtenidos de la simulación se analizaron con los proporcionados por el INAMHI, mediante un análisis de correlación obteniendo un valor para el coeficiente de correlación de Pearson de 0.85 (Figura 13), indicando un buen valor de relación entre los valores de caudales.

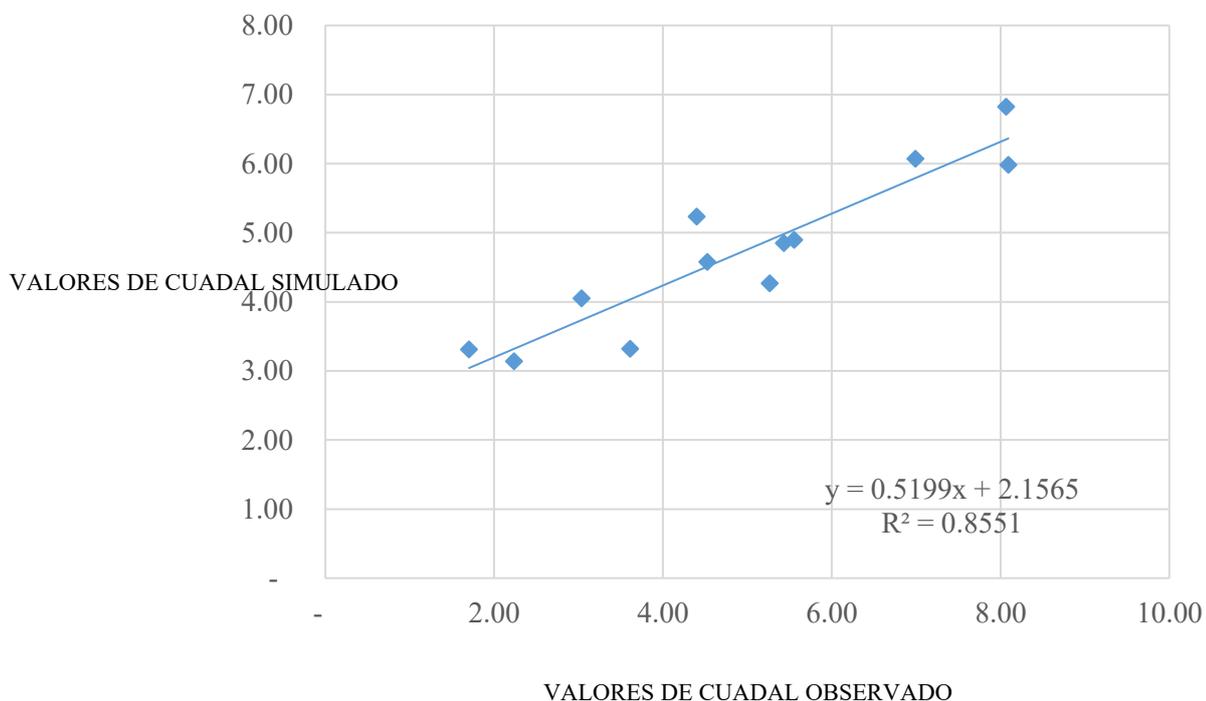


Figura 14. Análisis de regresión y correlación de los valores de caudales simulados y observados para el periodo 1990 - 2017

4.1.3 Validación de datos por medio del Índice Nash Sutcliffe

Los valores obtenidos a través de la simulación durante cada periodo fueron sometidos a validación por medio del índice Nash Sutcliffe, el cual indica con mayor certeza si existe una buena relación entre los valores mensuales por año, simulados y observados.

Los años tomados para validación fueron aquellos que poseen datos completos de cada uno de los meses en la estación hidrológica de referencia, esta validación mostró un valor de índice cercano a 1, por lo tanto, la eficiencia del ajuste entre los caudales simulados y observados es muy buena. Para los dos primeros periodos de estudio se tomó como referencia los valores de caudales de la estación Ambi DJ Cariyacu y para el tercer periodo la estación Blanco Pte. Carretera.

Para el periodo de simulación de los años 1990 – 1996 se tomaron en consideración los años 1992 y 1994 para la respectiva validación. (Tabla 12).

Tabla 12. Valores de caudales para la validación en el periodo 1990 – 1996

Periodo 1990 - 1996				
Mes	Año 1992		Año 1994	
	Caudal simulado (m³/s)	Caudal observado (m³/s)	Caudal simulado (m³/s)	Caudal observado (m³/s)
Enero	9.49	8.74	3.13	3.29
Febrero	10.37	9.71	2.83	2.38
Marzo	9.02	9.32	5.29	4.89
Abril	12.62	12.96	5.42	5.02
Mayo	11.57	12.05	5.55	5.45
Junio	12.49	11.76	3.96	2.79
Julio	9.86	10.69	1.02	0.82
Agosto	10.77	10.61	0.36	0.69
Septiembre	11.16	11.16	0.55	0.61
Octubre	10.47	11.36	2.70	1.82
Noviembre	10.43	11.36	3.38	2.94
Diciembre	10.30	10.717	3.16	3.47

Año	Índice	Eficiencia del ajuste
1992	0.71	Aceptable
1995	0.90	Muy buena

Para la validación por medio del índice Nash Sutcliffe, en los periodos 1997 – 2007 y 2008 – 2017, se realizó con los años 1998, 1999 (Tabla 13).

Tabla 13. Valores de caudales para la validación en el periodo 1997 – 2007

Periodo 1997 – 2007				
Año 1998			Año 1999	
Mes	Caudal simulado (m³/s)	Caudal observado (m³/s)	Caudal simulado (m³/s)	Caudal observado (m³/s)
Enero	3.86	3.97	4.50	3.68
Febrero	5.38	4.74	5.03	4.41
Marzo	6.00	6.24	7.20	6.20
Abril	6.15	5.76	8.04	7.07
Mayo	5.42	4.25	9.56	8.80
Junio	2.73	2.93	5.80	5.74
Julio	0.99	0.53	3.29	3.86
Agosto	1.22	0.23	1.89	2.45
Septiembre	0.49	0.33	5.22	4.60
Octubre	0.69	1.02	2.42	4.78
Noviembre	3.62	3.35	4.75	4.19
Diciembre	0.56	1.29	7.97	7.87

Año	Índice	Eficiencia del ajuste
1998	0.92	Muy buena
1999	0.73	Aceptable

Para el periodo de simulación de los años 2008 – 2017 se tomaron en consideración los años 2008 y 2009 para la respectiva validación. (Tabla 14).

Tabla 14. Valores de caudales para la validación en el periodo 2008 - 2017

Periodo 2008 – 2017				
Mes	Año 2008		Año 2009	
	Caudal simulado (m³/s)	Caudal observado (m³/s)	Caudal simulado (m³/s)	Caudal observado (m³/s)
Enero	1.79	1.22	1.90	1.70
Febrero	0.85	1.12	1.72	1.53
Marzo	1.86	1.63	1.79	1.41
Abril	2.13	2.27	2.79	2.28
Mayo	2.77	2.98	1.10	0.45
Junio	0.91	1.25	0.31	0.34
Julio	1.17	0.65	0.10	0.31
Agosto	0.52	0.45	0.42	0.32
Septiembre	0.21	0.46	0.30	0.34
Octubre	0.86	0.72	0.34	0.43
Noviembre	0.51	0.87	0.36	0.37
Diciembre	0.27	0.75	0.61	1.11

Año	Índice	Eficiencia del ajuste
2008	0.79	Aceptable
2009	0.77	Aceptable

El modelo SWAT constituye una buena herramienta para reproducir registros históricos de caudal y simular resultados allí donde no se disponga de datos de aforo, aunque lógicamente la exactitud dependerá de la calidad de la información de partida. Por ello la calibración con datos reales en algunos puntos de la cuenca, o en cuencas con similares características, es fundamental para conseguir unos resultados fiables.

La aplicación del modelo en la simulación puso de manifiesto diferencias significativas entre caudales observados y simulados. Para solucionar este problema se realizó un análisis de sensibilidad de las variables más influyentes en los resultados. En general, se observó una adecuada eficiencia del modelo SWAT y un buen ajuste de los valores simulados respecto de los observados. Un resultado llamativo fue la mayor eficiencia del modelo a escala diaria en la validación en relación con los datos diarios obtenidos en la calibración y los datos mensuales de la validación. En ambos casos se esperaba que la eficiencia diaria de la validación fuera menor a la encontrada en la calibración y menor a la escala mensual.

Los factores climatológicos principalmente relacionado con la precipitación, influyen de manera directa en la realización del modelo hidrológico generado a partir de la simulación en SWAT, es así que como se ha podido evidenciar en los resultados presentados de los valores de caudales, existe una relación directamente proporcional entre la precipitación y la oferta hídrica generada en la cuenca. Por ejemplo, el estudio realizado en Colombia, en la cuenca del río Dagua, en donde se analizó la influencia de las corrientes del Niño y la Niña, respecto a la oferta hídrica de esta área, se obtuvo que los valores de precipitación sufren reducciones del 39% (1111 mm/anales) y aumentos del 84% (2393 mm/anales) lo que genera en la media anual de la variable caudal, disminuciones del 40% (11,6 m³ /s) y aumentos del 50% (14,5 m³ /s) sobre su afluente (Carvajal y Gutiérrez, 2013). Por tanto, para contrastar los resultados simulados se han utilizado los datos de aportes diarios obtenidos de las estaciones meteorológicas presentes en la cuenca del río Ambi, como son las estaciones de Inguincho y Otavalo. La escasa precisión en la medida de los aportes a las estaciones durante los periodos de baja precipitación complica la calibración del modelo en estas condiciones. Por ello se consiguen muy buenos ajustes durante los años húmedos mientras que en los años secos las diferencias entre caudales simulados y observados son mucho mayores. En algunas ocasiones existen grandes diferencias que se atribuyen a una desigual distribución de las precipitaciones en la cuenca, sería conveniente disponer de una mayor densidad de estaciones pluviométricas en la zona.

De igual manera considerando otro factor climático como es la temperatura, dentro de la cuenca de río Ambi, este no genera una mayor incidencia, debido a que el área por donde se extiende el río no presenta de forma permanente glaciares en las elevaciones de mayor altitud, lo que, si ocurre en otros lugares, tanto a nivel nacional como internacional. Quintana (2008), menciona en su trabajo investigación que el constante cambio climático registrado ha provocado el retroceso de los glaciares en la zona de Sudamérica, y esto a su vez incrementa los valores de los caudales registrados en los diferentes ríos y afluentes de las redes hídricas.

Por otra parte, el cambio de la cobertura vegetal, otro factor tomado dentro del proceso de simulación, para cada uno de los periodos establecidos en la investigación, no ha reflejado una mayor incidencia en el cambio de los valores de caudal obtenidos (Tabla 13).

Tabla 15. Valores promedio de los caudales simulados y observados para cada periodo de prueba en la cuenca del río Ambi

Mes	Caudales Simulados			Caudales Observados		
	Periodo 1990-1996 (m ³ /s)	Periodo 1997-2007 (m ³ /s)	Periodo 2008-2017 (m ³ /s)	Periodo 1990-1996 (m ³ /s)	Periodo 1997-2007 (m ³ /s)	Periodo 2008-2017 (m ³ /s)
Enero	4.43	5.40	3.62	3.64	5.92	4.24
Febrero	4.29	4.97	6.74	4.28	5.97	4.29
Marzo	6.61	6.93	7.34	6.11	6.80	4.46
Abril	7.65	8.84	7.58	6.70	6.54	2.35
Mayo	6.93	8.63	8.24	6.02	8.47	5.84
Junio	5.89	5.55	4.52	5.38	3.83	3.24
Julio	4.72	2.56	3.99	4.29	1.64	2.94
Agosto	4.33	0.87	2.27	4.34	1.01	3.33
Septiembre	3.07	1.12	1.39	3.71	2.47	2.55
Octubre	5.18	1.23	3.52	4.72	3.09	2.20
Noviembre	4.36	4.41	4.42	5.02	4.92	7.40
Diciembre	4.80	6.09	5.49	4.62	5.19	5.95
Promedio Anual	5.19	4.72	4.93	4.90	4.66	4.07

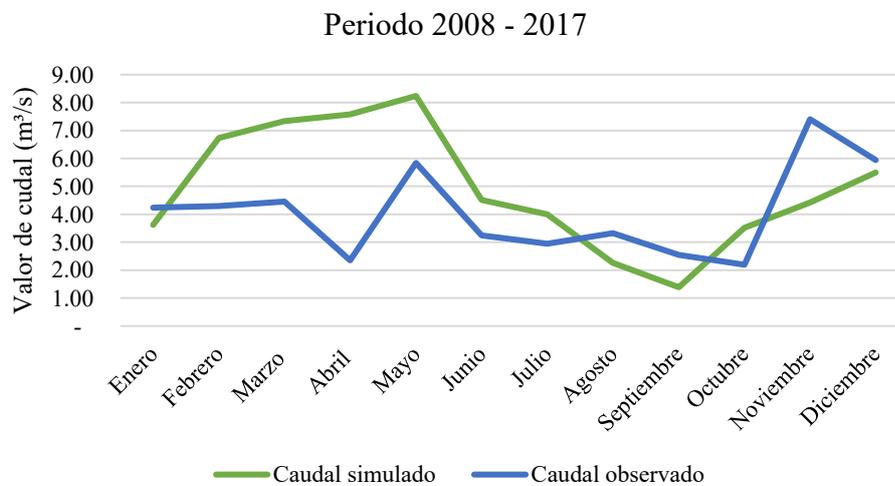
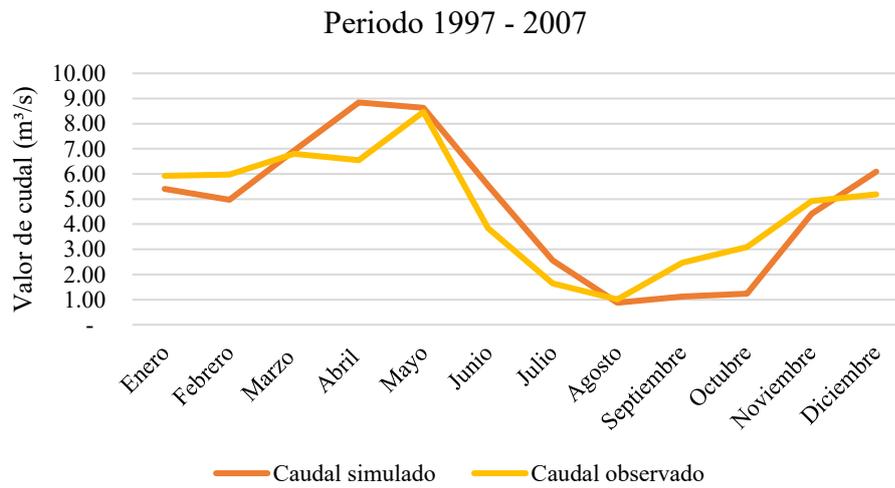
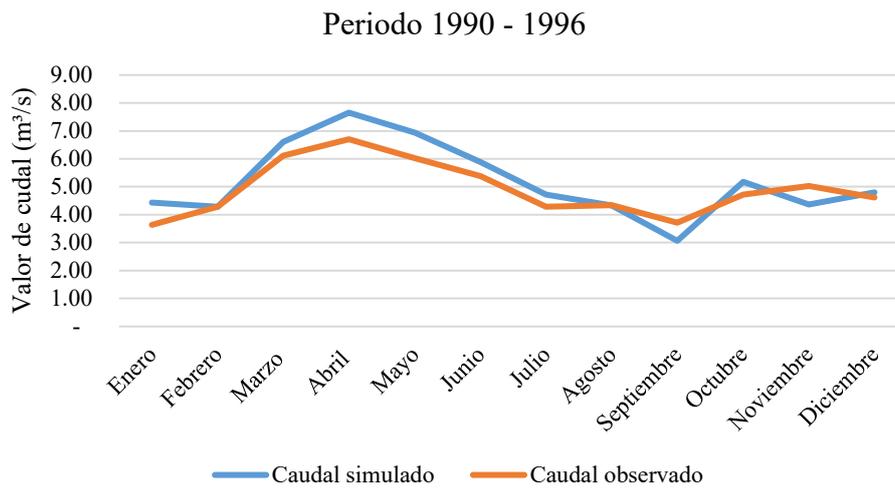


Figura 15. Comparación del caudal promedio anual simulado y observado en cada periodo de estudio

Los valores de los caudales de cada periodo (Tabla 15), indican que el caudal de agua (Oferta hídrica) se mantiene en promedio aproximado de $5\text{m}^3/\text{s}$, considerando el principio básico del ciclo hidrológico.

Por tanto, es importante considerar que la oferta hídrica calculada a través del modelo SWAT se mantendrá dentro de un valor medio durante los periodos de años analizados, lo que sugiere contrastar el cambio de la calidad de esta a lo largo de los años, debido a los cambios socioeconómicos generados a lo largo de la cuenca hidrográfica.

