



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

**Modelación del balance hídrico y propuesta de manejo del recurso agua en la subcuenca del río**

**Toachi, mediante la herramienta WEAP**

Gallardo Gordón, Gabriela Susana

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente

Jácome Enriquez, Wilson Oswaldo, Ph. D.

09 de febrero del 2022

# COPYLEAKS

TESIS\_GALLARDO\_GABRIELA\_L00365479.pdf

Scanned on: 2:54 February 10, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



WILSON OSWALDO  
JACOME ENRIQUEZ

Identical Words	572
Words with Minor Changes	115
Paraphrased Words	472
Ommited Words	1940



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA  
CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Modelación del balance hídrico y propuesta de manejo del recurso agua en la subcuenca del río Toachi, mediante la herramienta WEAP**” fue realizado por la señorita **Gallardo Gordón, Gabriela Susana** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de febrero del 2022

Firma:



.....  
**Ing. Jácome Enríquez, Wilson Oswaldo, Ph.D.**

C. C. 0400627097



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

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

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Gallardo Gordón, Gabriela Susana**, con cédula de ciudadanía n°1751984723, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Modelación del balance hídrico y propuesta de manejo del recurso agua en la subcuenca del río Toachi, mediante la herramienta WEAP** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 08 de febrero del 2022**

Firma

**Gallardo Gordón, Gabriela Susana**

C.C.: 1751984723



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

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

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Gallardo Gordón, Gabriela Susana**, con cédula de ciudadanía n°1751984723, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Modelación del balance hídrico y propuesta de manejo del recurso agua en la subcuenca del río Toachi, mediante la herramienta WEAP** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 08 de febrero del 2022

Firma

**Gallardo Gordón, Gabriela Susana**

C.C.: 1751984723

### **Dedicatoria**

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mi Padre Celestial, quien me ha dado esta responsabilidad y me ha equipado para realizar esta labor. A pesar de mi insuficiencia Él es suficiente, Él me creó y me ha dado inteligencia y talentos para glorificarlo en todo lo que haga. Con mi Señor todo tiene un propósito eterno y el trabajo no es en vano.

Como dice Efesios 2:10 *“Porque somos hechura suya, creados en Cristo Jesús para buenas obras, las cuales Dios preparó de antemano para que anduviésemos en ellas”*

A mis padres, quienes me han brindado su apoyo, paciencia y comprensión a lo largo de toda mi carrera universitaria.

**Gabriela Gallardo.**

### **Agradecimiento**

Doy gracias a mi Dios por encomendarme esta labor y moldear mi carácter en el proceso para conocerlo más a Él y ser más como Jesús. Su Palabra me he sostenido a lo largo de este proceso.

*Salmos 94:18 "Cuando yo decía: Mi pie resbala, tu misericordia, oh Jehová, me sustentaba"*

A mi familia, a mi padre Rodrigo Gallardo y Susana Gordón, hermanos Mónica y Patricio, abuelos, tíos por alentarme con sus consejos y animarme a no rendirme en el proceso. Y a mi hermana en Cristo, Carito Pillalaza, quien me animó con lo único que tiene poder, la Palabra de Dios.

También agradezco a todas las personas que el Señor puso en mi camino durante este tiempo, a mi director de tesis, Ing. Wilson Jácome, por su apoyo, experiencia y consejos brindados en el transcurso de elaboración del proyecto.

A todos los docentes que me han brindado sus conocimientos a lo largo de mi carrera universitaria, en especial a la Ing. Margarita Haro, que me brindó su tiempo y consejos durante la elaboración del perfil del presente estudio; y a los miembros del foro WEAP, especialmente al Ing. Lenin Henríquez e Ing. Evelyn Guevara, que me brindaron su tiempo y consejos.

**Gabriela Gallardo.**

## Índice de contenido

<b>Copyleaks</b> .....	2
<b>Certificación del director de trabajo de titulación</b> .....	3
<b>Autoría de responsabilidad</b> .....	4
<b>Autorización de publicación en repositorio institucional</b> .....	5
<b>Dedicatoria</b> .....	6
<b>Agradecimiento</b> .....	7
<b>Índice de contenido</b> .....	8
<b>Índice de tablas</b> .....	13
<b>Índice de figuras</b> .....	15
<b>Resumen</b> .....	17
<b>Abstract</b> .....	18
<b>Capítulo 1</b> .....	19
Antecedentes .....	19
Planteamiento del problema .....	20
Justificación e importancia.....	22
Estudios relacionados .....	24
Objetivos generales y específicos.....	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos.....	25
Metas .....	26
Área de influencia .....	26
<b>Capítulo 2</b> .....	28
Base teórica .....	28



Base conceptual .....	29
Cuenca hidrográfica .....	29
Balance hídrico.....	31
Componentes del balance hídrico.....	33
Escorrentía superficial.. .....	33
Evapotranspiración. ....	34
Riego. ....	35
Nieve.. .....	35
Humedad del suelo.. .....	35
Flujo base. ....	35
Inter flujo. ....	36
Precipitación. ....	37
Déficit hídrico.....	37
Modelación hidrológica.....	37
Water evaluation and planning (WEAP).....	37
Información climática.....	38
Método de la humedad del suelo .....	39
Demanda hídrica .....	42
Métricas de bondad de ajuste.....	43
Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).....	43
Raíz de la desviación cuadrática media (RMSE).....	44
Porcentaje bias.....	45
Manejo del recurso hídrico .....	45
Fundamentación legal.....	47

Constitución de la República del Ecuador. ....	47
Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.. ....	48
Código orgánico del Ambiente. ....	48
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>49</b>
Metodología.....	49
Definición del alcance del modelo .....	50
Delimitación de la subcuenca hidrográfica en el software QGIS con GRASS.. ....	50
División de la subcuenca en microcuencas.....	51
División de la subcuenca por bandas de elevación.....	52
Delimitación temporal del modelo.....	55
Caracterización del área de estudio .....	55
Recopilación de datos .....	60
Datos climatológicos e hidrométricos. ....	60
Datos de demanda hídrica. ....	63
Cobertura y uso de la tierra.....	64
Generación de datos climatológicos en Google Earth Engine (GEE) .....	66
Precipitación, temperatura y velocidad del viento.....	67
Fracción de nubosidad. ....	69
Procesamiento de datos .....	70
Construcción del modelo en herramienta WEAP .....	70
Configuración inicial.....	72
Incorporación de elementos. ....	72
Definición de método de modelación hidrológica.....	75
Desagregación de unidades hidrológicas. ....	75

Ingreso de supuestos clave. ....	76
Ingreso de información al modelo. ....	79
Área y distribución porcentual.. ....	79
Clima.. ....	81
Latitud.. ....	81
Serie de caudales.....	81
Requerimiento de caudal para cultivos.....	82
Demanda hídrica.. ....	83
Vinculación de parámetros de usos de suelo a unidades hidrológicas.....	83
Calibración .....	84
Uso del modelo para propuesta de manejo del recurso hídrico .....	86
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>87</b>
Resultados.....	87
Balance hídrico de la subcuenca del río Toachi.....	87
Modelo calibrado del balance hídrico .....	91
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>95</b>
Propuesta de manejo del recurso hídrico en la subcuenca del río Toachi .....	95
Programa de manejo sustentable .....	95
Programa de uso de tecnologías de riego .....	98
Programa de educación ambiental .....	100
Programa de monitoreo de caudales .....	102
Programa de difusión de la herramienta WEAP .....	104
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>106</b>
Conclusiones .....	106

Recomendaciones .....	109
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>111</b>

### Índice de tablas

Tabla 1	<i>Variables meteorológicas</i> .....	38
Tabla 2	<i>Parámetros de uso de suelo del método de la humedad del suelo</i> .....	39
Tabla 3	<i>Rangos de valores del Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe</i> .....	44
Tabla 4	<i>Zonas altitudinales del área de estudio</i> .....	53
Tabla 5	<i>Datos básicos de la subcuenca hidrográfica Toachi</i> .....	60
Tabla 6	<i>Caracterización morfométrica de la subcuenca hidrográfica Toachi</i> .....	60
Tabla 7	<i>Estaciones meteorológicas activas del área de estudio</i> .....	61
Tabla 8	<i>Estación hidrológica activa del área de estudio</i> .....	61
Tabla 9	<i>Concesiones del RUAA en el área de estudio</i> .....	63
Tabla 10	<i>Categorías de cobertura y uso de la tierra del área de estudio</i> .....	65
Tabla 11	<i>Elementos incorporados al modelo hidrológico</i> .....	73
Tabla 12	<i>Valores iniciales de parámetros de la capa inferior del suelo</i> .....	77
Tabla 13	<i>Valores iniciales de parámetros de la capa superior del suelo</i> .....	78
Tabla 14	<i>Coeficientes de cultivo para desagregación de tierra agropecuaria</i> .....	78
Tabla 15	<i>Área y distribución porcentual de unidades hidrológicas de tierra agropecuaria</i> ...	79
Tabla 16	<i>Área y distribución porcentual de unidades hidrológicas de otros usos de suelo</i> ...	80
Tabla 17	<i>Latitud por zona altitudinal</i> .....	81
Tabla 18	<i>Caudales de riego por zona altitudinal</i> .....	82
Tabla 19	<i>Tasa anual de uso del agua en la subcuenca Toachi</i> .....	83
Tabla 20	<i>Oferta de agua mensual por década en la subcuenca Toachi</i> .....	88
Tabla 21	<i>Oferta de agua decadal por época en la subcuenca Toachi</i> .....	88
Tabla 22	<i>Verificación de satisfacción de demanda en la subcuenca Toachi (1990-2013)</i> .....	90
Tabla 23	<i>Balance hídrico mensual en la subcuenca Toachi (1990-2013)</i> .....	90

Tabla 24	<i>Balance hídrico por época seca y lluviosa en la subcuenca Toachi</i> .....	91
Tabla 25	<i>Valores calibrados de parámetros de la capa inferior del suelo</i> .....	92
Tabla 26	<i>Valores calibrados de parámetros de la capa superior del suelo</i> .....	92
Tabla 27	<i>Medidas estadísticas del modelo hidrológico</i> .....	93
Tabla 28	<i>Programa de manejo sustentable</i> .....	96
Tabla 29	<i>Programa de uso de tecnologías de riego</i> .....	99
Tabla 30	<i>Programa de educación ambiental</i> .....	101
Tabla 31	<i>Programa de monitoreo de caudales</i> .....	103
Tabla 32	<i>Programa de difusión de la herramienta WEAP</i> .....	105

### Índice de figuras

Figura 1 <i>Cantones del área de influencia</i> .....	27
Figura 2 <i>Cuenca, subcuenca y microcuenca</i> .....	30
Figura 3 <i>Partes de una cuenca</i> .....	30
Figura 4 <i>Tipos de escorrentía</i> .....	33
Figura 5 <i>Procesos de la evapotranspiración</i> .....	34
Figura 6 <i>Esquema de separación del hidrograma</i> .....	36
Figura 7 <i>Inter flujo</i> .....	36
Figura 8 <i>Diagrama conceptual y ecuaciones del modelo de humedad del suelo</i> .....	42
Figura 9 <i>Rangos de valores del Bias</i> .....	45
Figura 10 <i>Procesos de metodología aplicada</i> .....	49
Figura 11 <i>Flujograma de delimitación de cuenca con GRASS</i> .....	50
Figura 12 <i>Flujograma de delimitación de microcuencas con GRASS</i> .....	51
Figura 13 <i>Mapa de microcuencas de la subcuenca Toachi</i> .....	52
Figura 14 <i>Flujograma de reclasificación de alturas con GRASS</i> .....	53
Figura 15 <i>Flujograma para obtención de zonas altitudinales</i> .....	54
Figura 16 <i>Mapa de zonas altitudinales de la subcuenca Toachi</i> .....	55
Figura 17 <i>Mapa de la subcuenca Toachi respecto a provincias</i> .....	56
Figura 18 <i>Mapa de la subcuenca Toachi respecto a cantones</i> .....	57
Figura 19 <i>Mapa de la subcuenca Toachi respecto a parroquias</i> .....	58
Figura 20 <i>Mapa de red hídrica de la subcuenca Toachi</i> .....	59
Figura 21 <i>Mapa de estaciones meteorológicas e hidrométricas en el área de estudio</i> .....	62
Figura 22 <i>Disponibilidad de datos meteorológicos e hidrométricos en estaciones del INAMHI62</i>	
Figura 23 <i>Mapa de distribución espacial del RUAA en el área de estudio</i> .....	64

Figura 24	<i>Mapa de cobertura y uso de la tierra del área de estudio</i>	65
Figura 25	<i>Flujograma de generación de datos climáticos en GEE</i>	66
Figura 26	<i>Código para la variable temperatura</i>	68
Figura 27	<i>Código para componentes del viento</i>	68
Figura 28	<i>Código para variable precipitación</i>	69
Figura 29	<i>Código para la variable fracción de nubosidad</i>	70
Figura 30	<i>Flujograma de construcción del modelo en WEAP</i>	71
Figura 31	<i>Vista de capas vector importadas a WEAP</i>	72
Figura 32	<i>Estructura de ramales de unidades hidrológicas</i>	76
Figura 33	<i>Ramales creados en supuestos clave para parámetros de uso del suelo</i>	77
Figura 34	<i>Serie de caudales del río Toachi graficados en WEAP</i>	82
Figura 35	<i>Parámetros de uso de suelo iniciales de tierra agropecuaria y toda la subcuenca</i>	84
Figura 36	<i>Parámetros de uso de suelo iniciales de tierra arbustiva y herbácea</i>	85
Figura 37	<i>Parámetros de uso de suelo iniciales de tierra forestal</i>	85
Figura 38	<i>Oferta de agua anual en la subcuenca Toachi</i>	87
Figura 39	<i>Oferta de agua mensual por década en la subcuenca Toachi</i>	88
Figura 40	<i>Oferta hídrica mensual en la subcuenca Toachi</i>	89
Figura 41	<i>Demanda hídrica mensual por usos en la subcuenca Toachi</i>	90
Figura 42	<i>Esquema del modelo WEAP</i>	93
Figura 43	<i>Caudales simulados por WEAP y los medidos por la estación H0166</i>	94



## Resumen

Este estudio abordó el tema de la modelación hidrológica mediante la herramienta Water evaluation and planning (WEAP) en la subcuenca del río Toachi, que se encuentra principalmente dentro del cantón Sigchos; el cual reporta una susceptibilidad a déficit hídrico media-alta que se agrava en época seca. El objetivo principal de la investigación fue realizar la modelación del balance hídrico en la subcuenca Toachi a través de WEAP, para proponer medidas de manejo del recurso agua. Esto requirió la recopilación de información hidrométrica, de demanda hídrica y de cobertura de la tierra; y la generación de datos climatológicos por zona altitudinal a partir de imágenes históricas disponibles en el catálogo público de la plataforma Google Earth Engine (GEE). La modelación se realizó por el método de la humedad del suelo de WEAP y comprendió un periodo de simulación de 1990-2013. Las medidas estadísticas obtenidas de la calibración del modelo fueron: NSE de 0,42, bias de 1,33% y RMSE de 11,32%, que en general indicaron un buen ajuste. De acuerdo con los resultados obtenidos del balance hídrico, en época seca se determinó mayores salidas que entradas al sistema, con un valor de -28,58 hm<sup>3</sup> y un superávit de 31,48 hm<sup>3</sup> en estación lluviosa. El análisis de la oferta y demanda hídrica indicó que la subcuenca Toachi en general sí dispone de suficiente agua para suplir las demandas, y los balances hídricos negativos obtenidos de mayo a octubre no representaron necesariamente un déficit del recurso para suplir las necesidades de la población, más bien una mayor salida de agua que entrada al sistema, siendo la construcción de obras de retención una propuesta clave para garantizar la disponibilidad hídrica futura.

### *Palabras clave:*

- **BALANCE HÍDRICO**
- **WEAP**
- **GOOGLE EARTH ENGINE**

### **Abstract**

This study addressed the issue of hydrological modeling using the Water evaluation and planning tool (WEAP) in the Toachi river sub-basin, which is located mainly within the Sigchos canton, which reports a medium-high susceptibility to water deficit that worsens in the dry season. The main objective of the research was to model the water balance in the Toachi sub-basin through WEAP, in order to propose water resource management measures. This required the collection of hydrometric, water demand and land cover information; and the generation of climatological data by altitudinal zone from historical images available in the public catalog of the Google Earth Engine (GEE) platform. The modeling was performed by the WEAP soil moisture method and comprised a simulation period of 1990-2013. The statistical measures obtained from the model calibration were: NSE of 0,42, bias of 1.33% and RMSE of 11,32%, which in general indicated a good fit. According to the results obtained from the water balance, in the dry season there were greater outflows than inflows to the system, with a value of -28,58 hm<sup>3</sup> and a surplus of 31,48 hm<sup>3</sup> in the rainy season. The analysis of water supply and demand indicated that the Toachi sub-basin in general does have enough water to meet the demands, and the negative water balances obtained from May to October did not necessarily represent a deficit of the resource to meet the needs of the population, but rather a greater outflow of water than inflow to the system, with the construction of retention works being a key proposal to guarantee future water availability.

*Key words:*

- **WATER BALANCE**
- **WEAP**
- **GOOGLE EARTH ENGINE**

## Capítulo 1

### Antecedentes

Los modelos hidrológicos constituyen herramientas para la gestión de las cuencas hidrográficas, tanto en el recurso suelo como en el agua (Moriasi et al., 2007).

La comprensión de la hidrología de una cuenca y la modelización de los diferentes procesos hidrológicos dentro de la misma son muy importantes para evaluar el bienestar medioambiental y económico de la cuenca. El balance hídrico de una cuenca es el aspecto clave en los programas de desarrollo y gestión de los recursos hídricos (Phue & Chuenhooklin, 2020).

Ecuador posee un volumen de 376,0 km<sup>3</sup> de recursos hídricos, es decir, 26.000 m<sup>3</sup> per cápita. Pero existe una distribución desigual tanto temporal como espacial, con fuertes precipitaciones en la época lluviosa y ausencia de éstas en temporada seca. Esta distribución irregular y el cambio climático producen inundaciones y sequías en todo el país, lo cual afecta a poblaciones y tierras agrícolas, especialmente las que requieren de riego. También, se da una limitación en el desarrollo económico y social, principalmente en años con bajo caudal o sequía continua. Por lo tanto, hay un conflicto evidente entre suministro y consumo de agua (Changjiang Insitute of Survey Planning Design and Research (CISPDR), 2016).

Pullupaxi & Villarreal (2013), caracterizan la parte alta de la cuenca del río Toachi como una zona fría y de escasa vegetación, con grandes deslizamientos debido al tipo de suelo que es predominantemente arena. La vegetación predominante en esta zona es: páramos, pastos y matorrales. Además, en esta parte de la cuenca la principal actividad de la población es la agricultura y ganadería. En cuanto a la parte media de la cuenca Pullupaxi & Villarreal (2013), mencionan que predomina el bosque intervenido y se presenta la actividad de pastoreo. Tiene un clima templado con precipitaciones medias. Finalmente, caracterizan la parte baja de la cuenca del río Toachi como una zona que presenta mayor temperatura y humedad, además, se

detecta el problema de la tala de bosque, de mantenerse afectaría directamente a la escorrentía superficial.