4.2 Estimación de la demanda hídrica en la cuenca del río Ambi, para el periodo 1990 - 2017

4.2.1 Usos del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Ambi

Las autorizaciones o concesiones de agua, establecidas a lo largo de la cuenca hidrográfica del río Ambi por parte de la SENAGUA como Autoridad Competente del recurso hídrico, han sido identificadas sumando un total de 775 autorizaciones de agua a lo largo del periodo de años analizado (Figura 15).

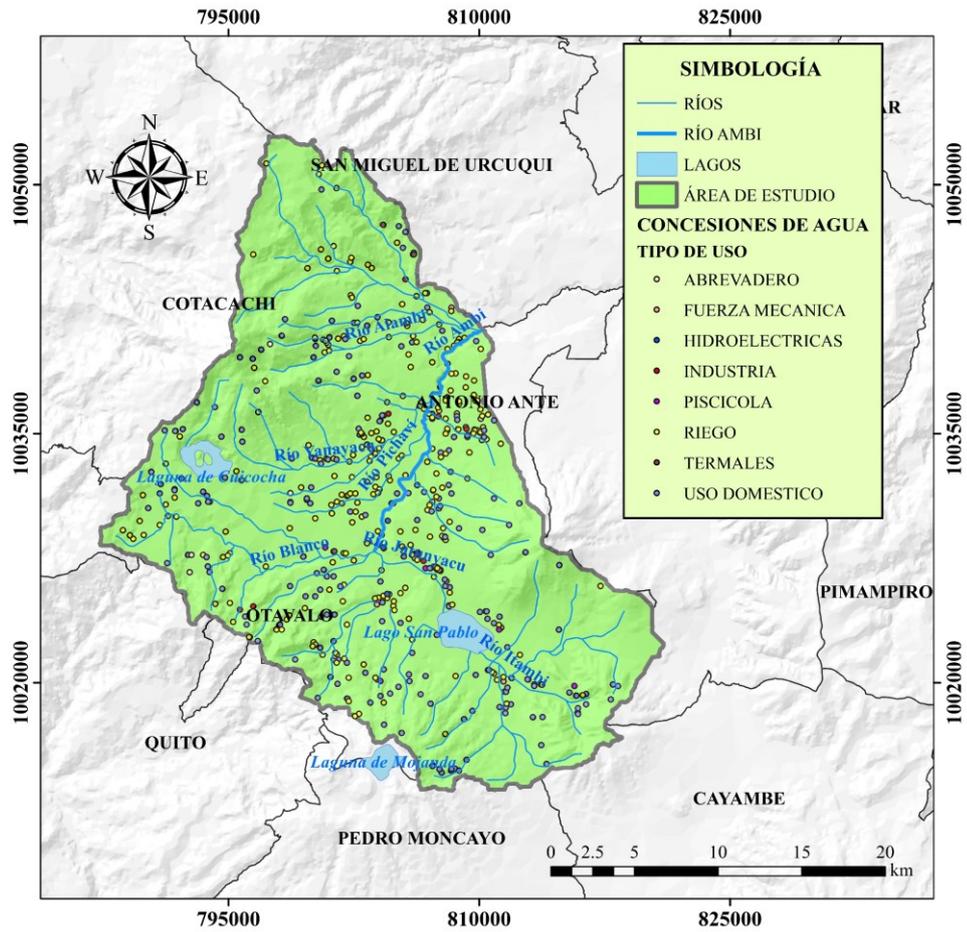


Figura 16. Mapa de puntos de ubicación de las concesiones de agua en la cuenca del río Ambi

La información procesada a través de los datos proporcionados por la SENAGUA muestra cada uno de los usos confinados para el recurso hídrico de la cuenca (Tabla 14)

Tabla 16. Uso total del recurso hídrico para cada periodo de años en la cuenca del río Ambi

Uso	Periodo 1990 – 1996 (l/s)	Periodo 1996 – 2007 (l/s)	Periodo 2008 – 2017 (l/s)
Abrevadero	0	2.89	4.39
Fuerza Mecánica	288	288	288
Hidroeléctricas	135	2735	8035
Industria	9.6	98.8	99.73
Piscícola	214.65	219.07	219.07
Riego	2 142.87	7 116.38	7 802.34
Termales	0	5	6.2
Uso Doméstico	602.9	853.56	921.05
Total	3 393.02	11 318.70	17 375.78

Fuente: SENAGUA (2019)

En cada periodo de tiempo se puede apreciar que el recurso hídrico para las hidroeléctricas, riego y uso doméstico, los valores son mayores respecto a los demás tipos de uso que se dan a lo largo de la cuenca del río Ambi.

El cálculo de los valores totales respecto al uso que se da al recurso hídrico en la cuenca para el periodo de tiempo comprendido en los años 1990 – 2017 se observa que el uso de agua ha ido en aumento, desde un total de 3 393.02 a 17 375.78 litros por segundo del caudal utilizado en el área de estudio. (Tabla 14). De igual manera es evidente un uso en mayor escala para lo referente al riego, respecto a los demás tipos de uso, siendo este un valor directamente proporcional al incremento de la actividad agrícola, visible en las imágenes de cobertura vegetal empleadas durante la investigación (Figura 9).

La demanda hídrica o el uso del recurso hídrico se encuentra relacionado con la calidad de agua de este. Los cambios de uso del suelo, así como las diferentes actividades antrópicas afectan a la calidad del agua. El estado del recurso hídrico

en la cuenca y la interrelación del recurso con las actividades de los usuarios muestra marcadas diferencias a lo largo de la cuenca. Cada grupo de usuarios tiene necesidades específicas en cuanto al recurso hídrico y su utilización origina cambios en las condiciones del agua.

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 a lo largo de la cuenca, principalmente en las áreas con presencia de asentamientos poblacionales (Figura 9), lo que supone una mayor demanda hídrica para abastecer con el riego para las tierras que se encuentran cultivadas. Un caso similar se ha registrado en la cuenca del río Quindío, aquí el uso del suelo ha mostrado una evolución estrechamente ligada al proceso económico vivido desde la época de la colonización. A finales del siglo XIX se realizó la explotación natural del caucho. Iniciando el siglo XX se cultivó maíz, tabaco y café, predominando el cultivo de este último a partir de 1930, actualmente prima el cultivo de pastos y plátano (León y Obregón, 2011).

Al igual que en la cuenca del río Ambi, en el área del río Quindío la economía del departamento de Quindío depende básicamente del sector agrícola principalmente, y pecuario, sobresalen los cultivos de café, plátano, cítricos, yuca y las exportaciones pecuarias de carne y leche, como las más importantes (León y Obregón, 2011).

La demanda hídrica en la cuenca del río Ambi, presenta un mayor valor en lo correspondiente al sector agrícola (riego), alcanzado un valor mayor a los 7 000 l/s durante el periodo de estudio (Tabla 14), sustentando la dependencia agrícola de la cuenca, partiendo de este punto es importante tomar en cuenta que adicional a la cantidad de recurso hídrico necesario para abastecer esta actividad, se genera un problema respecto a la calidad de agua, y por ende a la oferta hídrica.

La demanda hídrica al igual que la oferta hídrica se ve afectada por la calidad del recurso, 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 Costa Rica, un trabajo de

investigación realizado en el río Sarapiquí ha establecido a este 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 (Piedra, Romero, Sánchez, y Velásquez, 2004). 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 que se le da al recurso se verían afectados.

Por tanto, cada uso del recurso hídrico que se lleve a cabo debe ser controlado, de forma que la demanda hídrica no genere inconvenientes, en las diferentes actividades desde el uso doméstico, agrícola y de recreación hasta aquel enfocado en la industria.

4.3 Determinación del índice de escasez hídrica en la cuenca del río Ambi

A partir de los valores obtenidos de la simulación realizada mediante SWAT, así como también los valores de los usos del recurso hídrico dentro de cuenca del río Ambi, se muestra la relación entre la oferta y la demanda hídrica de la cuenca y por tanto el resultado del índice de escasez hídrica de la misma mediante la aplicación de la fórmula.

Tabla 17. Valores de oferta y demanda hídrica obtenidos para la cuenca del río Ambi

Fuente	Periodo 1990 - 1996		Periodo 1997 – 2007		Periodo 2008 – 2017	
	Oferta hídrica (m ³ /s)	Demanda hídrica total (m ³ /s)	Oferta hídrica (m ³ /s)	Demanda hídrica total (m ³ /s)	Oferta hídrica (m ³ /s)	Demanda hídrica total (m ³ /s)
Río Ambi (principal)	5.19	3.39	4.72	11.32	4.93	17.38

Los valores obtenidos en la relación oferta/demanda hídrica, muestran que la demanda es mayor en los periodos 1997-2007 y 2008-2017, esto debido a que se encuentra contabilizado el caudal dispuesto para el uso de Hidroeléctricas y la fuerza mecánica, siendo esta última correspondiente a los molinos hidráulicos que existen en diferentes puntos de la cuenca hidrográfica.

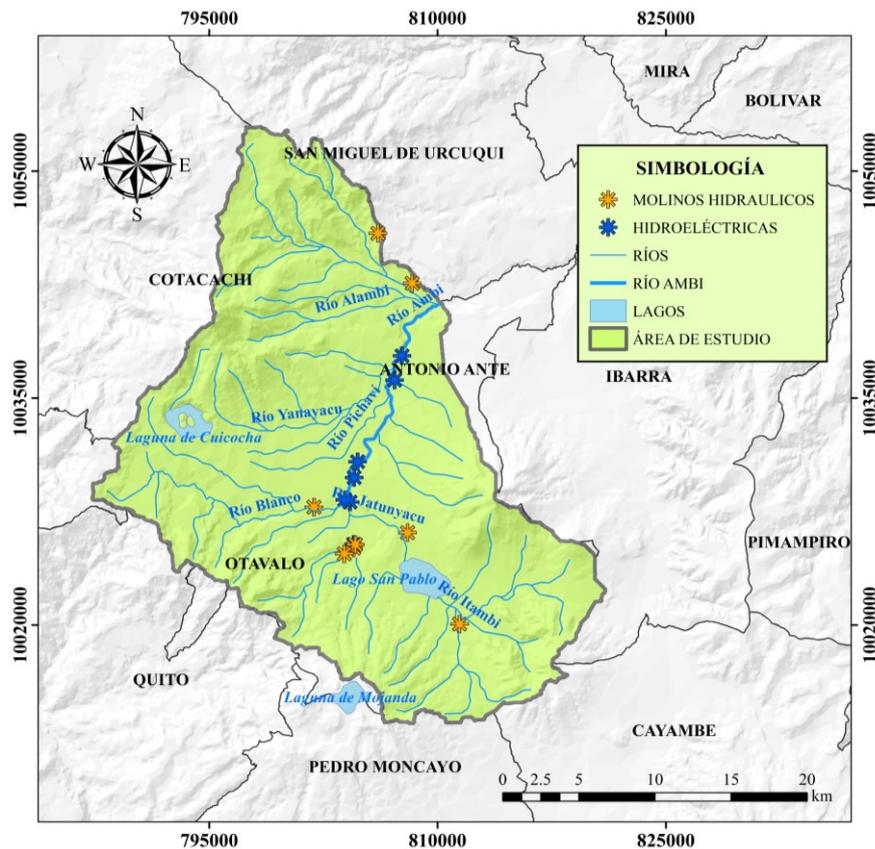


Figura 17. Ubicación de las hidroeléctricas y molinos hidráulicos en la cuenca del río Ambi

De este modo el caudal concesionado para el uso de las hidroeléctricas y molinos hidráulicos, al momento de realizar el cálculo del índice de escasez hídrica no fue tomado en cuenta para el valor final de la demanda hídrica, debido a que dicho caudal no solo es aprovechado para la generación eléctrica, sino que luego de pasar a través de las turbinas de las hidroeléctricas y molinos, ese mismo caudal puede ser aprovechado para otros usos en la cuenca, principalmente para las actividades agrícolas (riego).

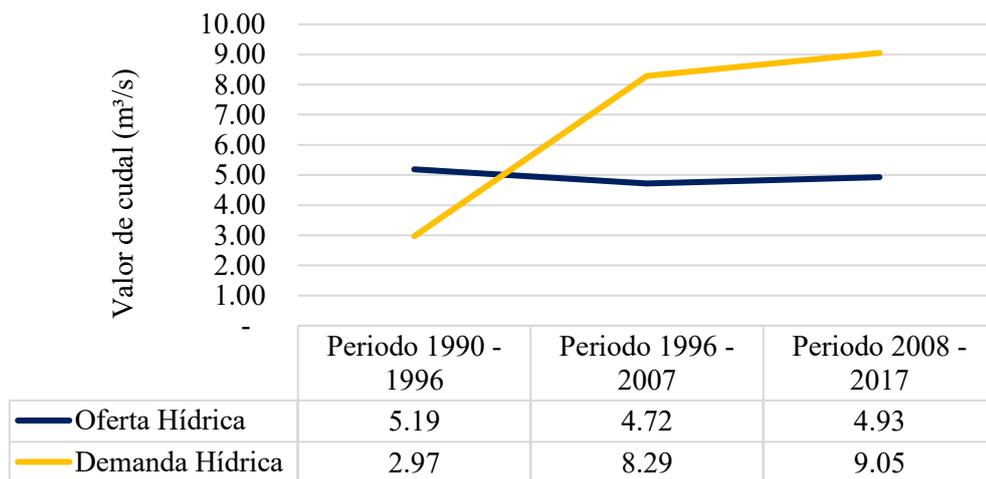


Figura 18. Comportamiento de la oferta y demanda hídrica para el periodo 1990 - 2017

Analizando los valores generales de la demanda hídrica neta en el segundo y tercer periodo, estos son mayores a la oferta hídrica dentro del área de estudio. El incremento de la demanda respecto a la oferta hídrica corresponde principalmente a la evolución de las actividades sociales y productivas que se realizan en la cuenca, esto se ve reflejado en el aumento del número de autorizaciones de agua proporcionadas por la SENAGUA (Figura 19).

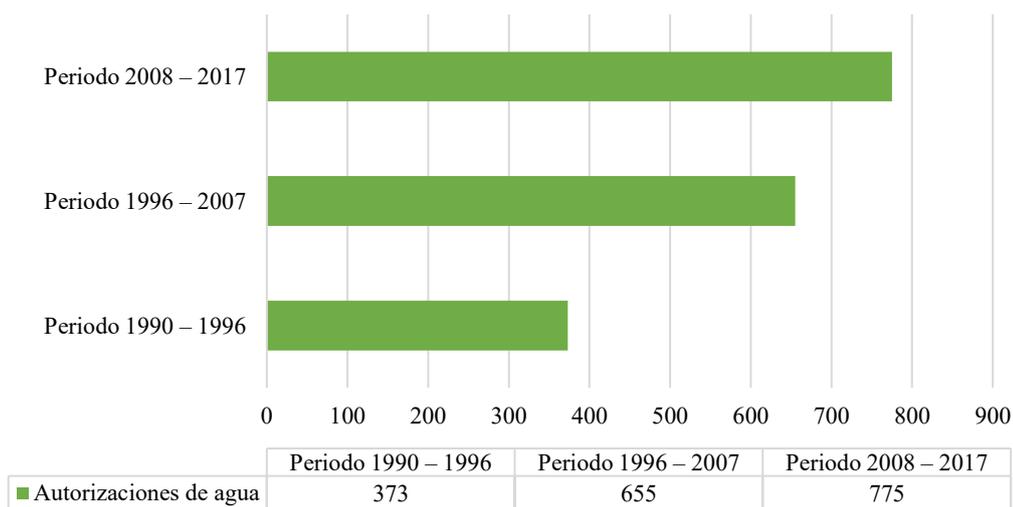


Figura 19. Incremento de las autorizaciones de agua en el área de estudio

En área de estudio existe un incremento de 17 929.11 en la actividad agrícola en los dos últimos periodos de años (Figura 20) aumentando el caudal necesario para el uso de riego, adicionalmente se ha incrementado el caudal autorizado para el uso doméstico, por esta razón la demanda hídrica es mayor respecto a los años anteriores, ejerciendo una presión sobre el valor de la oferta que se ha mantenido en un caudal promedio de $5\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 21).