En cuanto a planes para proteger la cuenca, El Fondo Ítalo Ecuatoriano para el Desarrollo Sostenible (FIEDS) implementó un proyecto denominado “Protección cuenca hidrográfica del Río Toachi mediante capacitación y reforestación con prioridad de especies agroforestales”, mismo que se localizó en la provincia de Cotopaxi, cantón Sigchos. El objetivo general del proyecto consistió en forestar y reforestar la parte media y baja de la cuenca hidrográfica del río Toachi para proteger y mejorar sistemas agroforestales y silvopastoriles de 160 familias dedicadas a la producción agropecuaria (Fondo Ítalo Ecuatoriano para el Desarrollo Sostenible (FIEDS), 2017).

El 66% de la subcuenca del río Toachi está dentro del cantón Sigchos (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos, 2012). En el cantón el déficit hídrico se agrava en temporada de sequía puesto que los caudales disminuyen considerablemente a raíz de la deforestación. Esto provoca la disminución de la capacidad de la superficie terrestre de recolectar y filtrar el agua para mantener el ciclo hidrológico, moderar inundaciones y sequías (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos, 2015).

Por consiguiente, el presente proyecto consiste en realizar la modelación del balance hídrico de la subcuenca del río Toachi a través de la herramienta Water evaluation and planning (WEAP) para realizar una propuesta de manejo del recurso hídrico en el área de estudio.

### **Planteamiento del problema**

La población cotopaxense ha percibido la disminución de caudales entre el 30% y 50% en los últimos 10 años, inclusive, la desaparición de fuentes de agua que solían brindar el líquido vital (Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Cotopaxi, 2015).

Uno de los cantones de la provincia de Cotopaxi es Sigchos. Éste se encuentra en la subcuenca del río Toachi, perteneciente a la cuenca del río Esmeraldas. El 66% de la subcuenca del río Toachi está dentro del cantón Sigchos. En las parroquias de Chugchilán, Isinlivi y Sigchos, el caudal de fuentes de agua ha disminuido alrededor del 70% en los últimos diez años. En época de verano dicho caudal disminuye un 27%. Además, se reporta la falta de recursos hídricos para consumo humano en el cantón. Según datos de SENAGUA, el caudal adjudicado en el cantón Sigchos es de 279 lts/día por habitante, sin embargo, un diagnóstico realizado indica que en realidad se cuenta con 83 lts/día por habitante (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos, 2012).

Según el mapa de susceptibilidad a déficit hídrico, 2.503 ha del cantón Sigchos presentan un valor “alto” y 48.740 ha indican un valor “medio alto”. La situación se agrava en temporada de sequía puesto que los caudales disminuyen considerablemente a raíz de la deforestación. La mayor presión por el cambio de uso de suelo se da por la implementación de actividades agropecuarias y pastizales en bosques. Esto provoca la disminución de la capacidad de la superficie terrestre de recolectar y filtrar el agua para mantener el ciclo hidrológico, moderar inundaciones y sequías (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos, 2015).

En efecto, el cantón Sigchos presenta una disminución considerable del recurso hídrico, lo cual amerita la toma de medidas adecuadas para el manejo del agua. Para esto, es necesario conocer la disponibilidad de este recurso. Por consiguiente, el presente proyecto consiste en realizar la modelación del balance hídrico de la subcuenca del río Toachi a través de la herramienta Water evaluation and planning (WEAP), para realizar una propuesta de manejo del recurso agua en el área de estudio.

### **Justificación e importancia**

Dependiendo de la motivación, los gestores pueden tomar decisiones respecto a los cambios de uso de la tierra que tienen grandes impactos en la hidrología de un sistema. Las decisiones de urbanización, deforestación y expansión de la agricultura tienen efectos diversos en el rendimiento hídrico, la capacidad de almacenamiento del suelo, la escorrentía superficial y la evapotranspiración de una cuenca (Zhang et al., 2017).

Los gestores del agua y los responsables políticos necesitan herramientas para lograr un equilibrio entre la oferta y la demanda de agua, para garantizar un uso equitativo de los recursos hídricos, proteger el medio ambiente y establecer prioridades en los recursos hídricos compartidos (Van Loon & Droogers, 2006).

Los modelos hidrológicos constituyen herramientas para la gestión de las cuencas hidrográficas, tanto en el recurso suelo como en el agua (Moriassi et al., 2007).

La comprensión de la hidrología de una cuenca y la modelización de los diferentes procesos hidrológicos dentro de la misma son muy importantes para evaluar el bienestar medioambiental y económico de la cuenca. El balance hídrico de una cuenca es el aspecto clave en los programas de desarrollo y gestión de los recursos hídricos (Phue & Chuenchooklin, 2020).

El Ecuador elaboró un Plan para el Ordenamiento de los Recursos Hídricos entre 1982 y 1984, con el fin de resolver el conflicto entre oferta y demanda de los recursos hídricos, salvaguardar la vida de las personas, la soberanía alimentaria y garantizar el consumo de agua industrial. De esta manera, hasta el año 2001 se contó con 20 estudios en cuencas y subcuencas hidrográficas, sin embargo, debido a intereses particulares de entidades planificadoras se llegó a tener una visión fragmentada e ineficaz de la planificación y gestión de los recursos hídricos. En base a estos antecedentes, en octubre del 2012 la Autoridad Única del Agua (Secretaría del Agua del Ecuador -SENAGUA) y el Changjiang Insitute of Survey Planning Design and Research

(CISPDR) de la República Popular de China, suscribieron un contrato para desarrollar el Plan Nacional de Gestión Integrada e Integral de los Recursos Hídricos de las Cuencas y Microcuencas hidrográficas de Ecuador (PNGIRH). Este plan permite contar con la Planificación Hidrográfica del Ecuador (Continental), conforme a las disposiciones legales, políticas nacionales, planificación y gestión del recurso hídrico, y las necesidades de la población y del medio ambiente (Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research (CISPDR), 2016).

Es así que, el presente proyecto aporta en el levantamiento de información de disponibilidad de agua de la subcuenca hidrográfica del río Toachi a través de la modelación del balance hídrico (oferta y demanda) con la herramienta WEAP, con el fin de proponer medidas de manejo adecuado del recurso agua.

Según Sieber et al., (2015), WEAP es una herramienta informática de fácil manejo desarrollada por el Instituto Medioambiental de Estocolmo (SEI) para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a gestionar la demanda y el suministro de agua, y evaluar las opciones de gestión del agua. WEAP se ha utilizado en todo el mundo para contabilizar el funcionamiento del balance hídrico con un paso de tiempo mensual, y puede aplicarse en una sola cuenca a una cuenca hidrográfica transfronteriza compleja.

En cuanto al área de estudio del presente proyecto, el 66% de la subcuenca del río Toachi está dentro del cantón Sigchos (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos, 2012). Según el mapa de susceptibilidad a déficit hídrico, 2503 ha del cantón Sigchos presentan un valor “alto” y 48740 ha indican un valor “medio alto”. Además, la presión por el cambio de uso de suelo ha provocado la disminución de la capacidad de la superficie terrestre de recolectar y filtrar el agua para mantener el ciclo hidrológico, moderar inundaciones y sequías (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos, 2015).

### Estudios relacionados

Yáñez (2019), en su investigación “Balance hídrico de la microcuenca del río tahuando, parroquia Angochagua – Ibarra”, indica que la unidad hidrográfica del río Tahuando adolece de falta de información sobre producción y consumo de agua. El autor realizó la cuantificación de la oferta a través de la instalación de pluviómetros y la cuantificación de la demanda natural mediante la instalación en campo de evaporímetros y lisímetros. Se obtuvo como resultado la disponibilidad hídrica actual y el estrés hídrico.

Noreika et al.,(2020), en su estudio “Farm-Scale Biofuel Crop Adoption and Its Effects on In-Basin Water Balance”, investigaron el campo poco explorado de los impactos de cultivos para biocombustibles en el balance hídrico de un sistema, a través de la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT). Concluyeron que la adopción del cultivo de colza no apoya el objetivo de establecer un paisaje agrícola sostenible y no refuerza el ciclo local del agua en la República Checa.

Graf & Jawgiel (2018), en su investigación “The Impact of the Parameterisation of Physiographic Features of Urbanised Catchment Areas on the Spatial Distribution of Components of the Water Balance Using the WetSpa Model”, analizaron la actividad de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) y su impacto en los componentes del balance hídrico de dos cuencas urbanizadas de la ciudad de Poznan, Polonia. Los resultados del modelo WetSpa confirmaron que los valores más bajos de escorrentía ocurrieron en áreas forestales, mientras que los más altos en las zonas compactas urbanizadas.

Phue & Chuenchooklin (2020), en su estudio “Existing Water Balance in the Bago River Basin, Myanmar”, evaluaron el balance hídrico de la cuenca del río Bago, en Myanmar, a través del modelo de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP) para conocer la situación actual de la



disponibilidad y demanda del recurso hídrico. Los resultados del estudio indicaron que la cuenca del río Bago tiene suficiente agua para satisfacer las demandas.

Proaño (2010), en su investigación “Modelación oferta-demanda de agua en cuencas desarrolladas-cuenca alta del Guayllabamba y cuencas de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito, con ayuda de la herramienta WEAP”, realizó la modelación entre oferta y demanda hídrica de la cuenca alta del río Guayllabamba y cuencas que abastecen de agua a la ciudad de Quito, a través de la herramienta WEAP. El autor concluye que las ventajas de la herramienta WEAP son muy amplias en comparación a otros programas.

### **Objetivos generales y específicos**

#### ***Objetivo general***

Realizar la modelación del balance hídrico en la subcuenca del río Toachi, mediante la herramienta WEAP, para proponer medidas de manejo del recurso hídrico.

#### ***Objetivos específicos***

Delimitar la subcuenca hidrográfica del río Toachi y sus microcuencas, para definir la unidad básica de modelación y realizar una caracterización morfométrica del área de estudio.

Recopilar y procesar los datos requeridos de entrada (datos climatológicos, uso de suelo, sitios de demanda y suministros de agua) y calibración (series de tiempo de caudales de los ríos) para la construcción del modelo en la herramienta WEAP.

Realizar el modelamiento del balance hídrico de la subcuenca del río Toachi con la herramienta WEAP, para conocer la disponibilidad de agua del área de interés.

Calibrar el modelo para conocer la exactitud del mismo y ajustar parámetros hidrológicos.

Realizar una propuesta de manejo del recurso hídrico con los resultados obtenidos, a partir de la aplicación de la herramienta WEAP.

### **Metas**

Mapa de la subcuenca hidrográfica del río Toachi y sus respectivas microcuencas.

Matriz de caracterización morfométrica del área de estudio.

Base de datos con series de tiempo continuos de precipitación, temperatura y caudales delimitados al periodo de simulación y paso de tiempo del modelo.

Modelo obtenido de la aplicación de la herramienta WEAP del balance hídrico.

Resultados de medidas estadísticas obtenidas de la exactitud del modelo.

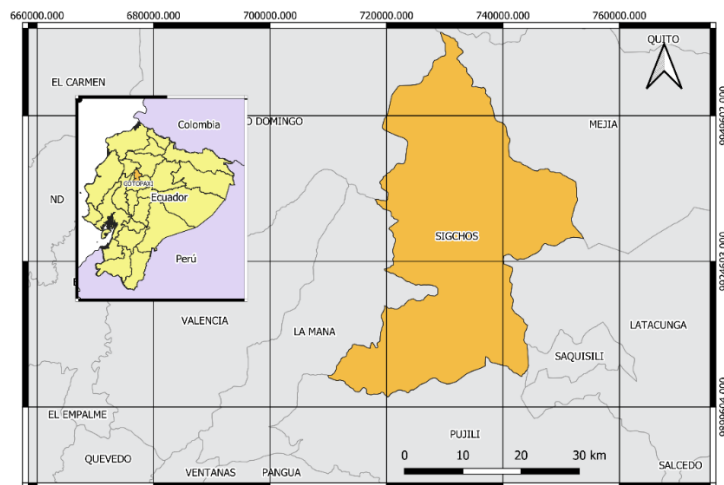
Propuesta de manejo del recurso hídrico en la subcuenca del río Toachi.

### **Área de influencia**

El área de influencia directa del presente proyecto a ser aplicado en la subcuenca del río Toachi es el cantón Sigchos. Mientras que el área de influencia indirecta corresponde a los cantones aledaños a Sigchos, como Pujilí, Latacunga y Mejía. A continuación, se presentan en la Figura 1 los cantones mencionados en el área de influencia.

**Figura 1**

*Cantones del área de influencia*



*Nota:* La figura representa el cantón Sigchos como área de influencia directa del proyecto y los cantones aledaños como área de influencia indirecta.

## Capítulo 2

### Base teórica

Los cambios de uso del suelo de bosques o pastos a tierras de cultivo (y viceversa) han sido ampliamente estudiados, son menos los estudios hidrológicos realizados que examinan dichos efectos basándose únicamente en los cambios de cultivo (Bauer & Black, 1981) (Bronson et al., 2004).

Noreika et al., (2020) llevaron a cabo el análisis de escenarios utilizando la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT) para determinar los efectos de la adopción de cultivos de biocombustibles a escala agrícola (colza) en el balance hídrico de una pequeña cuenca en la República Checa. Además, concluyeron que la aplicación de estos modelos hidrológicos puede ayudar a modificar las políticas públicas y servir de herramienta para la toma de decisiones de los gestores de cuencas hidrográficas.

Por otro lado, Graf & Jawgiel (2018) determinaron el balance hídrico de una cuenca fuertemente urbanizada en la ciudad de Poznan, Polonia. Utilizaron el modelo WetSpas y los datos espaciales del SIG, basándose en los datos hidrometeorológicos del periodo de referencia 1961-2000, incluidos los cambios previstos en el uso del suelo y los cambios en las precipitaciones previstos para 2025. Concluyeron que los resultados de la investigación basada en modelos que utilizan WetSpas pueden constituir un elemento importante del sistema de gestión y protección de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica, especialmente en las zonas fuertemente urbanizadas que están sujetas a cambios dinámicos en el desarrollo espacial.

Además, Phue & Chuenchooklin (2020) describieron la planificación de los recursos hídricos basada en la situación actual de la disponibilidad y la demanda de agua utilizando el modelo de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP) para evaluar el balance hídrico existente en la cuenca del río Bago, en Myanmar-Tailandia. Para ello, recopilaron los datos de las

precipitaciones diarias observadas, las temperaturas máximas y mínimas y la evaporación mensual, la velocidad del viento, la humedad relativa y la descarga del río durante 20 años, de 1999 a 2018. Esta información la obtuvieron del Departamento de Meteorología e Hidrología (DMH) de Myanmar, que abarca dos estaciones de aforo: Bago y Zaung Tu. Phue & Chuenchooklin (2020) concluyeron que la comprensión de la hidrología de una cuenca y la modelización de los diferentes procesos hidrológicos dentro de la misma son muy importantes para evaluar el bienestar medioambiental y económico de la cuenca. El balance hídrico de una cuenca es el aspecto clave en los programas de desarrollo y gestión de los recursos hídricos.

### **Base conceptual**

#### ***Cuenca hidrográfica***

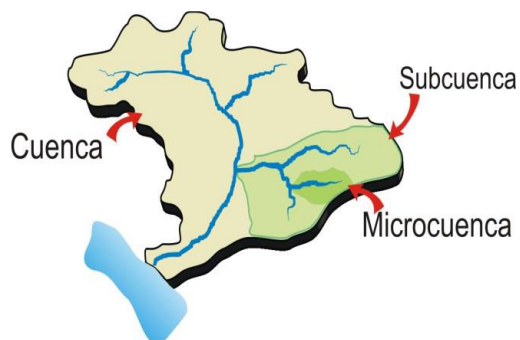
La cuenca hidrográfica es una unidad idónea de planeación del espacio geográfico, a pesar de que existen problemas en armonizar los límites físicos y políticos, siendo este último el que desempeña las políticas públicas (Bakker, 2012).

Para Llerena (2003), la óptica más importante de concebir a una cuenca hidrográfica es como una unidad territorial natural, puesto que esta percepción permite comprender que solamente en una cuenca hidrográfica se pueden determinar balances hídricos. Sin embargo, una cuenca también puede considerarse como una unidad política, administrativa o de gestión ambiental, debido a que presenta cualidades de una unidad hidrológica y de un medio colector-almacenador-integrador de los procesos naturales y antrópicos.

Entre los términos que se usan para identificar las características de una cuenca se tiene la microcuenca, área cuyo drenaje se dirige al cauce principal de una subcuenca, misma que se define como el conjunto de microcuencas. En efecto, se denomina cuenca a un sistema formado por subcuencas o microcuencas (Ordoñez, 2011b). En la Figura 2 se representan estas tres definiciones.

**Figura 2**

*Cuenca, subcuenca y microcuenca*

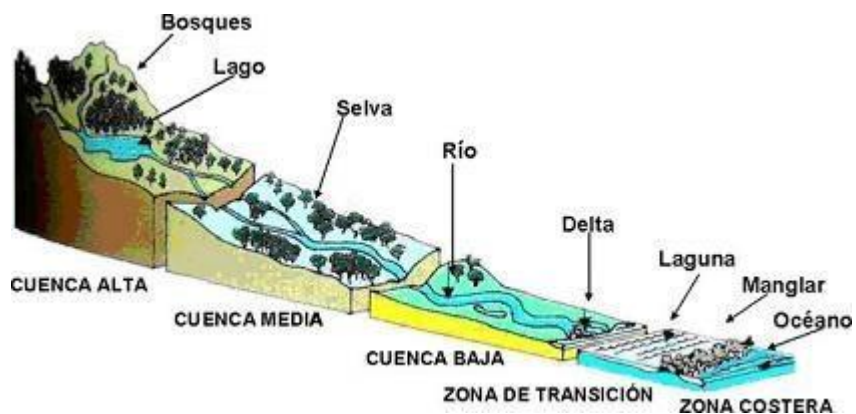


*Nota:* Adaptado por (Casaverde, 2011)

Una cuenca también se puede dividir por zonas: alta, media y baja. La denominada cuenca alta presenta generalmente áreas montañosas que se encuentran limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas. La zona en la que se juntan las aguas de las partes altas y el río principal tiene un cauce definido se conoce como cuenca media. Por último, es en la cuenca baja donde el río desemboca a ríos mayores o a estuarios y humedales conocidos como zonas bajas (Ordoñez, 2011b). En la Figura 3 se puede observar las principales partes de una cuenca.

**Figura 3**

*Partes de una cuenca*



*Nota:* Tomado de Eoearth, adaptado por (Ordoñez, 2011b)

### **Balance hídrico**

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

Según el Instituto de Hidrología de España & Unesco (1981), de la manera más general, el balance hídrico para cualquier masa de agua e intervalo de tiempo viene representado por la Ecuación 1. Además, se destaca que el volumen de agua almacenada en la cuenca aumenta cuando las entradas son mayores que las salidas, caso contrario disminuye.

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{so} - Q_{uo} - \Delta S - v = 0 \quad (1)$$

Donde:

$P$ : precipitación (lluvia o nieve) en realidad recibida en la superficie del suelo.

$Q_{sl}$ : aguas superficiales recibidas dentro de la cuenca desde fuera.

$Q_{ul}$ : aguas subterráneas recibidas dentro de la cuenca desde fuera.

$E$ : evaporación desde la superficie de la masa de agua.

$Q_{so}$ : salida de agua superficial desde la cuenca.

$Q_{uo}$ : salida de agua subterránea desde la cuenca.

$\Delta S$ : volumen de agua almacenada.

$v$ : término residual o de diferencia.