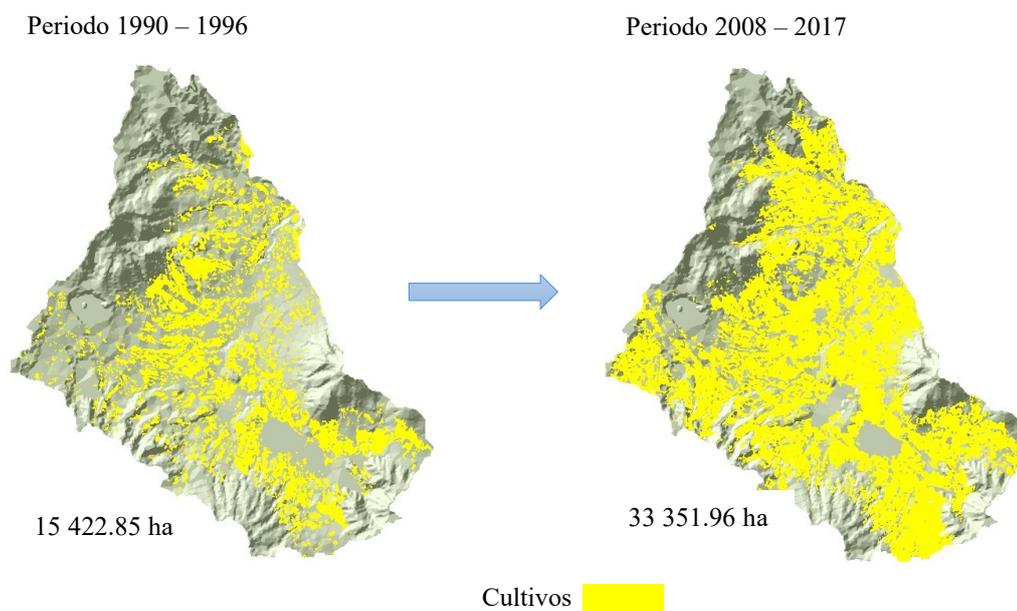


Figura 20. Incremento de la actividad agrícola en el área de estudio

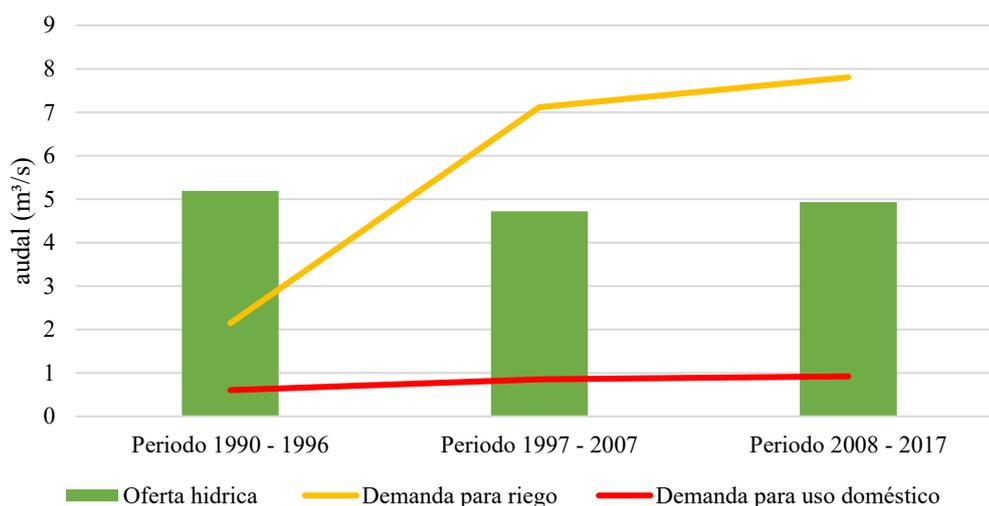


Figura 21. Incremento del caudal para uso doméstico y riego en el periodo 1990 - 2017

4.3.1 Zonificación del índice de escasez hídrica

Para el periodo 1990-1996 se obtuvo para en las unidades hidrológicas: río Blanco, Pichaví y Yanayacu, un índice de escasez hídrica no mayor al 20%. Esto significa que la escasez hídrica es media, incluso mínima en el caso del río Blanco con un índice de 8.79 %, debido a que el valor de la oferta hídrica es mayor que la demanda de recurso (Tabla 18).

El caudal autorizado para las actividades de mayor demanda hídrica: riego y uso doméstico, es menor que en las unidades hidrológicas de los ríos Ambí y Jatunyacu, cabe mencionar que a pesar de que el caudal destinado para el uso de riego en la unidad hidrológica del río Pichaví es mayor respecto a los otros ríos, el caudal de la oferta hídrica es de 4.89 m/s, por esta razón el valor del índice de escasez hídrica es medio (Figura 22).

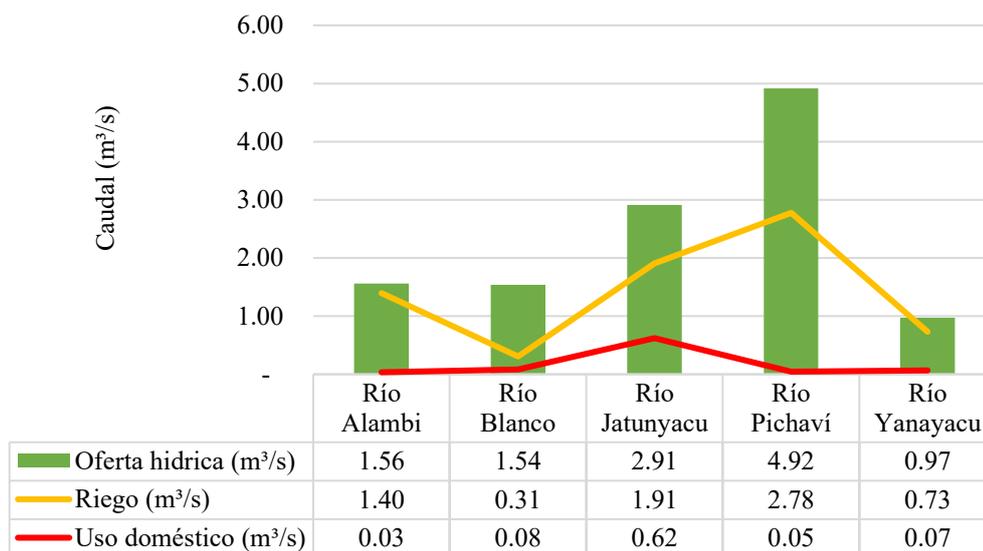


Figura 22. Oferta hídrica por microcuenca para el periodo 1990 – 1996

La escasez hídrica en las unidades hidrológicas de los ríos Alambí y Jatunyacu es media alta, con un valor de índice de 30.73 % y 42.74 % respectivamente (Tabla 18). Tomando en cuenta los usos mayoritarios de agua: riego y uso doméstico, los valores del caudal autorizado es mayor, principalmente el del uso doméstico para la unidad hidrológica del río Jatunyacu debido a que esta cubre el área de la ciudad de Otavalo y sus alrededores.

Tabla 18. Zonificación del índice de escasez para el periodo 1990 - 1996

Microcuencas (Fuente)	Oferta hídrica (m³/s)	Demanda hídrica (m³/s)	Índice de escasez hídrica (%)	Categoría	Característica
Río Alambí	1.56	0.48	30.73	Medio Alto	Demanda apreciable
Río Blanco	1.59	0.14	8.79	Mínimo	Demanda muy baja con respecto a la oferta
Río Jatunyacu	2.95	1.26	42.74	Medio Alto	Demanda apreciable
Río Pichaví	4.90	0.94	19.19	Medio	Demanda baja con respecto a la oferta
Río Yanayacu	0.81	0.13	16.12	Medio	Demanda baja con respecto a la oferta

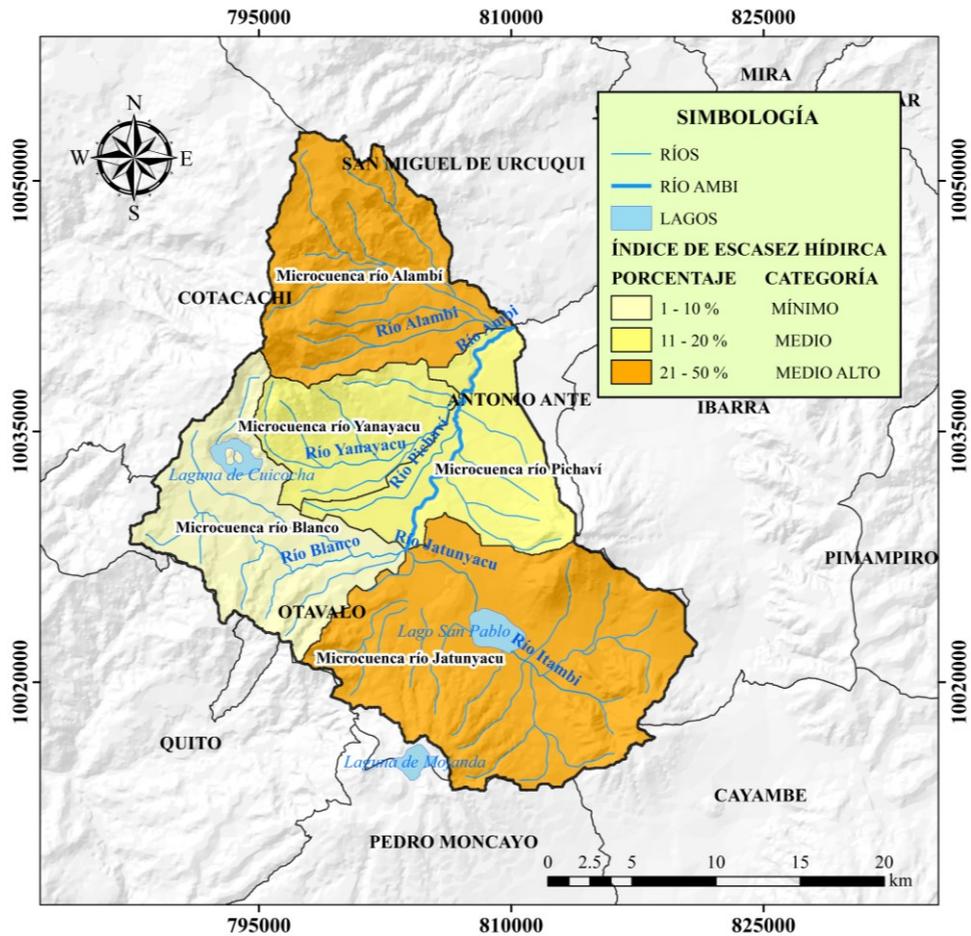


Figura 23. Mapa de zonificación del índice de escasez hídrica para el periodo 1990 – 1996

Para el periodo 1997-2007 se obtuvo para la unidad hidrológica del río Blanco un índice de escasez de 31.21 %, este valor indica que la escasez hídrica es media alta, por lo tanto, la demanda es apreciable respecto a la oferta hídrica. Para las unidades hidrológicas de los ríos: Alambí, Jatunyacu, Pichaví y Yanayacu, la escasez hídrica es alta, debido a que el valor del índice es mayor al 50 % (Tabla 19).

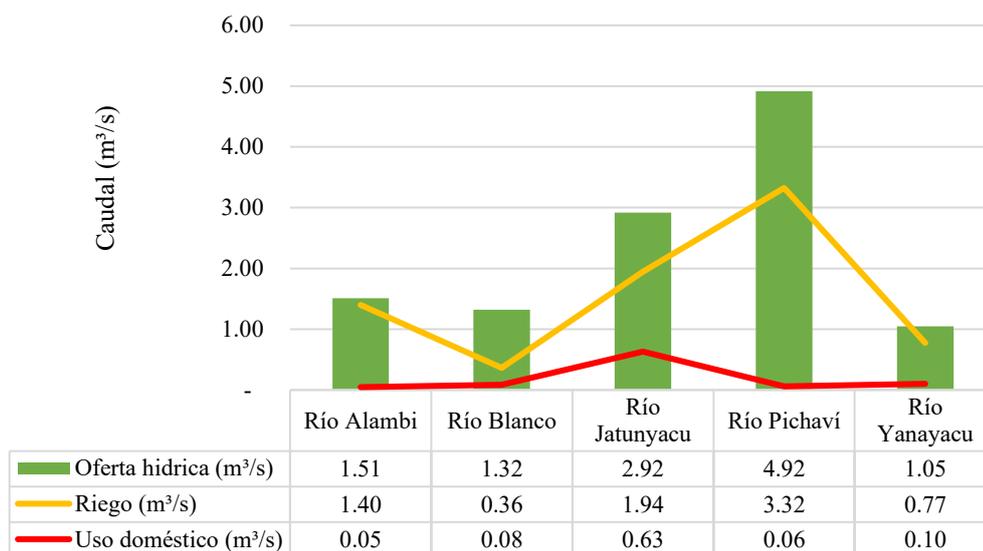


Figura 24. Oferta hídrica por microcuenca para el periodo 1997 - 2007

El incremento del valor del índice de escasez para estas unidades hidrológicas es directamente proporcional al incremento del caudal autorizado para las actividades realizadas dentro de la cuenca, principalmente el caudal para el uso de riego en este periodo de años (Figura 24).

Tabla 19. Zonificación del índice de escasez para el periodo 1997 – 2007

Microcuencas (Fuente)	Oferta hídrica (m³/s)	Demanda hídrica (m³/s)	Índice de escasez hídrica (%)	Categoría	Característica
Río Alambí	1.56	1.43	91.67	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Blanco	1.54	0.48	31.21	Medio Alto	Demanda apreciable
Río Jatunyacu	2.91	2.75	94.50	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Pichaví	4.92	2.82	57.36	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Yanayacu	0.97	0.8	82.36	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta

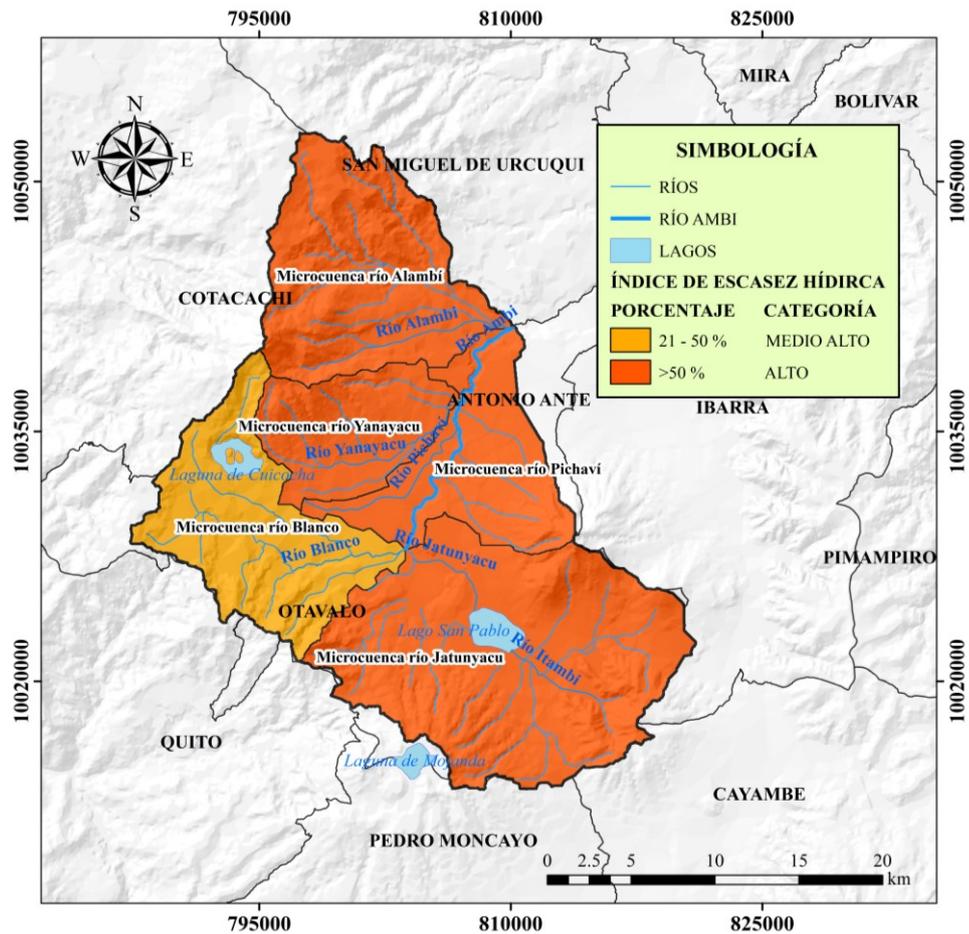


Figura 25. Mapa de zonificación del índice de escasez hídrica para el periodo 1997 – 2007

Para el periodo 2008 – 2017 se obtuvo que en la unidad hidrológica del río Blanco el índice de escasez hídrica fue 41.73%, esto significa que la escasez es media alta, aumentando un 10% a diferencia del periodo anterior, debido al incremento del número de autorizaciones de agua principalmente destinadas para el uso de riego. Mientras que la escasez en las unidades hidrológicas Alambí, Jatunyacu, Pichaví y Yanayacu es alta, debido a que el valor del índice supera el 50%.