El Instituto de Hidrología de España & Unesco (1981) afirman que el intercambio de aguas subterráneas con cuencas vecinas, representado por los términos  $Q_{ul}$  y  $Q_{uo}$  de la Ecuación 1, se suponen igual a cero en grandes cuencas de ríos, debido a que sus valores son pequeños a diferencia de los demás términos. Por otro lado, cuando se tiene una divisoria de

cuencas bien definida, las aportaciones superficiales, representado por el término  $Q_{SI}$  de la Ecuación 1, se desprecian. En efecto, la ecuación del balance hídrico de la cuenca de un río se expresa en la Ecuación 2.

$$P - E - Q - \Delta S - v = 0 \quad (2)$$

Donde:

$P$ : precipitación (lluvia o nieve) en realidad recibida en la superficie del suelo.

$Q$ : descarga del río desde la cuenca.

$E$ : evaporación desde la superficie de la masa de agua.

$\Delta S$ : volumen de agua almacenada.

$v$ : término residual o de diferencia.

Laporte (2012) afirma que el balance hídrico se considera un requisito indispensable para una gestión integral del agua de un territorio. Además, su importancia radica en que se considera una herramienta útil para la planeación y manejo del líquido vital, especialmente al tomar en cuenta el agua superficial y subterránea (PHI & UNESCO, 2006). Es posible ejecutar modelos de balance hídrico y conocer la disponibilidad de agua para distintos objetivos (Bussettini, 2018).



### Componentes del balance hídrico.

**Esorrentía superficial.** Se define como la parte del agua de la precipitación que no es evaporada ni infiltrada y escurre superficialmente. También se denomina caudal, el cual es necesario conocer para el aprovechamiento del líquido vital. Este componente del balance hídrico se divide en: esorrentía directa y basal. La primera se refiere al agua que se dirige en corto tiempo a los cauces superficiales de manera directa tras la precipitación; además, comprende la esorrentía superficial y subsuperficial (hipodérmica). Por otro lado, la esorrentía basal es aquella que alimenta los cauces superficiales cuando su nivel de caudal es mínimo, es decir, en época de estiaje (Ordoñez, 2011a).

En la Figura 4 se puede observar los tipos de esorrentía.

**Figura 4**

*Tipos de esorrentía*



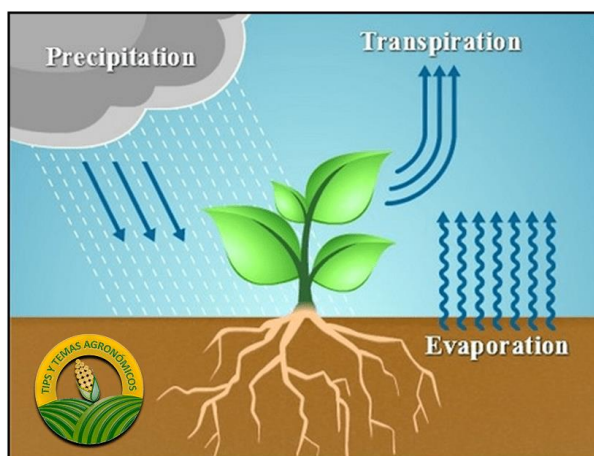
*Nota:* tomado de (Acadity, 2021)

**Evapotranspiración.** Engloba la evaporación desde el suelo, el agua interceptada y la transpiración de las plantas. Estos procesos conllevan pérdida de agua. La evaporación consiste en la transformación del agua en estado líquido a vapor, mediante la energía de la radiación solar directa. Con respecto a la transpiración, es la vaporización del agua a través de los estomas de hojas de las plantas (Ordoñez, 2011a).

En la Figura 5 se puede observar los procesos de la evapotranspiración.

### Figura 5

*Procesos de la evapotranspiración*



*Nota:* tomado de (Portillo, n.d.)

**Riego.** Constituye el principal componente del balance hídrico en zonas áridas.

Determinar el balance hídrico en zonas regadas permite mejorar el régimen de riego y la productividad de la tierra. Hidrológicamente, estas zonas se clasifican en tierras bien drenadas con abundante flujo subterráneo y tierras poco drenadas que carecen de este componente (Instituto de Hidrología de España & Unesco, 1981).

**Nieve.** Agua en estado sólido que corresponde a una de las formas de almacenamiento de agua superficial en la cuenca. Las variaciones de nieve deben evaluarse frecuentemente (Instituto de Hidrología de España & Unesco, 1981).

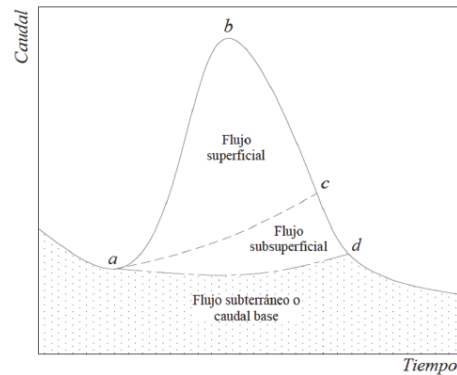
**Humedad del suelo.** Permite el desarrollo de las plantas, éstas utilizan la humedad retenida por el suelo, lo que se denomina humedad aprovechable (Castellanos, 2000). Este componente depende de la textura y estructura del suelo. En un suelo saturado tras la precipitación o riego ocurre el drenaje, rápido movimiento descendente del agua por la gravedad. Este proceso es mayor en suelos arenosos que en arcillosos, y mientras ocurre, disminuye la humedad del suelo continuamente (Zotarelli et al., 2013).

**Flujo base.** Caudal de ríos y quebradas proveniente de aguas subterráneas, éstas se descargan durante los meses de la época seca (gidahatari, 2016). Conocer la fracción de flujo base respecto al río puede indicar la sostenibilidad de la reserva hídrica en cuencas (IAEA, 2010).

En la Figura 6 se observa la representación del flujo base en un hidrograma.

**Figura 6**

*Esquema de separación del hidrograma*



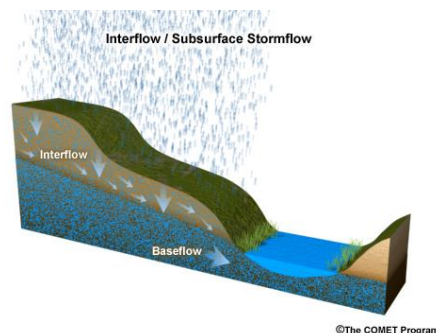
*Nota:* tomado de (Gómez-Isidro & Gómez-Ríos, 2016)

**Inter flujo.** Capas de agua retenidas por subsuelos impermeables ubicados debajo de capas de suelo casi permeables. El inter flujo se encuentra encima del agua subterránea y no contribuye directamente a la misma, presenta un movimiento lento en forma lateral (Shaxson & Barber, 2005). Además, se descarga en los cursos de agua como flujo subsuperficial (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

En la Figura 7 se representa el inter flujo en un sistema hidrológico.

**Figura 7**

*Inter flujo*



*Nota:* tomado de (The COMET Program, 2006).

**Precipitación.** Por lo general, representa la única fuente de humedad del suelo, por ende, sus valores deben ser altamente precisos, mismos que influyen en gran manera a la exactitud de los cálculos del balance hídrico (Instituto de Hidrología de España & Unesco, 1981).

### ***Déficit hídrico***

El déficit hídrico se considera una de las limitantes ambientales más grandes para la productividad de cultivos agrícolas (Frahm et al., 2004). Por otro lado, el concepto de déficit hídrico está relacionado con la sequía o escasez, y con la disponibilidad hídrica, es decir, el equilibrio entre la oferta y demanda de agua en el medio (Twenergy, 2020).

### ***Modelación hidrológica***

También conocido como simulación hidrológica se les atribuye análisis del pasado, presente y futuro de los caudales, cambios en el proceso hidrológico y problemas de diseño hidrológico. Los modelos hidrológicos ayudan a ampliar la información sobre la hidrología y datos de las cuencas hidrográficas que permiten predecir lo que podría suceder cuando se modifica el paisaje de la cuenca (Brooks et al., 2012).

Son de gran utilidad puesto que tienen la capacidad de generar predicciones razonablemente precisas dentro del contexto de los datos de entrada disponibles (Lai et al., 2019).

### ***Water evaluation and planning (WEAP)***

En el presente trabajo de investigación se realizó la modelación del balance hídrico en la subcuenca hidrográfica del río Toachi a través del modelo WEAP. Según Sieber et al., (2015), WEAP es una herramienta informática de fácil manejo desarrollada por el Instituto Medioambiental de Estocolmo (SEI) para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a gestionar la demanda y el suministro de agua, y evaluar las opciones de gestión del agua. WEAP se ha utilizado en todo el mundo para contabilizar el funcionamiento del balance hídrico con un

paso de tiempo mensual, y puede aplicarse en una sola cuenca a una cuenca hidrográfica transfronteriza compleja.

### ***Información climática***

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), define algunas variables meteorológicas presentadas en la Tabla 1.

**Tabla 1**

#### *Variables meteorológicas*

Variable meteorológica	Descripción
Precipitación	Hidrometeoro que desciende en forma de lluvia, llovizna, nieve, granizo, hielo granulado de las nubes a la superficie de la tierra. Se expresa en alturas de precipitación en mm. 1mm=litro/m <sup>2</sup> .
Temperatura	Se mide con un termómetro exhibido al aire preservado de la radiación solar directa. Su unidad es grados celsius y décimas de grado.
Viento	Desplazamiento del aire en relación a la superficie de la tierra. Se registra su dirección y velocidad, ésta última en metros por segundo.

Variable meteorológica	Descripción
Fracción de nubosidad	Parte de la bóveda celeste tapada por la totalidad de nubes visibles. Se mide en octas.
Humedad relativa	Indica el grado de saturación de vapor agua en la atmósfera. Se mide en porcentaje.

*Nota:* tomado de (INAMHI, 2017a).

### ***Método de la humedad del suelo***

En este método de simulación de WEAP, la cuenca es representada por dos capas de suelo, además, considera el potencial de acumulación de nieve. La capa superior simula: evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial (inter flujo) y cambios en la humedad del suelo. Por otro lado, la capa inferior simula la ruta del flujo base hacia el río y cambios en la humedad del suelo. También, este método aplica nueve parámetros de uso de suelo (Sieber et al., 2015), presentados en la Tabla 2.

### **Tabla 2**

#### *Parámetros de uso de suelo del método de la humedad del suelo*

Parámetro	Descripción
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (DW)	Es un valor único para la cuenca, no varía por tipo de suelo. Corresponde a la capa inferior, su unidad es mm.

Parámetro	Descripción
Dirección preferencial de flujo (F)	Divide el flujo que sale de la capa de zona de raíces (capa superior) entre inter flujo y flujo hacia la capa inferior del suelo. Su rango varía de 0-1 por clase de suelo.
Coefficiente de cultivo (KC)	Relativo al cultivo de referencia para un tipo de clase de suelo.
Conductividad de zona profunda (KD)	Tasa de conductividad de la capa inferior del suelo saturada por completo (cuando $Z_2=1$ ). Es un valor único para la cuenca, no varía por tipo de suelo. Este parámetro es directamente proporcional al flujo base.
Conductividad de zona de raíces (KS)	Tasa de conductividad de la capa superior del suelo saturada por completo (cuando $Z_1 = 1$ ). Se repartirá según el parámetro "F" entre el inter flujo y flujo hacia la capa inferior del suelo. Varía por clase de suelo.
Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)	Controla la respuesta de la escorrentía superficial. Se relaciona con el índice de área foliar y la pendiente del terreno. Tiene un rango de 0,1-10 y es inversamente proporcional a la escorrentía. Varía por clase de suelo.



Parámetro	Descripción
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (SW)	Corresponde a la capa superior del suelo, su unidad es mm.
Nivel de humedad en la zona de raíces inicial (Z1)	Almacenamiento relativo dado como porcentaje del almacenamiento efectivo total del parámetro SW.
Nivel de humedad en la zona profunda inicial (Z2)	Almacenamiento relativo dado como porcentaje del almacenamiento efectivo total del parámetro DW. No varía por tipo de suelo.

*Nota:* tomado de (Sieber et al., 2015).

Según Sieber et al., (2015), en el método de la humedad del suelo, el balance hídrico viene dado por la Ecuación 3.

$$Rd_j \frac{dZ_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5Z_{1,j} - 2Z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)Z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} Z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} Z_{1,j}^2 \quad (3)$$

Donde:

$Z_{1,j}$ : almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento efectivo total de la zona de las raíces, para la fracción de la cobertura del suelo, j.

$P_e$ : precipitación efectiva.

$PET$ : evapotranspiración potencial.

$k_{c,j}$ : coeficiente de cultivo para cada cobertura vegetal.

$RRF_j$ : factor de resistencia a la escorrentía de la cobertura vegetal.

$k_{s,j}$ : conductividad saturada de la zona de raíces.

$f_j$ : coeficiente que reparte el agua tanto horizontal como verticalmente.

Primer término,  $P_e(t)$ : precipitación efectiva.

Segundo término,  $PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5Z_{1,j}-2Z_{1,j}^2}{3}\right)$ : evapotranspiración potencial.

Tercer término,  $P_e(t)Z_{1,j}^{RRFj}$ : escorrentía superficial.

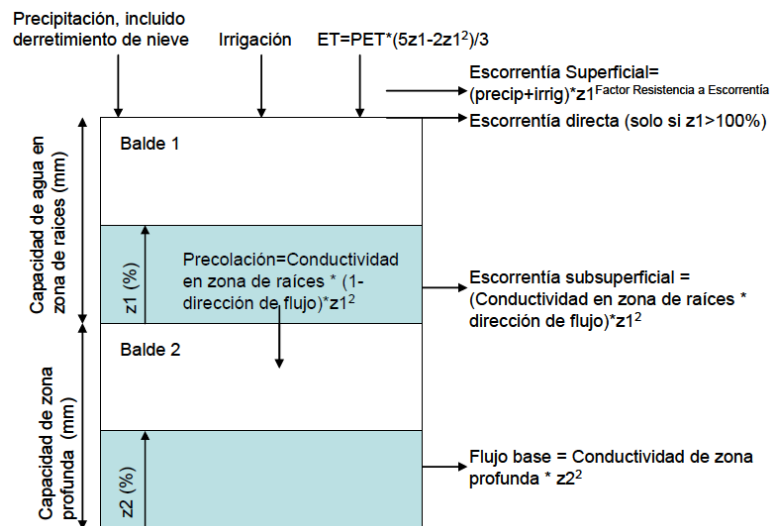
Cuarto término,  $f_j k_{s,j} Z_{1,j}^2$ : inter flujo.

Quinto término,  $(1 - f_j)k_{s,j}Z_{1,j}^2$ : percolación profunda.

Finalmente, en la Figura 8 se tiene la representación conceptual del modelo de humedad del suelo.

### Figura 8

#### Diagrama conceptual y ecuaciones del modelo de humedad del suelo



*Nota:* recuperado de (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).

### Demanda hídrica

Cuantificación del agua necesaria para satisfacer los requerimientos de actividades que utilizan el recurso hídrico. Se puede clasificar en: uso consuntivo y no consuntivo. El primero implica consumo del recurso y se ve reflejado en los usos: agrícola, poblacional, industrial y

pecuario. Por el contrario, en el uso no consuntivo el agua solamente es usada mas no consumida como en usos recreativos o hidro energéticos (Carchi, 2015).

Según Sabas & Paredes (2009), el suministro de agua potable para consumo humano es crucial, a pesar de que a nivel mundial, son las actividades agropecuarias las que usan mayor volumen de agua.

### ***Métricas de bondad de ajuste***

**Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).** Es uno de los criterios más usados en modelos hidrológicos. Mide el grado de la variabilidad de las observaciones que es explicado por la simulación (Cabrera, n.d.). El Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute (2009), utilizan la nomenclatura descrita en la Ecuación 4 para la fórmula de este coeficiente.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (4)$$

Donde:

$Q_{s,i}$ : caudales simulados para cada paso de tiempo.

$Q_{o,i}$ : caudales observados para cada paso de tiempo.

Además, en la Tabla 3 se presentan rangos de valores del NSE con su respectiva descripción del ajuste.

**Tabla 3**

*Rangos de valores del Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe*

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

Nota: tomado de (Molnar, 2011).

**Raíz de la desviación cuadrática media (RMSE).** Determina la magnitud de la desviación de los valores simulados en relación con los observados. Su rango puede ir de cero (ajuste perfecto) hasta el infinito. Mientras mayor sea el valor del RMSE menor será el ajuste (Cabrera, n.d.). Su fórmula se presenta en la Ecuación 5.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sm} - Q_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Donde:

$Q_{sm}$ : valor simulado por el modelo.

$Q_i$ : valor observado.

$n$ : tamaño de la muestra.

**Porcentaje bias.** Denominado sesgo en español, es la diferencia entre la predicción esperada y los valores verdaderos (Gonzalez, 2018). El Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute (2009), utilizan la nomenclatura descrita en la Ecuación 6 para la fórmula de esta métrica. Además, se indica que el valor del porcentaje bias es inversamente proporcional a la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un valor positivo indica sobre estimación y uno negativo sub estimación. En la Figura 9 se presentan rangos de valores de esta métrica.

$$Bias = 100 * \left[ \frac{(\overline{Q_s} - \overline{Q_o})}{\overline{Q_o}} \right] \quad (6)$$

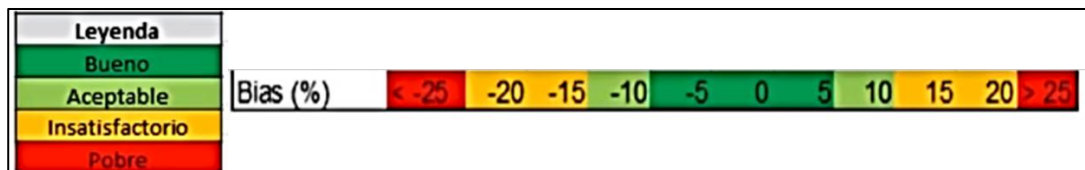
Donde:

$\overline{Q_s}$ : promedio de caudales simulados.

$\overline{Q_o}$ : promedio de caudales observados.

**Figura 9**

*Rangos de valores del Bias*



*Nota:* tomado de (Stockholm Environment Institute, 2020a).

### **Manejo del recurso hídrico**

Lord & Morris (1996) afirman que la ordenación de los recursos hídricos comienza en la cuenca. La misma se considera una unidad idónea para realizar análisis de diferente índole, debido a ser un sistema hidrológico interrelacionado e independiente de sistemas vecinos. No obstante, la autonomía de la cuenca puede verse comprometida por factores como: obras antrópicas, migración animal, transmisión de energía eléctrica y especialmente la organización política. Esto afecta los límites de la unidad para la toma y adopción de decisiones.

Es importante tener presente que las actividades de ordenación de cuencas incidirán en el comportamiento de personas y grupos, por lo tanto, éste debe alinearse a los objetivos de la ordenación de los recursos hídricos. Por ejemplo, en primera instancia, el subsidio de suministro de agua puede pretender impulsar el desarrollo del recurso, sin embargo, habrá un consumo excesivo del mismo, lo cual no es sostenible (Lord & Morris, 1996).

El Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research (CISPDR) (2016), propone varias soluciones ante la implantación de un sistema sostenible para el aprovechamiento integral de los recursos hídrico. Éstas son: construcción de embalses para promover la capacidad de asignación del recurso agua, mayor construcción de sistemas de suministro hídrico en zonas rurales, incremento de infraestructura de riego, conservación del líquido vital y uso eficiente y aprovechamiento del agua con propósitos múltiples.