El valor del índice para la microcuenca del río Alambí, respecto al periodo anterior ha aumentado de 91.67 % a 96.14 % a causa de la autorización para nuevos caudales de uso doméstico, para la microcuenca del río Pichaví el incremento del valor del índice se debe al aumento del caudal destinado para el uso de riego de 0.55 m³/s más que en los años anteriores. Por otra parte, las unidades hidrológicas Jatunyacu y Yanayacu la escasez hídrica se mantiene similar al periodo anterior, donde la

presión de la demanda sobre la oferta hídrica es a causa del caudal utilizado para el riego.

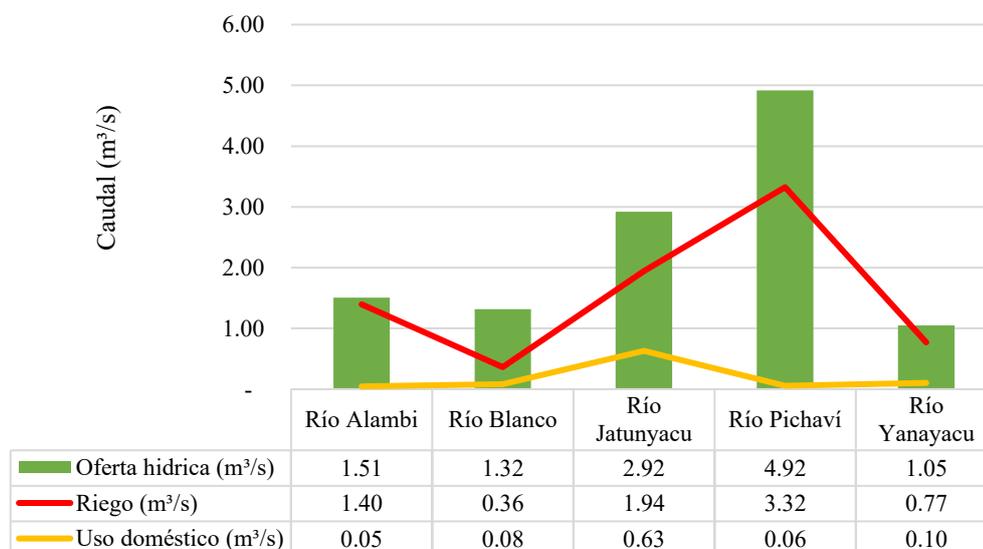


Figura 26. Oferta hídrica por microcuenca para el periodo 2008 - 2017

Tabla 20. Zonificación del índice de escasez para el periodo 2008 - 2017

Microcuencas (Fuente)	Oferta hídrica (m³/s)	Demanda hídrica (m³/s)	Índice de escasez hídrica (%)	Categoría	Característica
Río Alambi	1.51	1.45	96.14	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Blanco	1.32	0.55	41.73	Medio Alto	Demanda apreciable
Río Jatunyacu	2.92	2.8	95.89	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Pichaví	4.92	3.38	68.75	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Yanayacu	1.05	0.87	83.03	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta

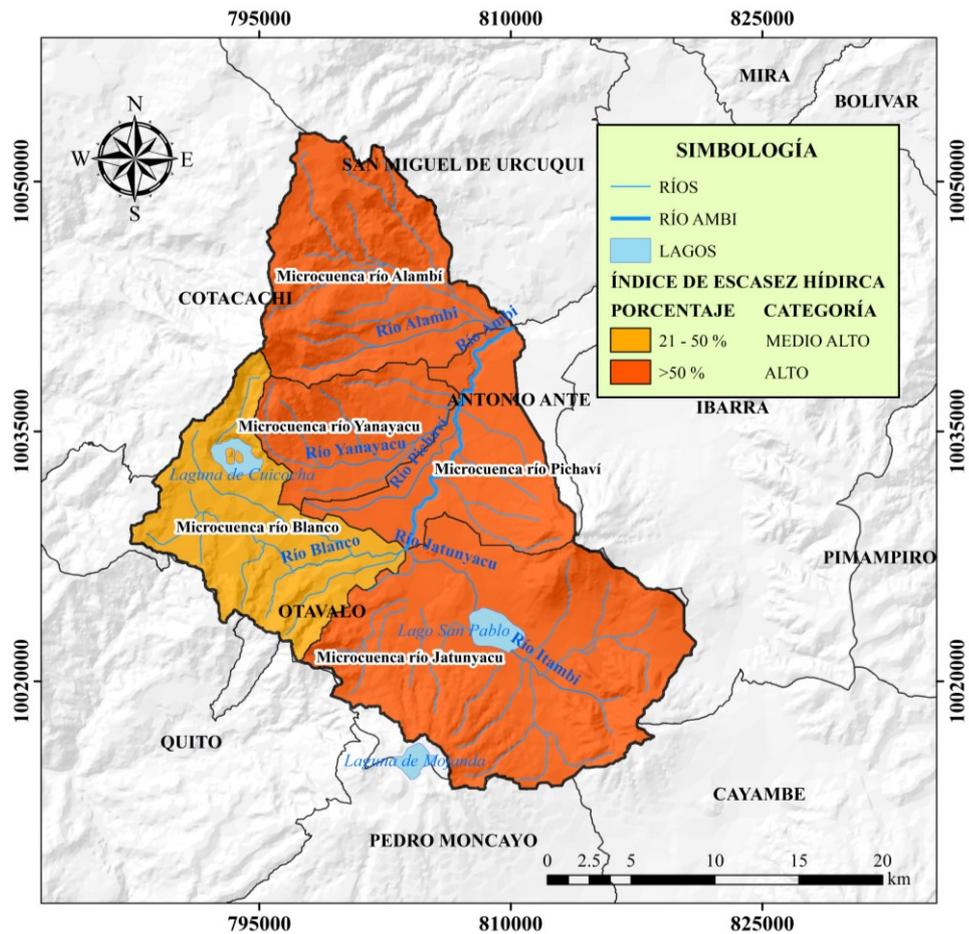


Figura 27. Mapa de zonificación del índice de escasez hídrica para el periodo 2008 - 2017

Para el periodo 1990 – 2017 se obtuvo en el área de estudio un índice de escasez hídrica promedio de 57,35 %, indicando que la escasez hídrica es alta, esto significa que la oferta hídrica alcanza a cubrir los requerimientos de la demanda, pero existe una presión sobre el recurso. La escasez hídrica promedio para las unidades hidrológicas de los ríos Blanco y Pichaví es media alta, con un índice de escasez de 27.24 % y 48.44 %, mientras que las unidades hidrológicas de los ríos: Alambí, Jatunyacu y Yanayacu el índice de escasez es superior al 50%, por lo tanto, la escasez hídrica es alta. De acuerdo con la zonificación por microcuenca el valor del índice tuvo un incremento de 50 % entre el primer y el último periodo de análisis, a causa de las actividades identificadas de mayor demanda hídrica correspondiente al riego y uso doméstico.

Tabla 21. Valores del índice de escasez hídrica promedio para las microcuencas del área de estudio (1990 - 2017)

Microcuenca (Fuente)	IEH Periodo 1990-1996 (%)	IEH Periodo 1997-2007 (%)	IEH Periodo 2008-2017 (%)	Promedio	Categoría	Característica
Río Alambí	30.73	91.67	96.14	72.85	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Blanco	8.79	31.21	41.73	27.24	Medio Alto	Demanda apreciable
Río Jatunyacu	42.74	94.50	95.89	77.71	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Río Pichaví	19.19	57.36	68.75	48.44	Medio Alto	Demanda apreciable
Río Yanayacu	16.12	82.36	83.03	60.50	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta
Promedio	23.31	71.42	77.11	57.35	Alto	Demanda alta con respecto a la oferta

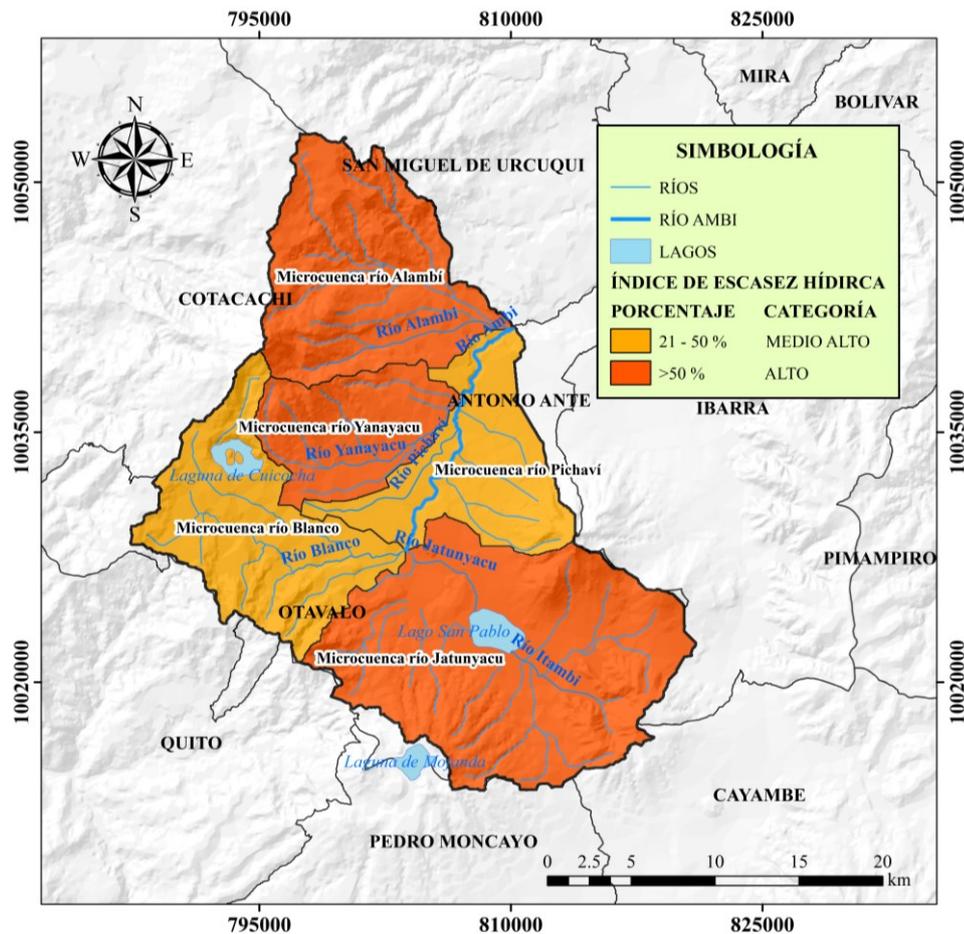


Figura 28. Mapa de representación del índice de escasez hídrica por microcuenca del área de estudio para el periodo 1990 - 2017

El incremento de la demanda hídrica está relacionado directamente con el porcentaje en el índice de escasez, en casos donde la calidad del recurso hídrico se

ve impactada, la escasez del agua se nota evidente, no por la disponibilidad de esta sino para la calidad inadecuada para el consumo humano o bien para su uso en las diferentes actividades productivas, por lo que es necesario una mejor gestión a nivel de microcuenca para evitar conflictos con la conservación y uso del agua. (Budds, 2012).

La determinación del índice de escasez hídrica cumple la función de indicador del nivel de presión al cual se encuentran afectados los recursos hídricos, por tanto, los valores de la relación oferta/demanda hídrica constituyen la base del estado del recurso hídrico en términos de espacio y tiempo (Betancur, Jaramillo y Molina, 2011). De acuerdo con los valores generados a partir del cálculo del índice de escasez para el recurso en la cuenca del río Ambi, se ha reflejado el grado de presión entre la relación de la oferta y demanda hídrica, al presentar un porcentaje del índice alto durante los periodos de análisis. (Tabla 21).

Si bien, uno de los principales factores que ejercen presión sobre los recursos hídricos es el aumento poblacional, al cual se le adiciona las demandas de uso, principalmente relacionado con el sector agrícola e industrial, esta presión sobre el recurso genera consecuencias adversas que se revierten a la población que demanda el agua (Domínguez et al., 2014). De acuerdo con los datos manejados por el INEC (2011), dentro del área de estudio de la cuenca del río Ambi existe un total de 150 000 habitantes aproximadamente, cifra que tiende a aumentar y, por ende, esto supondría un incremento en la demanda del recurso hídrico.

Dentro de la estructura de consumo de agua en la cuenca del río Ambi, la demanda hídrica es preponderantemente agrícola, debido a que el valor estimado del consumo, supera significativamente al resto de usos que se le da al recurso en la cuenca, esta composición en la demanda hídrica se puede explicar al considerar el hecho de que la mayor parte del área de la cuenca tiene como principal actividad de ingresos económicos a la agricultura.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La oferta hídrica para el área de estudio en la cuenca hidrológica del río Ambi es un caudal promedio anual de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, determinada para en el periodo 1990 -2017. El caudal de la oferta hídrica en los meses de la época lluviosa es de 7 a $8 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en la época seca el caudal es de 2 a $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

La demanda hídrica total es de $17.38 \text{ m}^3/\text{s}$, este valor de caudal corresponde a los requerimientos de agua de los ocho tipos de usos identificados dentro del área de estudio durante el periodo de 1990 -2017. El mayor caudal en la demanda hídrica corresponde a los usos de: hidroeléctricas, riego y doméstico. El valor de la demanda hídrica neta, descontando los caudales autorizados para el uso de hidroeléctricas y fuerza mecánica (molinos hidráulicos) es de $9.05 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se determinó que el índice de escasez hídrica para el área de estudio en la cuenca hidrológica del río Ambi es alto con un valor de 57.35 % para el periodo 1990 – 2017, este valor representa una demanda alta con respecto a la oferta hídrica que ofrece la cuenca, por ende, existe una presión sobre el recurso hídrico.

Se zonificaron cinco unidades hidrológicas correspondientes a los ríos: Alambí, Blanco, Jatunyacu, Pichaví y Yanayacu, La escasez hídrica para estas unidades hidrológicas aumentó progresivamente durante los periodos de años analizados, con un incremento al valor promedio de 50 % entre el primer y último periodo. El valor promedio índice de escasez hídrica para el periodo de 1990 -2017 en las unidades hidrológicas de los ríos Blanco y Pichaví es de 27.24 % y 48.44 %, esto significa que la escasez hídrica es media alta, mientras que para los ríos Alambí, Jatunyacu y Yanayacu la escasez hídrica fue alta debido a que el índice supera el 50%.

La relación oferta/demanda hídrica para la cuenca del río Ambi, constituye un indicador del estado del recurso hídrico de la zona, su expresión mediante el índice de escasez hídrica ha permitido determinar el conflicto generado y el alto nivel de

presión sobre el recurso hídrico en gran parte del territorio del área de estudio, lo que supone un punto de partida para elaborar un plan de gestión para la cuenca.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda ampliar la investigación respecto a la calidad del agua, tomando en cuenta las descargas generadas a partir del consumo de agua en las diferentes actividades realizadas a lo largo de la cuenca.

En base al estudio realizado, generar un modelo de proyección para años futuros, de modo que la investigación sea vinculada para la generación de un Plan de Ordenamiento Territorial para cuenca del río Ambi, de tal modo que aporte sea aplicado para la toma de decisiones enfocadas a la gestión del recurso hídrico.

Vincular la participación de los GAD's presentes a lo largo de cuenca del río Ambi, como son el Municipio de Cotacachi y Otavalo principalmente, de manera conjunta con la Prefectura de Imbabura, las autoridades del agua, SENAGUA, de tal modo que se trabaje en estrategias que estén encaminadas a la conservación, protección y calidad de las fuentes hídricas de la zona.

REFERENCIAS

- Abrams, L. (2009). *Water scarcity*.
www.africanwater.org/drought_water_scarcity.htm
- Aguilar, G. y Oñate, F. (2017). *Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo*. Ecuador.
- Almeida, A. (2014). *Una revisión de la evaluación de la calidad de agua de los ríos de la provincia de Imbabura*. Trabajo de titulación de Ingeniero en Gestión Ambiental. Universidad Técnica Particular de Loja.
- 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 titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil. Sangolquí – Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas, ESPE.
- Araneda J. (2017). *Estudio de evaluación de la peligrosidad por sequías en la cuenca del río Paute (Ecuador), escenarios presentes y futuros*. Santander
- Arroyo, L., Araya, E. y Heidinger, H. (2010). *Modelo hidrológico SWAT como herramienta para procesos de toma de decisión*. (Informe técnico N° 14). Costa Rica.
- Arteaga, J., Massa, P., Martínez V. y Viñan, C. (2017). *Presión Demográfica Sobre el Recurso Hídrico y Su Relación Con la Sostenibilidad de los Destinos Turísticos. Un Análisis Para el Sur de Ecuador*. Revista Portuguesa de Estudos Regionais, n° 47
- Azqueta, D. (1994). *Análisis económico y gestión de recursos naturales*. Alianza

Editorial S.A., Madrid, España.

Baumer, O. (1990). Predictions of Soil Hydraulic Parameters. WEPP Data Files for

Indiana SCS National Soil Survey Lab. Lincoln, Nebraska, United States

Barbudo, L., Ochoa, J. y Verbel, E. (2016). *Aplicación del modelo SWAT en el estudio hidrosedimentológico de la cuenca de la quebrada San Pedro en el municipio de Curumaní, departamento del Cesar*. Trabajo de titulación de Ingeniero en Hidrología, Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.

Barrantes, G. y Vega M. (2002). *Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque y su aplicación al ajuste de tarifas. Preparado para ASOTEMPISQUE. Financiado por el Fondo Canje Deuda Costa Rica Canadá, el Programa de Pequeñas Donaciones (PPD) de PNUD y la Fundación CR-USA*.

Bergstrom, S. (1991). Principles and confidence in hidrological modeling. *Nordic Hidrology*, 22(2), 123-136

Betancur, T., Jaramillo, C. y Molina, F. (2011). Índices de escasez y de calidad del agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico, aplicación en la jurisdicción de Corantioquia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 10, No. 19, pp. 33-46

BID. (2009). Water: a threatened resource in Latin America and the Caribbean,

Washington, Nov 17. Recuperado de:

<http://www.iadb.org/es/noticias/anuncios/2009-11-17/hoja-informativa-agua-un-recurso-en-jaque-en-america-latina-y-el-caribe,5956.html>

Boyd, J. y Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for

- standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63:616-626.
- Budds, J. (2012). La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 52: 167-184
- Bustamante, G., Otoyá, L. y Vásquez, G. (2008). Estimación de la oferta hídrica con información escasa en ecosistemas estratégicos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4366-4380.
- Cabrera, H., Garcés, M. y Paredes, P. (2012). *Proyecto de desarrollo de capacidades para el uso seguro de aguas servidas en agricultura*. Santa Fe de Bogotá – Colombia.
- Cabrera, J. (2012). *Modelos hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.
- Cabrera, W. (2002). *Propuesta de manejo del río Ambi, provincia de Imbabura*. Trabajo de titulación de Ingeniero en Ejecución Agroforestal. Quito – Ecuador. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Cáceres, D., Conti, G., Díaz, S. y Quétier, F. (2007). Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario. *Gaceta ecológica número especial 84-85 (2007): 17-26*
- Carvajal A. y Gutierrez, S. (2013). Estudio de la Influencia del Fenómeno El Niño - Oscilación del Sur en la Oferta Hídrica de la Cuenca Hidrográfica del Río Dagua. *Entre Ciencia e Ingeniería*, pp 26 – 33
- Chan, A. (2011). Cultural services and non-use values. *Natural Capital. Theory and*

- Practice of Mapping Ecosystem Services. Oxford University Press Inc., N.Y., USA. pp. 206-228.*
- CEPAL. (2012). *Diagnóstico de la Estadística del Agua en Ecuador*. Ecuador.
- Cerón, C., Franco, W., Freire, E. y Peñafiel, M. (2016). Biodiversidad productiva y asociada en el Valle Interandino Norte del Ecuador. *Bioagro*, 28(3), 181-192.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Tercera edición. Ediciones RIALP S.A., Madrid. 568
- Constitución de la República del Ecuador (2008). Registro Oficial, 449 (20 Octubre de 2008)
- Costa, C., Domínguez, E., Rivera, H. y Vanegas, R. (2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis o una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista ingeniería e hidrología. pp. 18-22.*
- Córdoba, R. De Keizer, O. y Guerrero, E. (2006). *La Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los Recursos Hídricos*. UICN, Quito, Ecuador. 78 pp.
- CORPONARIÑO. (2007). *Plan de acción en biodiversidad*. Bogotá – Colombia.
- Daofeng, L., Ying, T., Changming, L., y Fanghua, H. (2004). Impact of land-cover and climate changes on runoff of the source regions of the Yellow River. *Journal of Geographical Sciences*, 14, 330–338.
- De 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*. UICN-Sur, Ecuador
- De Groot, R., Wilson, M. y Boumans, R. (2002). A typology for the classification,

- description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*, 41(3), 393-408.
- Del Río, J. (2010). *Introducción al tratamiento de datos espaciales en la hidrología*. España: Bubok.
- Demissie, M., Knapp, V., Singh, J. y Xie, H. (2007). Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*, 10.1016/j.jhydrol.2007.08.004, 344, 3-4, (210-222), (2007).
- Domínguez, E., Rivera, H., Vanegas, R. y Moreno, P. (2014). *Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano*. Colombia
- Falkenmark, M. y Widstrand, C. (1992). Population and Water Resources: A delicate balance. *Population Bulletin*. Population Reference Bureau, Washington, USA.
- FAO. (2000). *El riego en América Latina y el Caribe en cifras. Informe sobre temas hídricos de la FAO n°20*. Roma.
- FAO. (2019). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. Roma, Italia: Publication Cataloguing.
- FAO-AQUASTAT. (2012). FAO Global information system on water and agriculture. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/maps/index.stm>
- Fernández, C. (1999). El agua como fuente de conflictos: Repaso de los focos de conflictos en el mundo. *Revista CIDOB D'Afers Internacionals*, (45/46), 179-194
- Ferrando, F. (2003). Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectos de la Oferta y Demanda de Agua. *Revista de Geografía Norte Grande*, (30), 23-44.

- Fondo para la Protección del Agua (FONAG), 2012. *Estudio de Disponibilidad de Agua*. Quito, Ecuador.
- Fossati, O. y Calver, R. (2006). *Requerimientos científicos para caudales ecológicos en ríos del sistema Papallacta, Ecuador*. Quito.
- Galarraga, R. (2000). *Informe nacional sobre la gestión del agua en el Ecuador*. Quito, Ecuador.
- Griensven, A., Francos, A., y Bauwens, W. (2002). Sensitivity analysis and autocalibration of an integral dynamic model for a river water quality. *Water Science and technology* 45(5), 321- 328
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). *Estudio nacional del agua, Balance hídrico y relaciones de demanda-oferta de agua en Colombia*. Colombia.
- INEC (2011). *Instituto Nacional de Estadística y Censo*. Quito, Ecuador:
Recuperado de
<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>.
- Kammeyer, C. (2017). *The World's Water Challenges 2017*. Pacific Institute.
- Keessen, A., Vink, M., Wiering, M., Boezeman, D., Ernst, W., Mees, H. (2016).
Solidarity in water management. En: *Ecology and Society* 21
- Kremen, C. (2005). Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters* 8: 468-479.
- León, P., García, E. y Sandoval, G. (2011). Análisis espacial y temporal del índice de escasez de agua en la cuenca del río Quindío. *Rev. Invest. Univ. Quindío* (22): 70- 82.
- León, P y Obregón, N. (2011). Elementos para formular una Gestión Integrada del

Recurso Hídrico. Caso cuenca río Quindío. *Rev. Tecnol. Vol. 10 No. 2, pp*
73 – 83

Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (2014).

Registro Oficial, 305 (6 Agosto de 2014)

Lux, M., y Rojas, O. (2005). “*Valoración del agua como servicio ambiental para el abastecimiento de agua potable en el casco municipal de San Jerónimo, Baja Verapaz*”. Guatemala.

Madronero, S. (2006). Manejo del recurso hídrico y estrategias de gestión integral en la microcuenca del río Mijitayo, *Colombia. Recursos Naturales y Ambiente/no. 56-57: 43-50*

MAGAP. (2011). *Plan nacional de riego y drenaje 2011-2026*. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Subsecretaría de Riego y Drenaje. Ministerio del Ambiente (MAE). (2015). *Humedales del Ecuador, Papallacta*. Ecuador.

Manteiga, L. y Ríos, A. (2000). *Los indicadores ambientales como instrumento para el desarrollo de la política ambiental y su integración en otras políticas*. Sevilla – España.

MEA. (2003). *Ecosystems and Human Well-being: a Framework for Assessment*. Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, D.C., USA.

Muleta, M., Nicklow, J., y Bekele, E. (2007). Sensitivity of a distributed watershed simulation model to spatial scale. *Journal of Hydrological enrg., 163-172*.

Molle, F. (2003). Development trajectories of river basins: a conceptual framework. IWMI Research Report No. 72. Colombo, Sri Lanka

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(39), 885-900.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M., y Bingner, R. (2007). Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 885-900.
- Muñoz, A. y Torres, W. (2013). *Actualización y automatización del modelo hidrológico para la cuenca alta del río Guayllabamba y microcuencas Oyacachi, Chalpi grande, Papallacta y Antisana*. Ecuador.
- Nieto C., Pazmiño Ch., Rosero, S y Quishpe, B. (2018). Estudio del aprovechamiento de agua de riego disponible por unidad de producción agropecuaria, con base en el requerimiento hídrico de cultivos y el área regada, en dos localidades de la Sierra ecuatoriana. *Siembra*, 5(1), 051-070. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1427>
- Paredes, D. y Sabas, C. (2009). Estudio de la oferta y demanda hídrica en la cuenca del río Barbas. *Scientia et Technica*, vol. XV, No 42
- Paredes, D. y Sabas, C. (2009). Impacto del crecimiento de Pereira sobre el recurso hídrico en la cuenca del río Cestillal. *Scientia Et Technica*, vol. XV, No. 42, agosto, pp. 399-404
- PNUMA. (2007). *Programa del Agua Water Quality Outlook. PNUMA Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente, Programa del Agua, Instituto Nacional de Investigación sobre el Agua*. Burlington, Ontario.

- Portilla, C. (2011). *Valoración económica de los beneficios del servicio ecosistémico regulación hídrica para una propuesta de pago por servicio ecosistémico hídrico en la cuenca del río Jequetepeque, Perú* *Economic valuation of ecosystem service benefits for a proposed water regulation of ecosystem service payment for water in the basin of Jequetepeque, Perú*. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Postel, S. y Carpenter, S. (1997). *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Washington, EE.UU: Island Press.
- Quijas, S., Schmid, B., Balvanera, P. (2010). Plant diversity enhances provision of ecosystem services: a new synthesis. *Basic and Applied Ecology* 11:582–593.
- Quintana, D. (2008). *Cambio climático adaptación y retroceso de los glaciares*. Chile. Editorial REDESMA.
- Ritter, A., Muñoz, R. y Regalado, C. (2011). Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: Herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística. *Estudios en la zona no saturada del suelo*, 10.
- Sánchez, K., Jiménez, F., Velázquez, S., Pierdra, M. y Romero, E. (2004). *Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí*. Costa Rica
- SNI. (2018). *Sistema Nacional de Información*. Quito-Ecuador

- Rawls, W. y Saxton, K. (2009). Introducción al programa “Soil Water Characteristics” Hydraulic Properties Calculator. (Tutorial creado para la 82 Maestría de Cuencas Hidrográficas de la Escuela de Bosques). Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires. Argentina.
- Reynolds, J. (1997). *Evaluación de los Recursos Hídricos en Costa Rica: Disponibilidad y Utilización. Documento preparado para el Proyecto de Cuentas Ambientales, coordinado por el Centro Internacional de Políticas Económicas de la Universidad Nacional y el Centro Científico Tropical.* Heredia, Costa Rica
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Billen, G., y Servat, E. (2008). Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa. *Journal of Hydrology*, 361, 96–117.
- Sandoval, A. y Günther, M. (2013). La gestión comunitaria del agua en México y Ecuador: otros acercamientos a la sustentabilidad. *Ra Ximhai*, 9(2), 165-179.
- SENAGUA. (2011). *Calidad del agua en el Ecuador.* Secretaría Nacional del Agua. Quito – Ecuador.
- SENAGUA. (2017). *Boletín de la Estadística Sectorial del Agua 2017.* Quito – Ecuador.
- Toledo, A. (2002). *El agua en México y el mundo.* Gaceta Ecológica, (64), 9-1
- Valdivieso, F. O., & Naranjo, G. A. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. *Tercer Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas* (pp. 8-13).

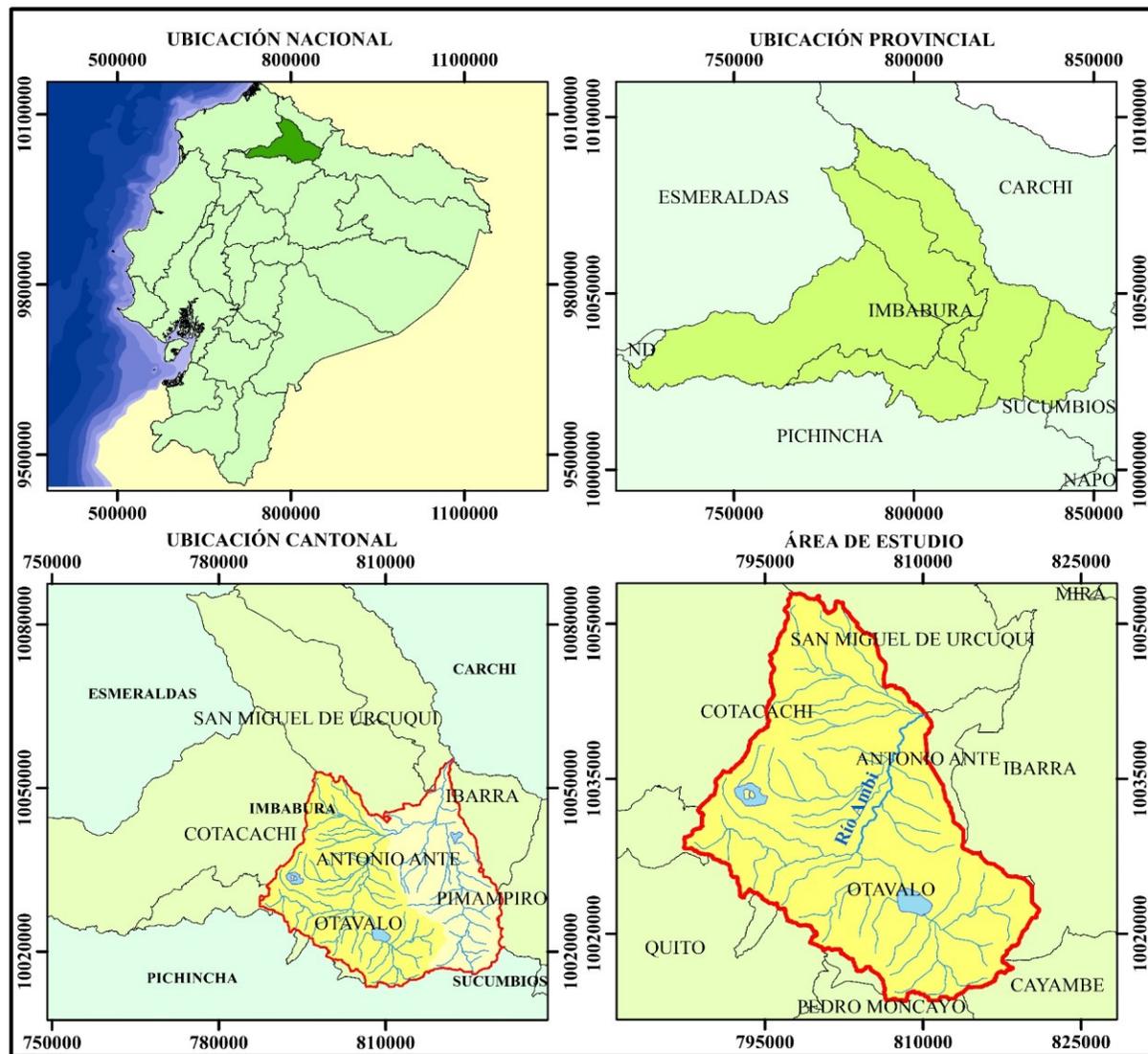
Winpenny, J. (1997). *Managing Water Scarcity for Water Security*. A discussion paper prepared for the First FAO E-mail Conference on Managing Water Scarcity, 4 March to 9 April 1997.