### ***Fundamentación legal***

**Constitución de la República del Ecuador.** La Constitución de la República del Ecuador aprobada en el 2008, establece en el capítulo séptimo “Derechos de la naturaleza” que la naturaleza tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales (Constitución de la República del Ecuador, 2008). También en su Art.12 en cuanto al derecho humano al agua señala, “constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida”. De igual manera el Art. 318 establece: "El agua es patrimonio nacional estratégico de uso público, dominio inalienable e imprescriptible del Estado, y constituye un elemento vital para la naturaleza y para la existencia de los seres humanos". Además, menciona: "El Estado, a través de la autoridad única del agua, será el responsable directo de la planificación y gestión de los recursos hídricos que se destinarán a consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas, en este orden de prelación. Se requerirá autorización del Estado para el aprovechamiento del agua con fines productivos por parte de los sectores público, privado y de la economía popular y solidaria, de acuerdo con la ley". También el Art. 411 menciona que “El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua”.

**Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.** Por otro lado, la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua abarca en su Artículo 8 la gestión integrada de los recursos hídricos, en el que establece que la entidad responsable es La Autoridad Única del Agua con un enfoque ecosistémico y por cuenca o sistemas de cuencas hidrográficas, la misma que se coordinará con los diferentes niveles de gobierno según sus ámbitos de competencia (Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua, 2014).

**Código orgánico del Ambiente.** El Código orgánico del ambiente en su artículo 30 numeral 7, detalla que uno de los objetivos del Estado respecto a la biodiversidad incluye adoptar un enfoque integral y sistémico de las cuencas hidrográficas y de recursos hídricos para su conservación y uso sostenible (Código orgánico de ambiente, 2017).



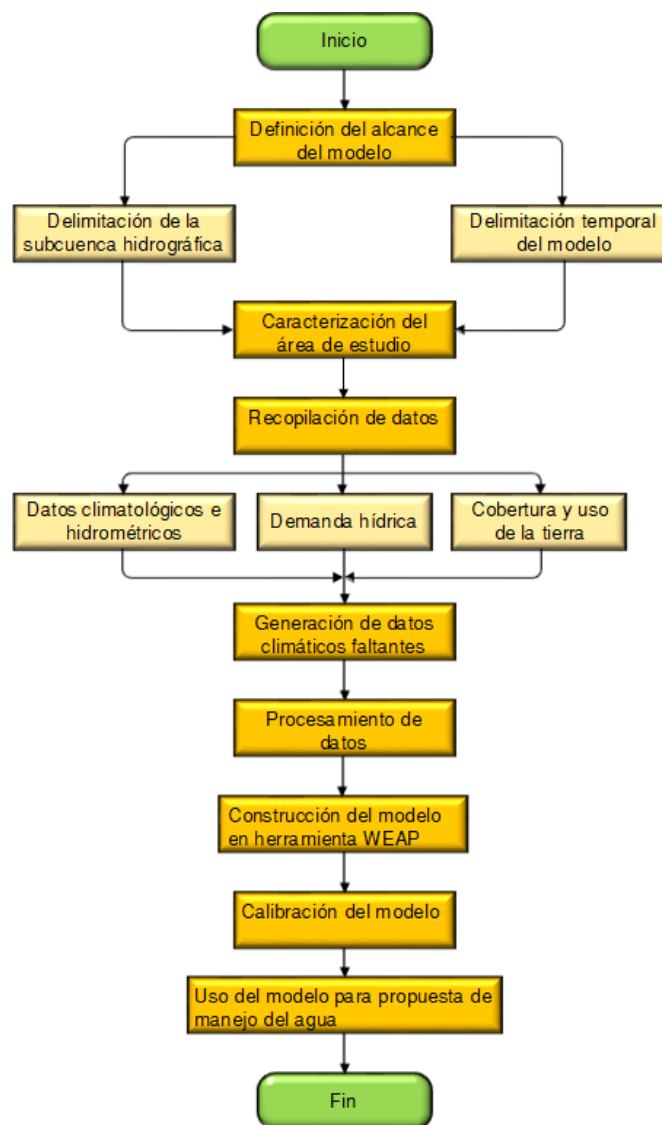
### Capítulo 3

#### Metodología

La Figura 10 engloba todos los procesos realizados en la metodología, desde la definición del alcance del modelo hasta el uso del mismo para elaboración de propuesta de manejo de agua.

**Figura 10**

*Procesos de metodología aplicada*



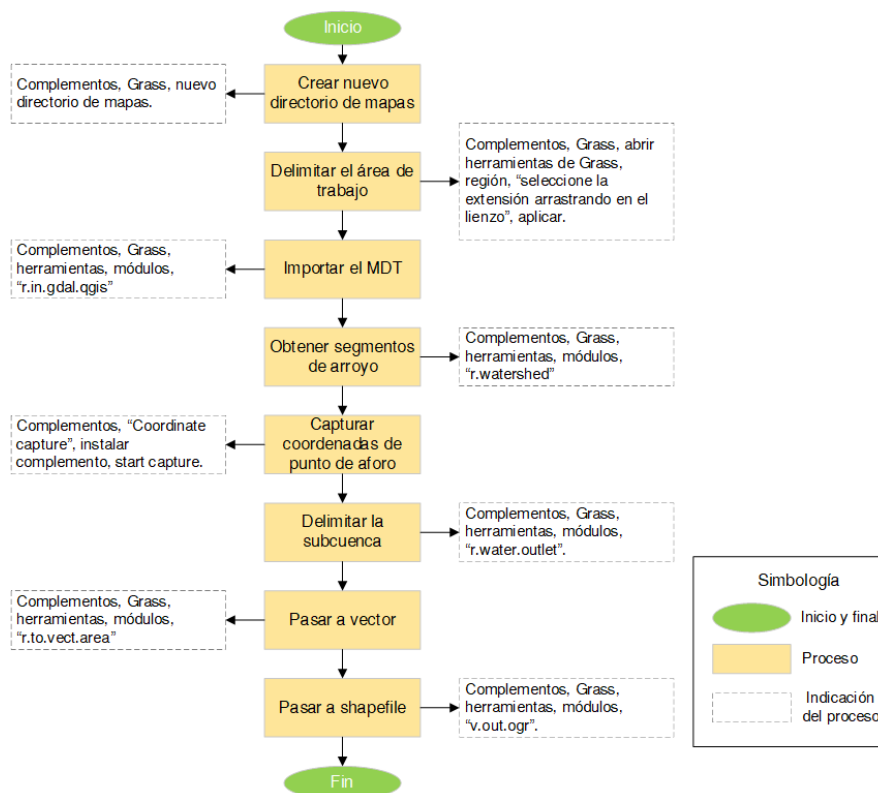
### Definición del alcance del modelo

**Delimitación de la subcuenca hidrográfica en el software QGIS con GRASS.** El principal insumo para este proceso fue el Modelo Digital de Terreno (MDT) que abarca el área de estudio, el mismo, fue entregado por el Instituto Geográfico Militar (IGM). El producto cartográfico corresponde al año 2014, su escala es 1:5.000, su tamaño de píxel es de 3 metros y el sistema de referencia de coordenadas es EPSG: 32717 - WGS 84 / UTM zona 17S.

El proceso de delimitación se lo realizó a través del software GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) que se encuentra integrado a QGIS, la versión utilizada fue 3.16.5 con GRASS 7.8.5. En la Figura 11, se puede observar un flujograma de los diferentes procesos realizados en GRASS, para delimitar la subcuenca hidrográfica del río Toachi.

**Figura 11**

#### Flujograma de delimitación de cuenca con GRASS



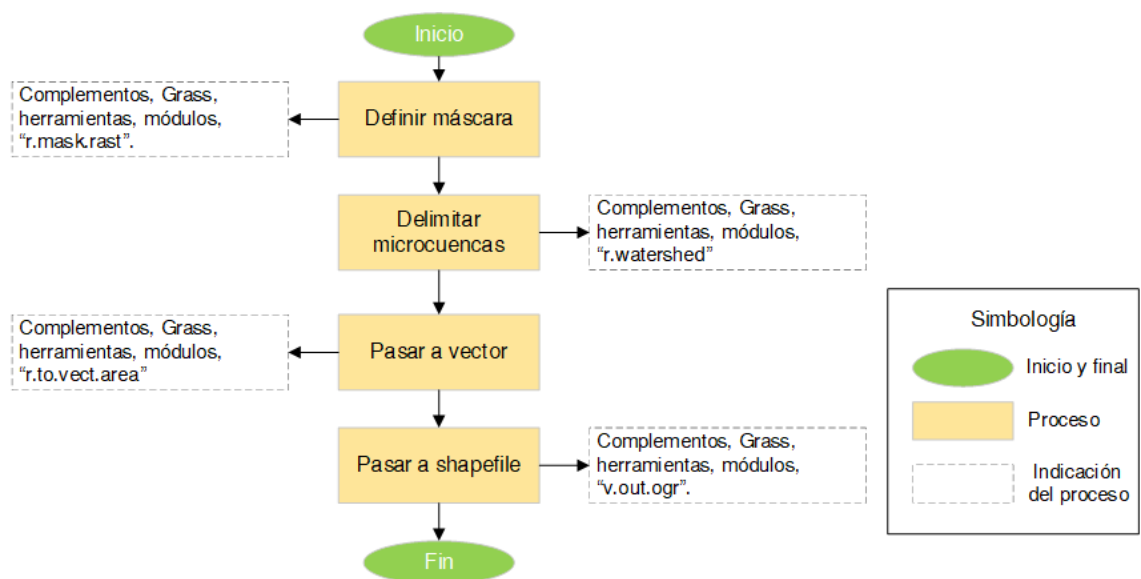
*Nota:* Elaboración propia basado en (Yory, 2021).

**División de la subcuenca en microcuencas.** Este proceso se lo realizó en el mismo directorio de mapas creado en GRASS en el paso anterior. Consistió en definir como máscara la capa ráster de la subcuenca del río Toachi ya delimitada, para posteriormente generar sus microcuencas a partir del MDT, capa ráster de elevación proporcionado por el IGM.