Wischmeier, W., Johnson, C. y Cross, B. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26, 189-191

ANEXOS

ANEXO 1.
MAPAS

MAPA DE UBICACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI



PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSAL DE MERCATOR

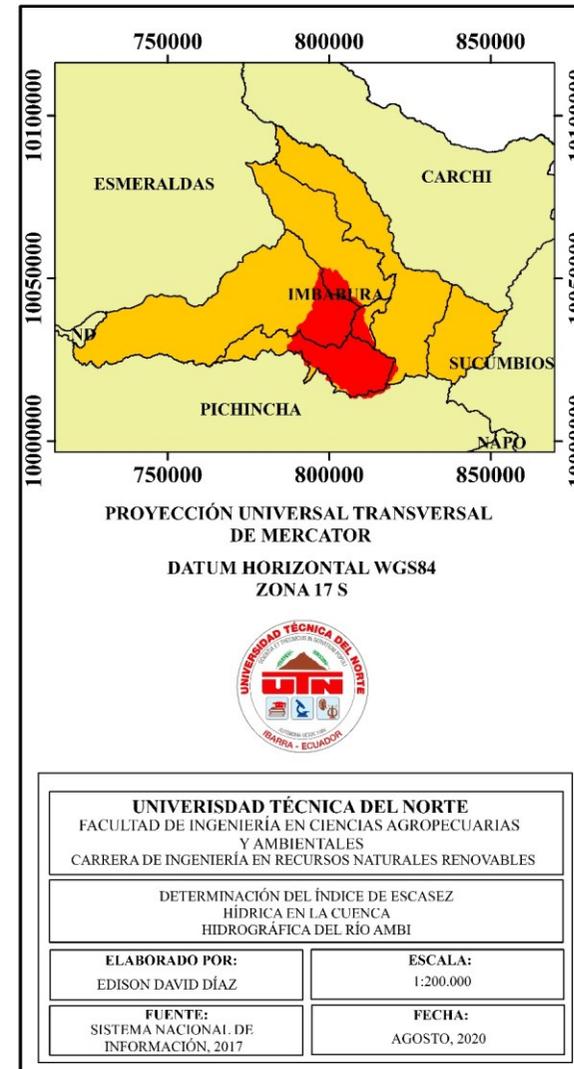
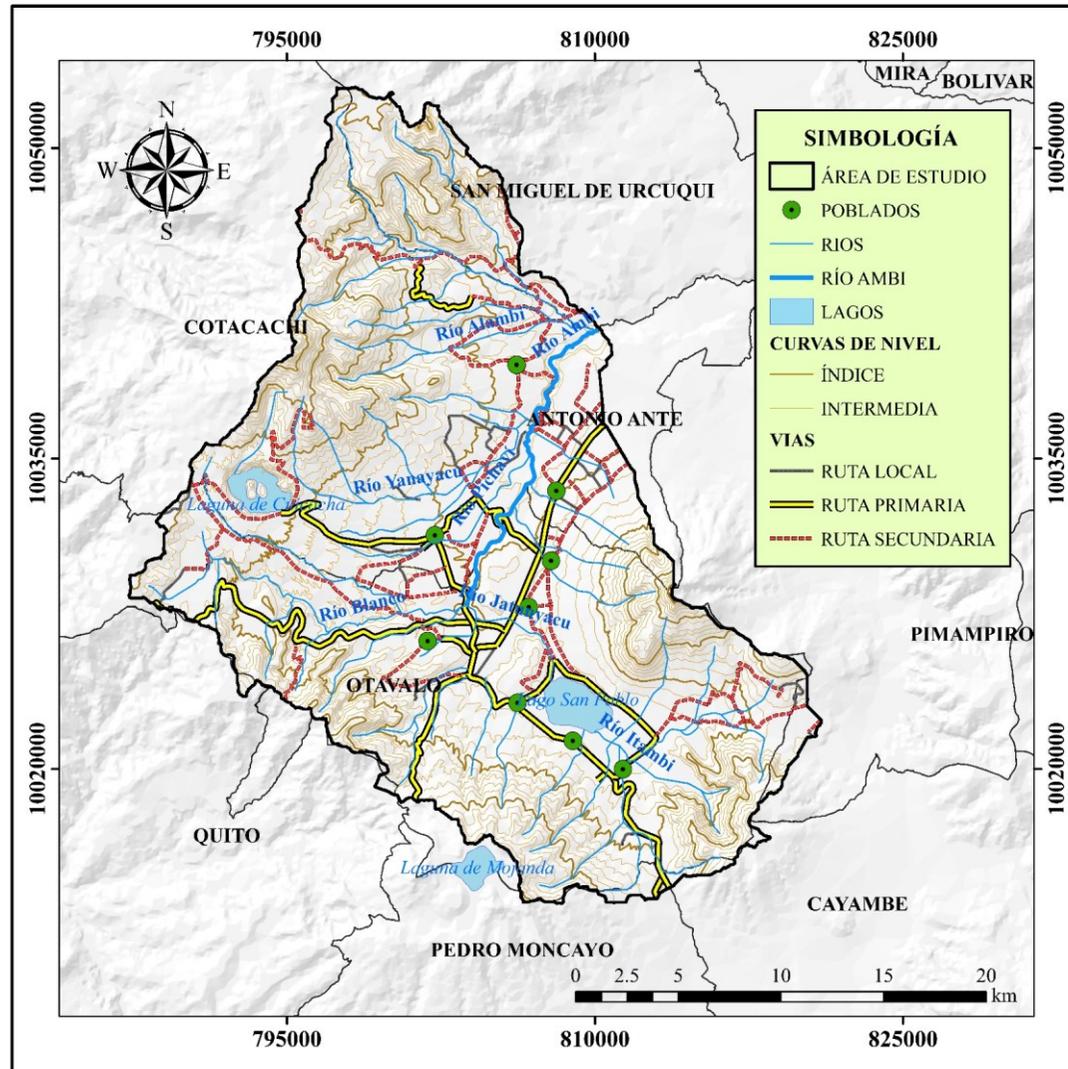
DATUM HORIZONTAL WGS84
ZONA 17 S

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

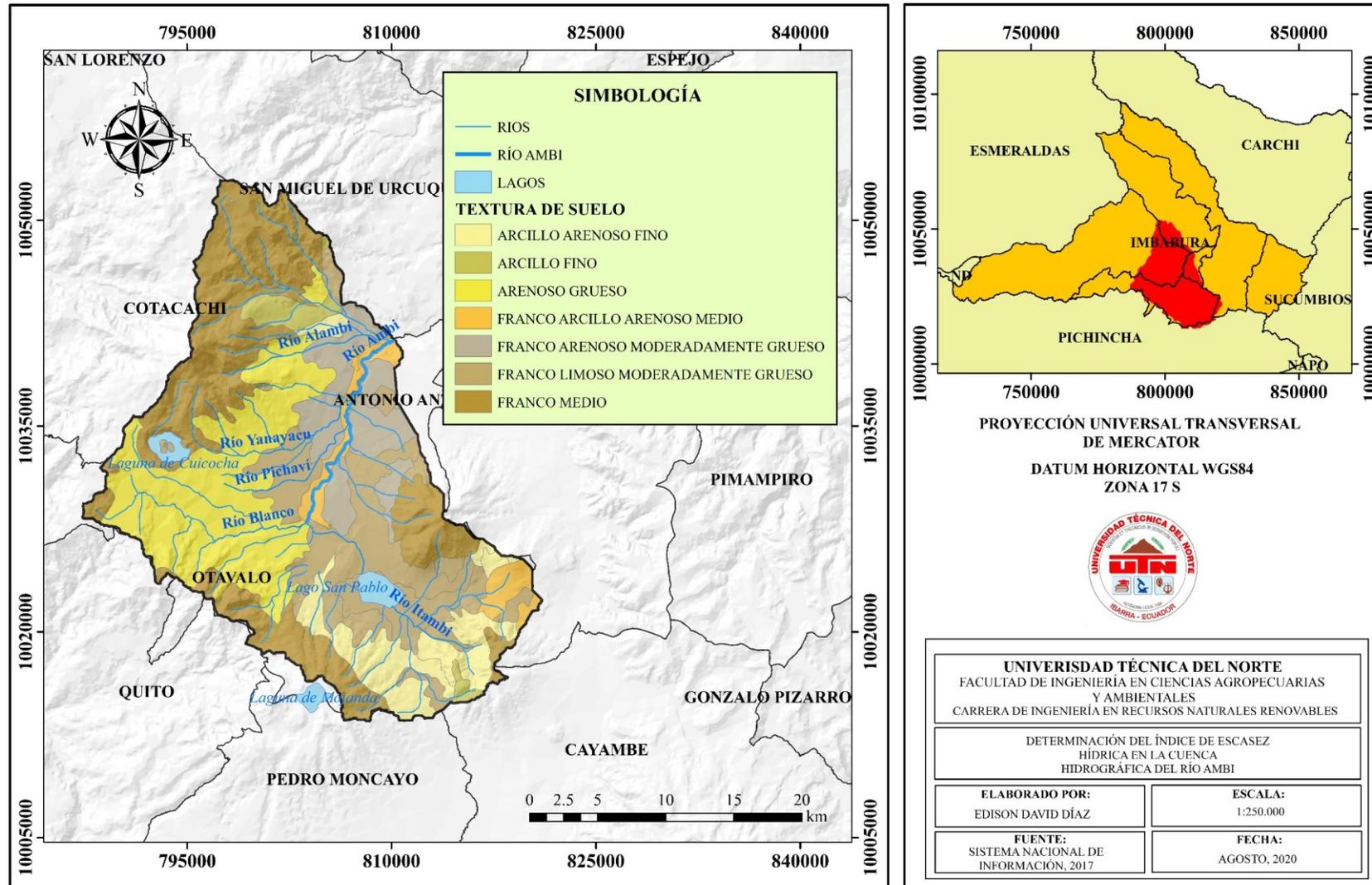
DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ HÍDRICA EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI

ELABORADO POR: EDISON DAVID DÍAZ	ESCALA: VARIAS ESCALAS
FUENTE: SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN, 2017	FECHA: AGOSTO, 2020

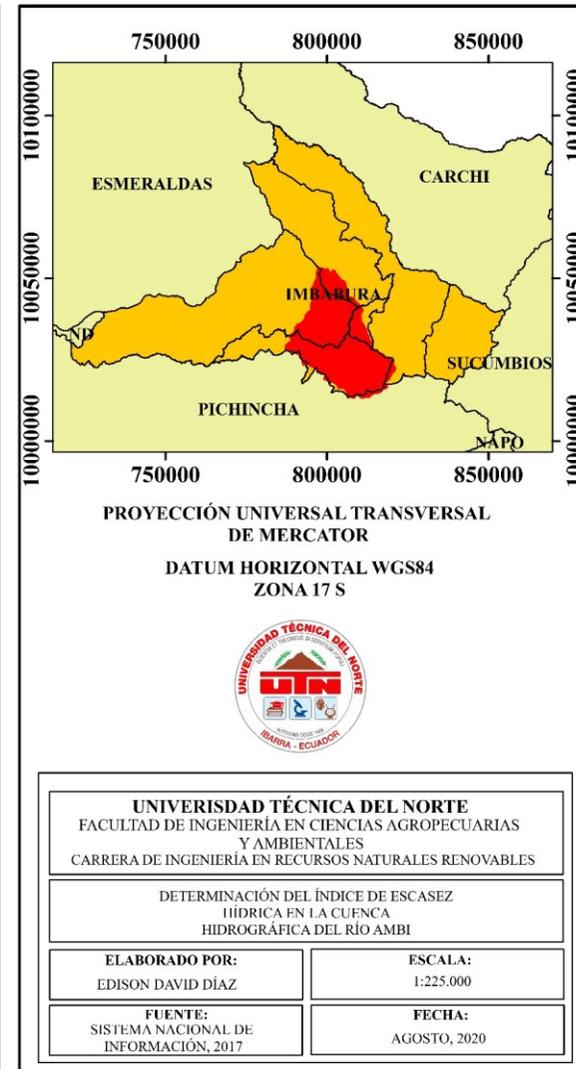
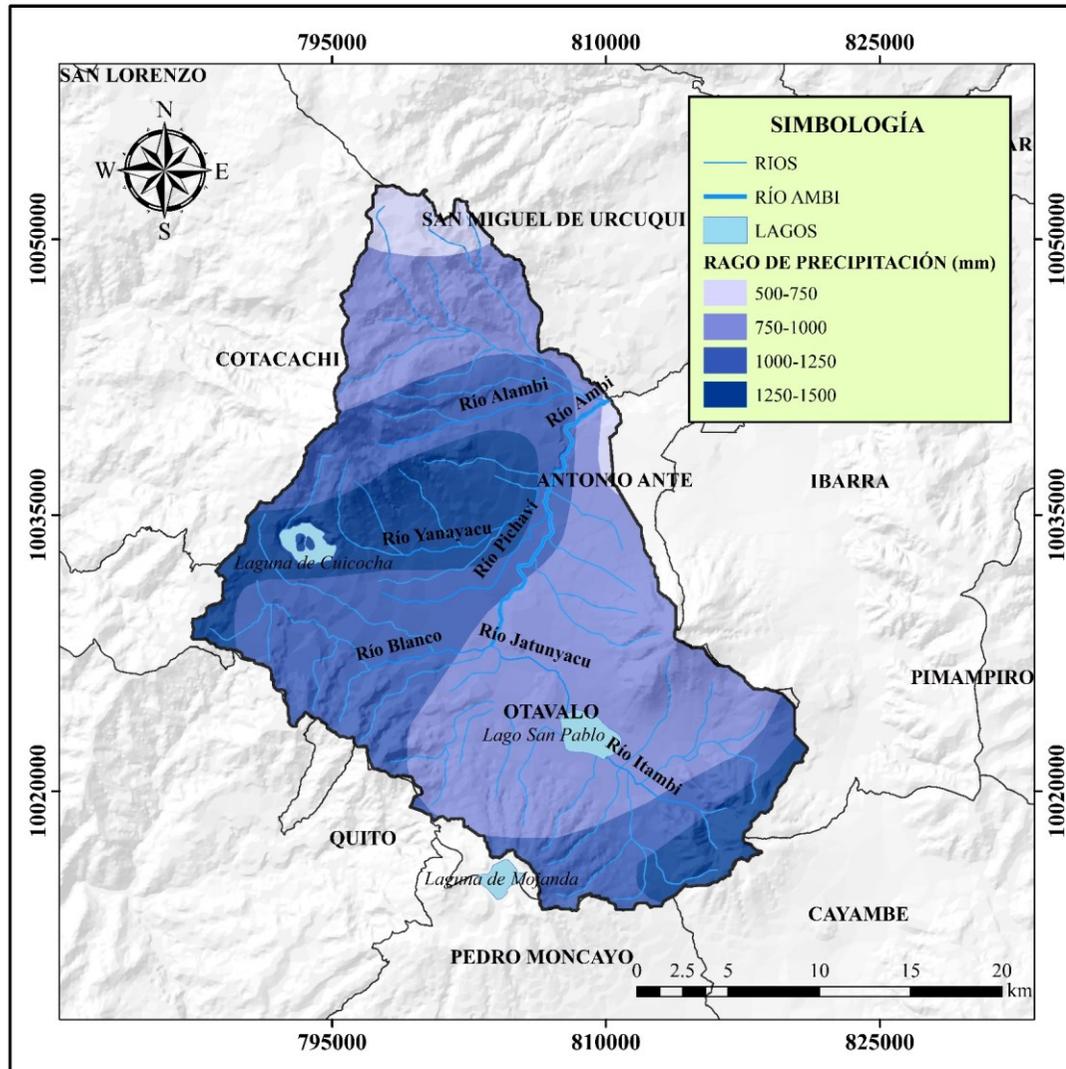
MAPA BASE DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI



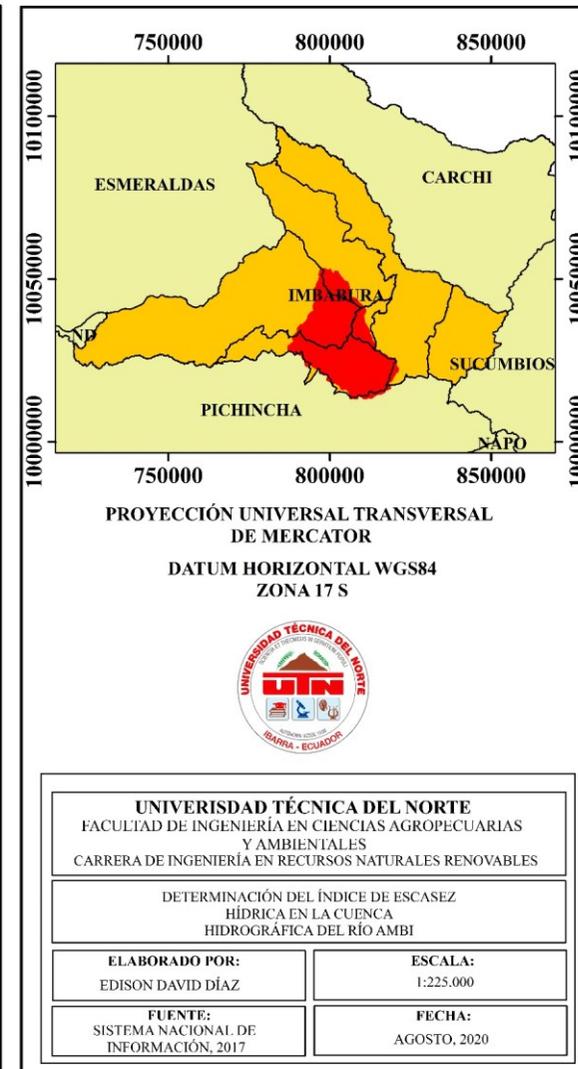
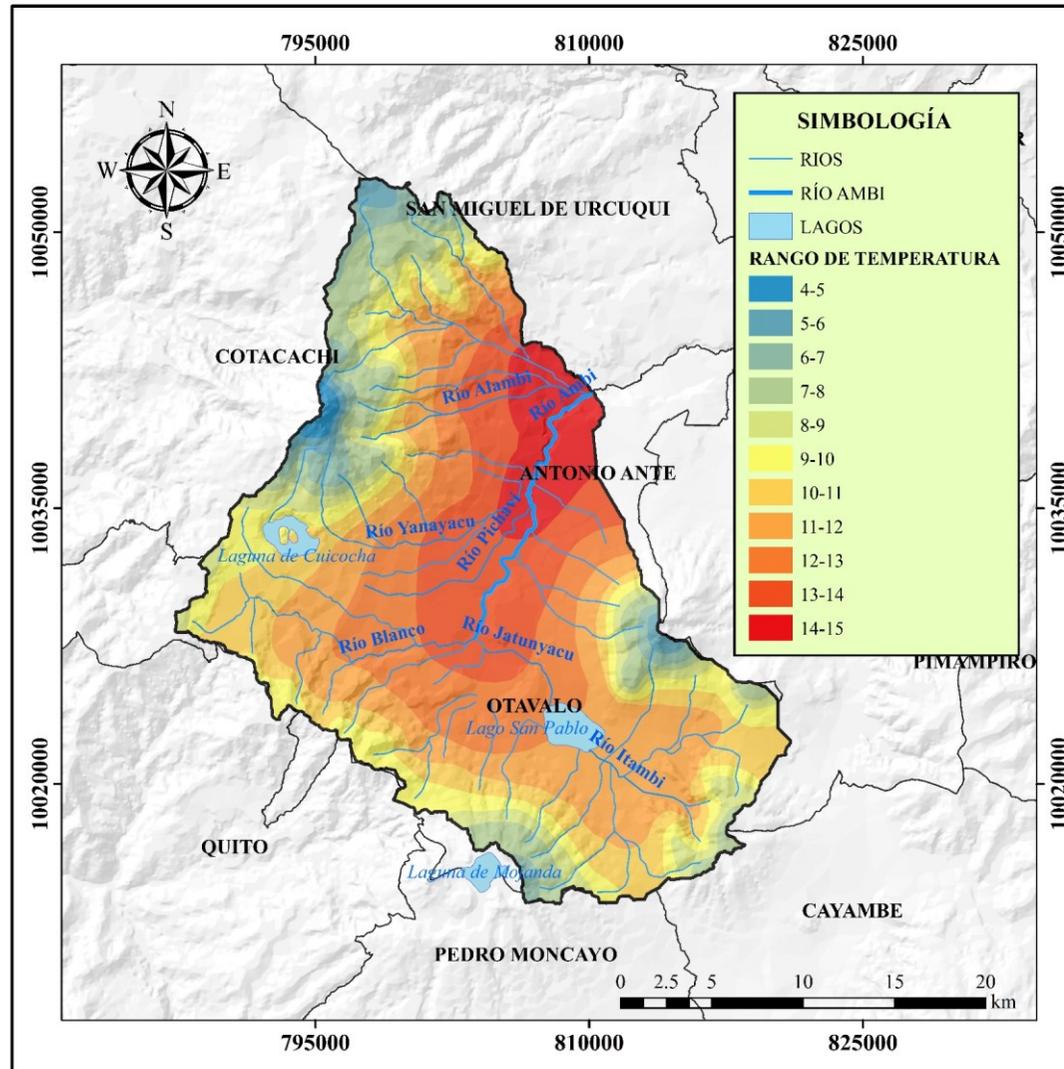
MAPA DE CLASIFICACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO



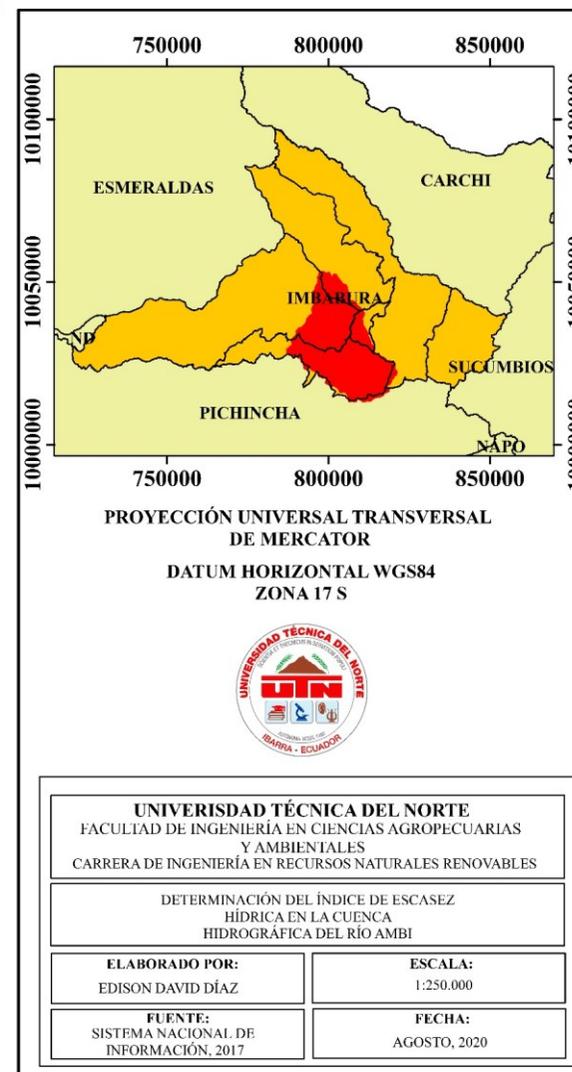
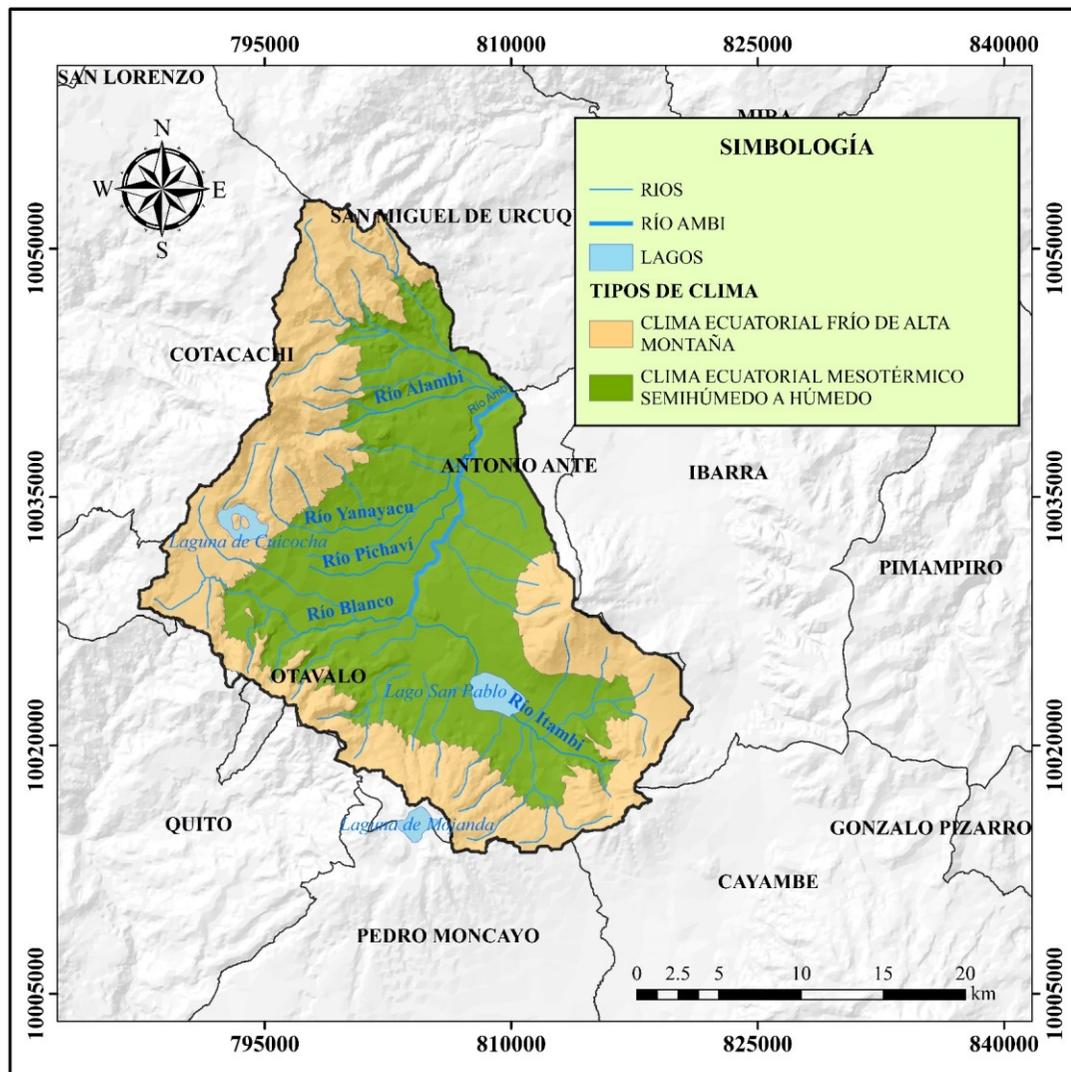
MAPA DE PRECIPITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI



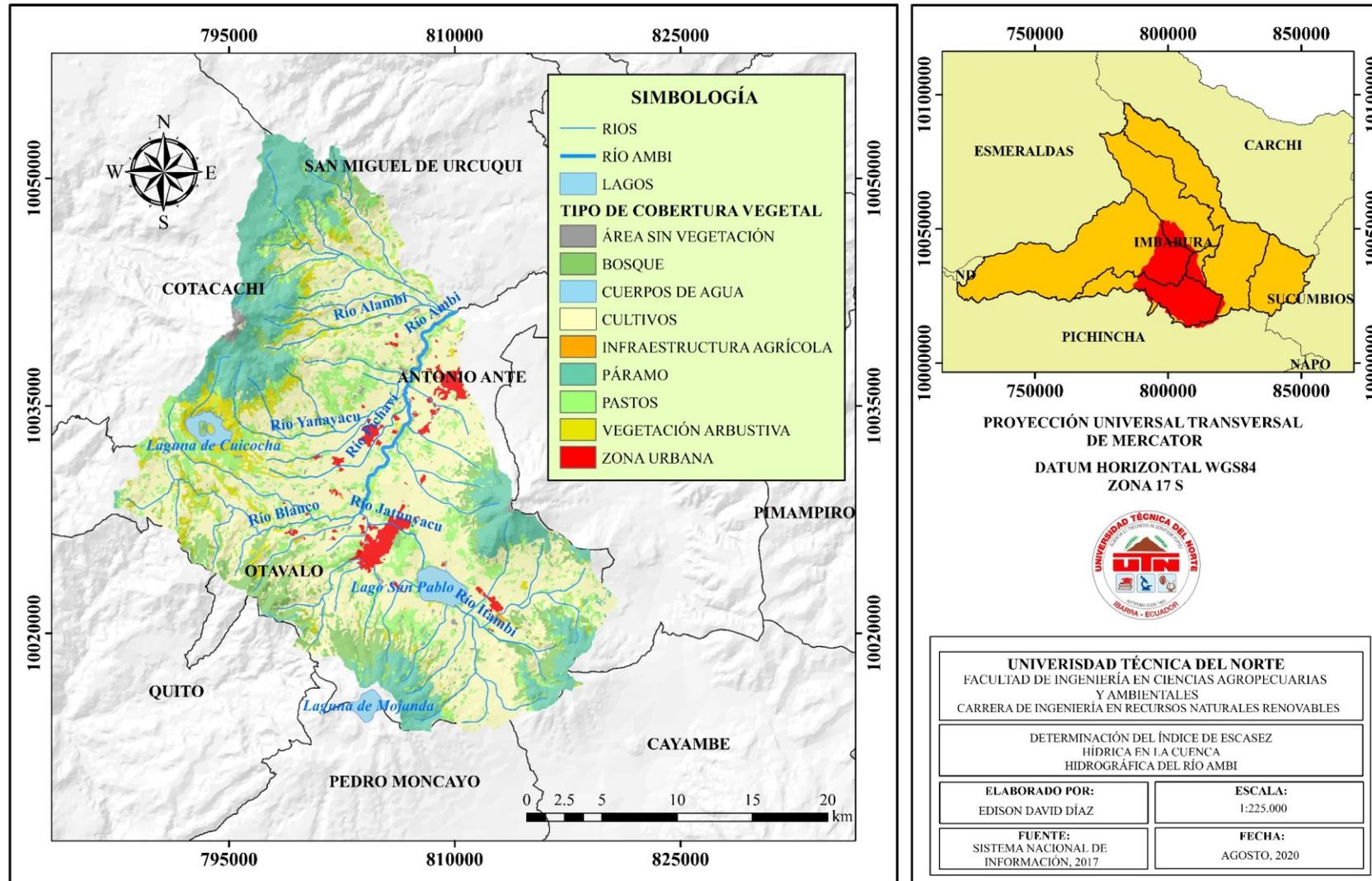
MAPA DE TEMPERATURA DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI



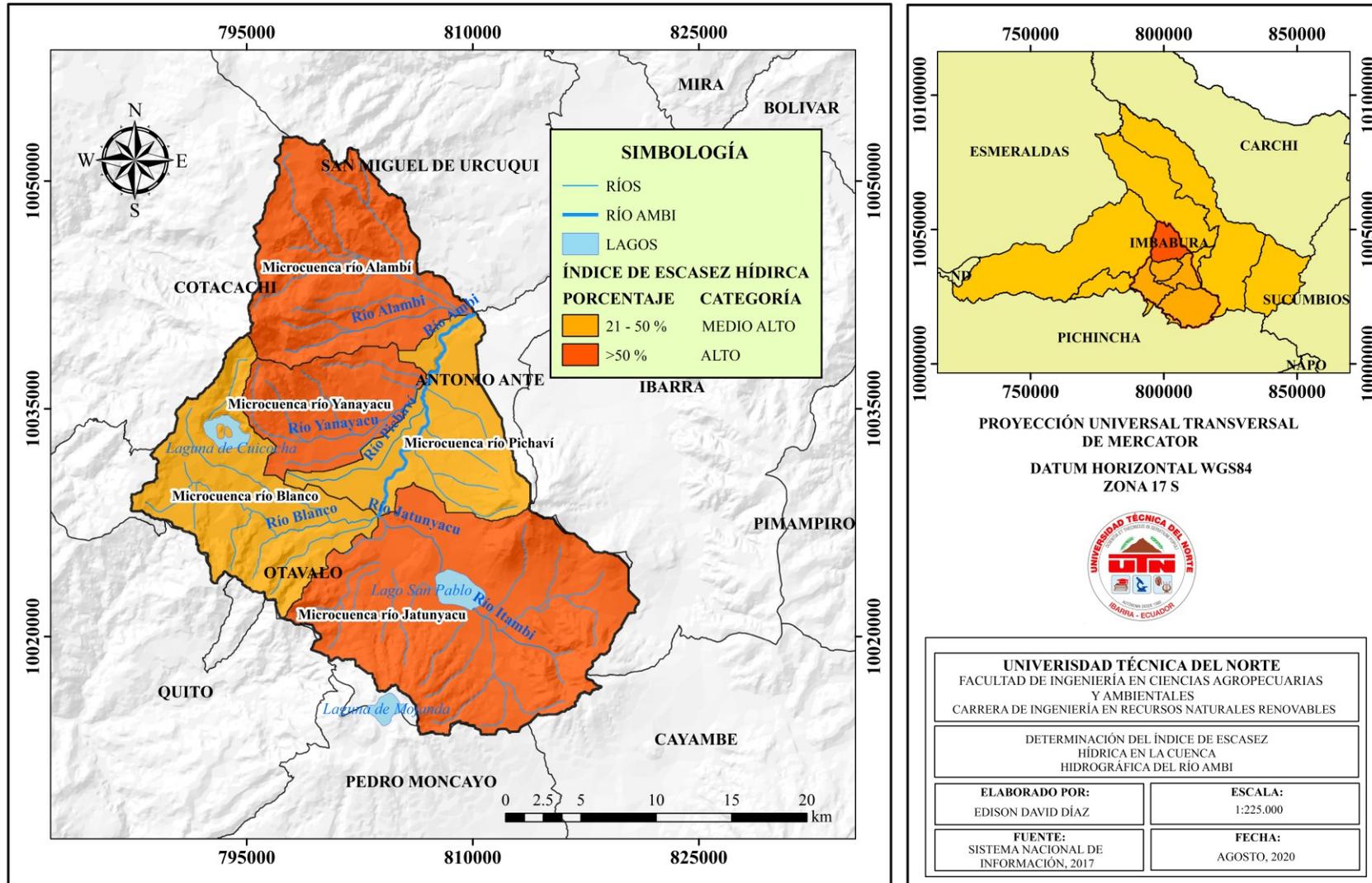
MAPA DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA SEGÚN POURRUT



MAPA DE COBERTURA VEGETAL DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMBI



MAPA DE ZONIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE ESCASEZ HÍDRICA POR UNIDAD HIDROGRÁFICA



ANEXO 2.

TABLAS

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca de estudio.

1. Parámetros de forma		
Variable	Valor	Descripción
1.1. Área de la Cuenca	$\dot{A}= 683.04 \text{ km}^2$	De acuerdo con el Área la cuenca del Río Ambi es de tamaño mediano y se la clasifica como subcuenca hidrográfica.
1.2. Perímetro	$P= 118.15 \text{ km}$	De acuerdo con el perímetro calculado la subcuenca del río Ambi tiene un perímetro mediano.
1.3. Longitud Axial	$La= 27.84 \text{ km}$	La longitud axial de la subcuenca es la distancia máxima medida desde el punto de salida hasta la parte extrema más alejada de la divisoria de aguas, es un dato que da una idea general de la longitud del río principal.
1.4. Ancho Promedio	$Ap= 26.81 \text{ km}$	El ancho promedio es la relación entre el área de la subcuenca y la longitud axial. Este valor da una

		idea de la distancia total de las vertientes izquierda y derecha de la subcuenca.
1.5. Coeficiente de Compacidad	$K_c = 0.28 * P / \sqrt{A}$ P= perímetro de la cuenca (km) A= Área de la cuenca (km ²) $K_c = 1.26$	Es la relación del perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo del Área igual de la cuenca.

2. Parámetros de relieve

Variable	Valor	Descripción
2.1 Altitud media	Hm= 3150 msnm	La altitud media de la subcuenca se encuentra en el piso altitudinal montano, ya que pertenece al rango de 3000 –4000 msnm.
2.2 Altitud mínima	Hmin = 1500 msnm	La altitud mínima de la subcuenca se encuentra en el piso altitudinal montano bajo, ya que pertenece al rango de 2000 – 3000 msnm.
2.3 Altitud máxima	Hmax= 4600 msnm	La altitud máxima de la subcuenca se encuentra en el piso altitudinal alpino, ya que pertenece al rango de 4000 – 4600 msnm.

2.4 Desnivel altitudinal	$D = H_{max} - H_{min}$ $D = (4600 - 1500) \text{msnm}$ $D = 3100 \text{msnm}$	El valor del desnivel altitudinal de la subcuenca se encuentra en el piso altitudinal premontano, ya que pertenece al rango de 1000 – 2000 msnm
2.5 Pendiente media	$P_m = 26,38\%$	El valor de pendiente media de la subcuenca corresponde a un tipo de relieve Muy montañoso, ya que se encuentra en el rango de 20 – 35 %.
3. Parametros Hidrológicos		
Variable	Valor	Descripción
3.1 Longitud del río principal	$L = 22.48 \text{ Km}$ $L = 22480 \text{ M}$	De acuerdo con el valor calculado la longitud del río principal corresponde a un valor bajo, ya que se encuentra en el rango de 1 a 25 km
3.2 Pendiente media del río principal.	$H_{minr} = 2100 \text{m}$ $H_{maxr} = 2633.91 \text{ m}$ $P_{mr} = 0.024 \text{ m/m}$	Por cada metro horizontal en el terreno, la elevación del río principal aumenta en 0.024 m
3.3 Densidad de drenaje	$D_d = \sum Lx / A$ $D_d = 1.58$	De acuerdo al valor calculado, la densidad de drenaje de la subcuenca del río Ambi se clasifica como altamente drenado debido a que el valor calculado se

		encuentra en el rango de mayor a 1.50 km/km ² .
3.4 Orden del río principal	Orden 3	La cuenca hidrográfica del río Ambi se clasifica como orden 3 en el punto de aforo o salida cuenca
3.5 Tiempo de concentración	$T_c = 0.02L^{0.77} - P_{mr}^{-0.385}$ $T_c = 40.66 \text{ min}/60$ $T_c = 0.68 \text{ h}$	El tiempo de concentración calculado se interpreta como el tiempo que tarda en viajar el flujo superficial o caudal de agua desde la parte de origen del río hasta la salida de la cuenca así se define y se interpreta este tiempo de concentración. Cuando el tiempo de concentración tiene valores menores a 30 min en la cuenca hidrográfica se producen inundaciones.

Tabla 2. Atributos para el ingreso de datos edafológicos en SWAT

CAMPO SWAT	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
SNAM	Corresponde al nombre del suelo.	Nombre de la clasificación taxonómica del suelo por Gran-grupo
SOL_ZMX	Es la profundidad máxima de enraizamiento en el perfil de suelo (mm).	Los datos de la profundidad de enraizamiento del perfil del suelo se tomaron del mapa de suelos (SNI 2013)
ANION_EXCL	Es una fracción de la porosidad (espacio vacío) donde los aniones son excluidos.	Si no se ingresa un valor para ANION_EXCL, el modelo puede asumir un valor de 0.50.
SOL_CRK	El volumen potencial o volumen máximo de ruptura del perfil del suelo se expresa como una fracción del volumen total de suelo.	Es un dato opcional que puede o no ser ingresado a las características del suelo.
TEXTURE	La textura de la capa de suelo.	Es un dato opcional.
SOL_Z	Es la profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm).	Tomado de (SIN, 2013).

SOL_BD	La densidad aparente del suelo (Mg/m^3 o $g/c\ m^3$), expresa la relación de la masa de partículas sólidas respecto al volumen total de suelo, $\rho_b = M_s/V_t$.	Se procedió a calcularlos utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton, Keith, & Rauls, 2009).
SOL_AWC	El agua disponible por las plantas, también llamada capacidad de agua disponible AWC.	Se calculó de acuerdo a la clase textural de los suelos presentes, los datos de FC y WP se obtuvieron con la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton, Keith, & Rauls, 2009).
SOL_K	La conductividad hidráulica saturada (mm/hr), relaciona la proporción del flujo de agua (densidad del fluido) y el gradiente hidráulico. Es una medida de la facilidad del movimiento de agua a través del suelo.	Se procedió a calcularlos utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton, Keith, & Rauls, 2009).
SOL_CBN	Es el contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo) en el suelo.	Se utilizó la siguiente fórmula: $C.org = \text{Materia orgánica} \% 1.724$

CLAY	Es el contenido de arcilla (% del peso del suelo).	Se procedió a calcularlos utilizando el triángulo textural y la herramienta “Soil Characteristics Tool versión 6.02.70” (Saxton, Keith, & Rauls, 2009).
SILT	Es el contenido de limo (% del peso del suelo).	Se procedió a calcularlos utilizando el triángulo textural y la herramienta “Soil Characteristics Tool versión 6.02.70” (Saxton, Keith, & Rauls, 2009).
SAND	Es el contenido de arena (% del peso del suelo).	Se procedió a calcularlos utilizando el triángulo textural y la herramienta “Soil Characteristics Tool versión 6.02.70” (Saxton, Keith, & Rauls, 2009)
ROCK	Es el contenido de fragmento de roca (% del peso total).	Este valor fue tomado de los mapas de suelo (SIN, 2013).
SOL_ALB	El albedo del suelo es la relación de la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo por la cantidad incidente sobre éste, expresado como una fracción.	(Baumer 1990) propone estimar el albedo en la superficie del suelo en función de la materia orgánica mediante la siguiente ecuación: $A=0.6\exp(0.4.OM)$ Donde: A es el albedo del suelo OM es la materia orgánica del suelo (%).

USLE_K	<p>Es el factor K de Wischmeier et al. (1971) erodabilidad del desarrollaron una ecuación suelo de la Ecuación general para calcular el factor de Universal de la erodabilidad del suelo cuando el Pérdida de Suelo. contenido de limo y arena muy fina llegan a ser menores que el 70 % de la distribución del tamaño de la partícula del suelo.</p> <p>La ecuación es:</p> $KUSLE = 0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM)^{+3.25} \cdot (c_{soilstr} - 2)^{+2.5} \cdot (c_p 100$ <p>Donde:</p> <p>KUSLE: es el factor de erodabilidad del suelo.</p> <p>M: es el parámetro del tamaño de las partículas.</p> <p>OM: es el porcentaje de materia orgánica.</p> <p>Csoilstr: es el código de la estructura del suelo en la clasificación del suelo. Cperm: es el perfil de las clases de permeabilidad.</p>
SOL_EC	<p>La conductividad eléctrica (ds/m) No se encuentra actualmente activa.</p>

Tabla 3. Valores de caudales simulados por medio de SWAT para el periodo 1996 - 2017

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGT	SEP	OCT	NOV	DIC
1990	1.76	3.02	3.80	3.13	3.94	2.43	1.57	0.13	1.18	3.66	1.60	1.43
1991	3.10	2.03	5.30	8.71	5.25	4.33	4.84	5.53	6.10	7.19	11.12	11.35
1992	9.49	10.37	8.02	12.62	11.57	12.49	9.86	9.77	11.16	12.47	10.43	11.30
1993	8.55	5.67	8.09	7.74	2.51	6.25	8.49	3.39	1.36	1.56	1.70	2.55
1994	3.13	2.83	5.29	5.42	5.55	3.96	1.02	0.36	0.55	2.70	3.38	3.16
1995	3.64	3.48	3.36	5.72	5.17	6.14	1.81	8.59	0.36	2.06	1.60	0.53
1996	1.33	2.59	11.39	10.22	14.54	5.62	5.47	1.51	0.74	8.57	0.68	4.25
1997	6.93	5.86	12.70	20.42	13.71	6.23	2.89	0.74	1.32	1.70	7.24	11.41
1998	3.86	5.38	6.00	6.15	5.42	2.73	0.99	1.22	0.49	0.69	3.62	0.56
1999	4.50	5.03	7.20	8.04	9.56	5.80	3.29	1.89	5.22	2.42	4.75	7.97
2000	9.14	10.25	8.06	8.63	15.17	5.42	8.86	2.29	1.34	0.73	1.23	0.68
2001	1.70	2.54	13.83	11.13	4.20	4.06	1.06	0.28	1.17	0.22	0.94	0.68
2002	0.86	0.36	0.90	7.58	7.09	6.53	1.90	0.44	0.31	2.28	15.11	8.02
2003	2.57	1.42	3.97	13.62	11.15	3.00	1.12	0.22	0.43	1.32	3.96	8.12
2004	6.36	1.94	0.84	4.33	10.92	7.34	1.72	0.42	1.07	0.83	1.55	2.51
2005	1.18	4.99	5.94	4.45	4.51	1.30	0.62	0.14	0.19	0.73	1.40	2.05
2006	6.33	8.86	4.71	8.12	4.85	8.97	2.54	0.81	0.39	0.78	7.13	22.77
2007	16.03	8.09	12.06	4.79	8.39	9.63	3.13	1.17	0.45	1.85	1.54	2.23
2008	6.42	6.17	5.96	9.17	5.79	1.62	9.82	2.65	1.03	3.20	6.01	6.29
2009	1.94	7.39	8.11	5.93	8.21	3.04	0.88	0.35	0.32	0.50	0.67	2.35
2010	1.89	0.62	6.26	8.16	9.66	3.53	8.09	3.80	1.73	1.11	6.00	8.60
2011	3.44	8.31	8.74	9.53	8.22	9.37	2.91	2.41	1.65	5.26	2.66	9.73
2012	5.35	12.45	8.41	5.32	8.54	3.63	1.01	0.37	0.23	0.91	0.99	0.63
2013	0.64	7.42	3.95	1.61	8.63	6.29	1.55	0.64	0.23	1.77	2.99	7.27
2014	3.26	6.37	5.66	8.29	7.85	6.14	3.25	0.87	0.67	3.28	7.34	4.74
2015	3.04	6.88	9.00	5.81	8.24	2.11	0.82	0.21	0.09	0.79	1.48	0.41
2016	1.48	3.71	9.76	6.53	9.62	4.49	9.09	5.48	3.79	9.23	4.84	7.89
2017	8.78	8.05	7.50	15.41	7.63	4.96	2.53	5.89	4.13	9.10	11.22	7.03

Tablas de oferta y demanda hídrica

- Microcuenca del río Alambí

Demanda hídrica

Uso	Periodo	Periodo	Periodo
	1990 – 1996 (l/s)	1996 – 2007 (l/s)	2008 – 2017 (l/s)
Abrevadero	0	1	1
Fuerza	53	53	53
Mecánica			
Hidroeléctricas	0	0	0
Industria	0	0.5	0.5
Piscícola	0	0	0
Riego	467.16	1397.3	1397.3
Termales	0	0	1.2
Uso Doméstico	17.47	34.49	46.09
Total	537.63	1486.29	1499.09

Oferta hídrica

Caudal	Periodo	Periodo	Periodo
	1990 – 1996 (m ³ /s)	1996 –2007 (m ³ /s)	2008 – 2017 (m ³ /s)
Promedio anual	1.56	1.56	1.51

- Microcuenca del río Blanco

Demanda hídrica

Uso	Periodo 1990 – 1996 (l/s)	Periodo 1996 – 2007 (l/s)	Periodo 2008 – 2017 (l/s)
Abrevadero	0	1.22	2.02
Fuerza Mecánica	0	0	0
Hidroeléctricas	0	0	0
Industria	5	80.2	80.2
Piscícola	7	11.42	11.42
Riego	103.67	306.54	363.31
Termales	0	5	5
Uso Doméstico	27.66	83.67	84.99
Total	143.33	488.05	546.94

Oferta hídrica

Caudal	Periodo 1990 – 1996 (m³/s)	Periodo 1996 – 2007 (m³/s)	Periodo 2008 – 2017 (m³/s)
Promedio anual	1.59	1.54	1.32

- Microcuenca del río Jatunyacu

Demanda hídrica

Uso	Periodo	Periodo	Periodo
	1990 – 1996 (l/s)	1996 – 2007 (l/s)	2008 – 2017 (l/s)
Abrevadero	0	0.41	1.06
Fuerza	235	235	235
Mecánica			
Hidroeléctricas	135	135	135
Industria	4	16	16
Piscícola	207.65	207.65	207.65
Riego	550.71	1906.03	1944.03
Termales	0	0	0
Uso Doméstico	499.79	621.098	630.698
Total	1632.15	3121.188	3169.438

Oferta hídrica

Caudal	Periodo	Periodo	Periodo
	1990 – 1996 (m ³ /s)	1996 – 2007 (m ³ /s)	2008 – 2017 (m ³ /s)
Promedio anual	2.95	2.91	2.92

- Microcuenca del río Pichaví

Demanda hídrica

Uso	Periodo 1990 – 1996 (l/s)	Periodo 1996 – 2007 (l/s)	Periodo 2008 – 2017 (l/s)
Abrevadero	0	0.09	0.09
Fuerza Mecánica	0	0	0
Hidroeléctricas	0	2600	7900
Industria	0.6	1.1	2.03
Piscícola	0	0	0
Riego	908.93	2775.69	3324.83
Termales	0	0	0
Uso Doméstico	35.54	46.05	58.45
Total	945.07	5422.93	11285.4

Oferta hídrica

Caudal	Periodo 1990 – 1996 (m³/s)	Periodo 1996 – 2007 (m³/s)	Periodo 2008 – 2017 (m³/s)
Promedio anual	4.90	4.92	4.92

- Microcuenca del río Yanuyacu

Demanda hídrica

Uso	Periodo 1990 – 1996 (l/s)	Periodo 1996 – 2007 (l/s)	Periodo 2008 – 2017 (l/s)
Abrevadero	0	0.17	0.22
Fuerza Mecánica	0	0	0
Hidroeléctricas	0	0	0
Industria	0	1	1
Piscícola	0	0	0
Riego	112.4	730.82	772.87
Termales	0	0	0
Uso Doméstico	22.44	68.25	100.82
Total	134.84	800.24	874.91

Oferta hídrica

Caudal	Periodo 1990 – 1996 (m³/s)	Periodo 1996 –2007 (m³/s)	Periodo 2008 – 2017 (m³/s)
Promedio anual	0.81	0.97	1.05

ANEXO 3.
FOTOGRAFÍAS

- Río Ambi / cuenca hidrográfica



- Lagos de la cuenca hidrográfica



LAGO SAN PABLO

LAGO CUICOCHA

- Áreas de cultivos en la cuenca



- Central hidroeléctrica