En la Figura 12, se presenta un flujograma de los procesos realizados en GRASS para delimitar las microcuencas del área de estudio, y en la Figura 13 un mapa de las mismas.

**Figura 12**

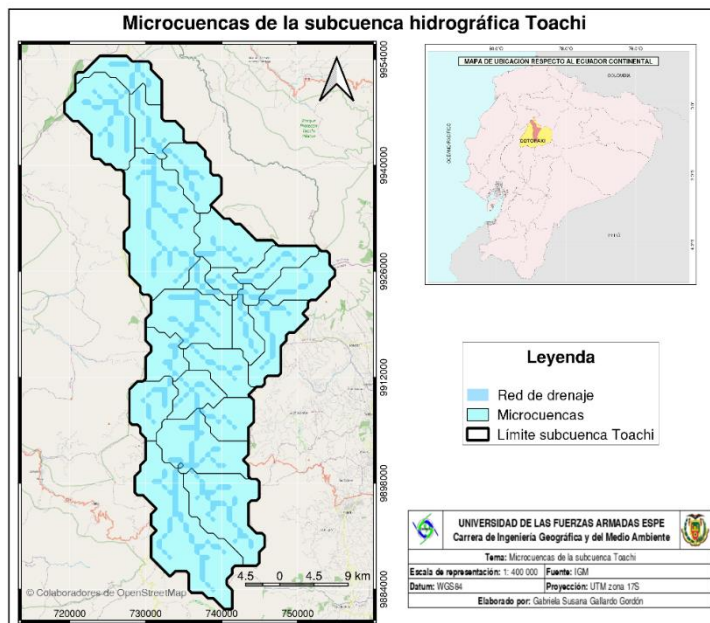
*Flujograma de delimitación de microcuencas con GRASS*



*Nota:* Elaboración propia basado en (Yory, 2018b).

Figura 13

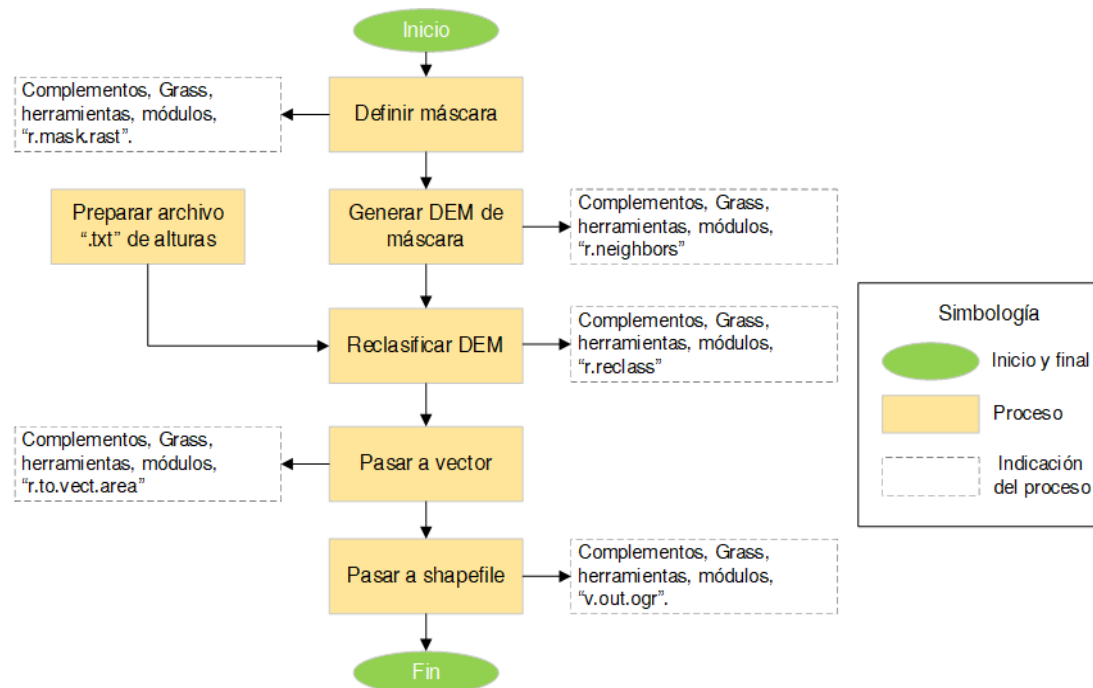
Mapa de microcuencas de la subcuenca Toachi



**División de la subcuenca por bandas de elevación.** Para este proceso se siguieron las recomendaciones dadas en el documento “Procesamiento de datos de SIG para aplicaciones de WEAP” desarrollado por Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute (2009). El insumo base para este proceso fue el ráster de elevación proporcionado por el IGM, a partir del cual se obtuvo el DEM de la subcuenca hidrográfica del río Toachi. Éste fue reclasificado, en primera instancia, cada 250 metros mediante un archivo “.txt” que contenía las reglas de reclasificación, siendo la altura mínima 1.000 metros y la máxima 5.000 metros. En la Figura 14, se presenta un flujograma de los procesos realizados en GRASS, para reclasificar las alturas del área de estudio.

Figura 14

Flujograma de reclasificación de alturas con GRASS



Nota: Elaboración propia basado en (Yory, 2018a).

El DEM reclasificado se lo convirtió en archivo tipo shapefile para realizar una intersección entre éste y las microcuencas previamente delimitadas. Luego de la intersección se creó un campo en la tabla de atributos para identificar las microcuencas y los rangos de altura. A partir de éste se realizó el proceso de disolver y se crearon nuevos campos hasta obtener cinco zonas altitudinales que se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Zonas altitudinales del área de estudio

Zona altitudinal	Rango (m)
1	1000-2750
2	1500-3750

Zona altitudinal	Rango (m)
3	2250-4000
4	2750-4500
5	3000-5000

En la Figura 15, se tiene un flujograma de los procesos para obtener las zonas altitudinales del área de estudio, y en la Figura 16, se presenta un mapa de las mismas.

**Figura 15**

*Flujograma para obtención de zonas altitudinales*

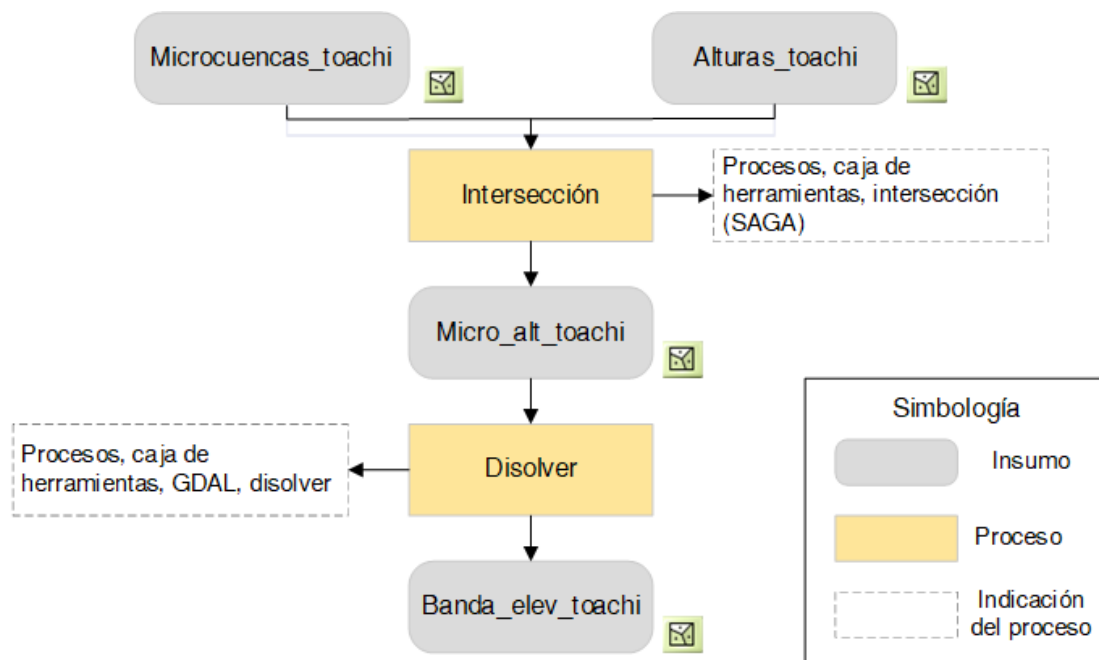
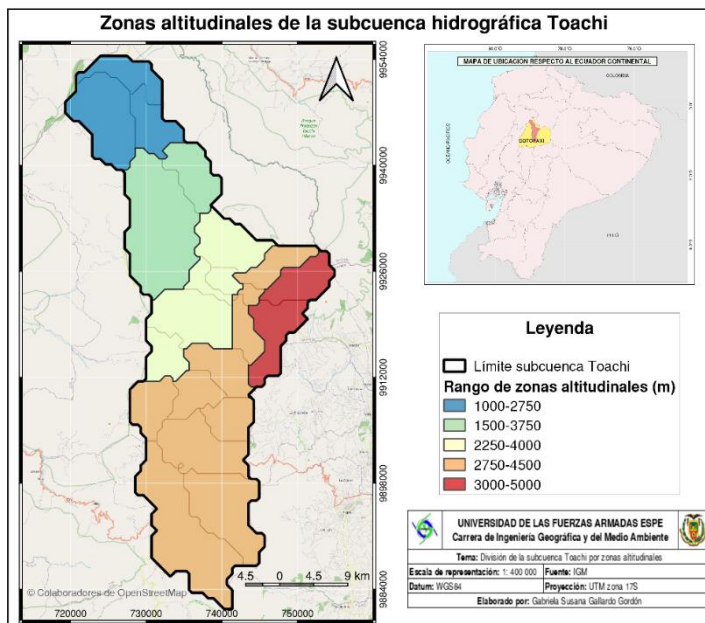


Figura 16

Mapa de zonas altitudinales de la subcuenca Toachi



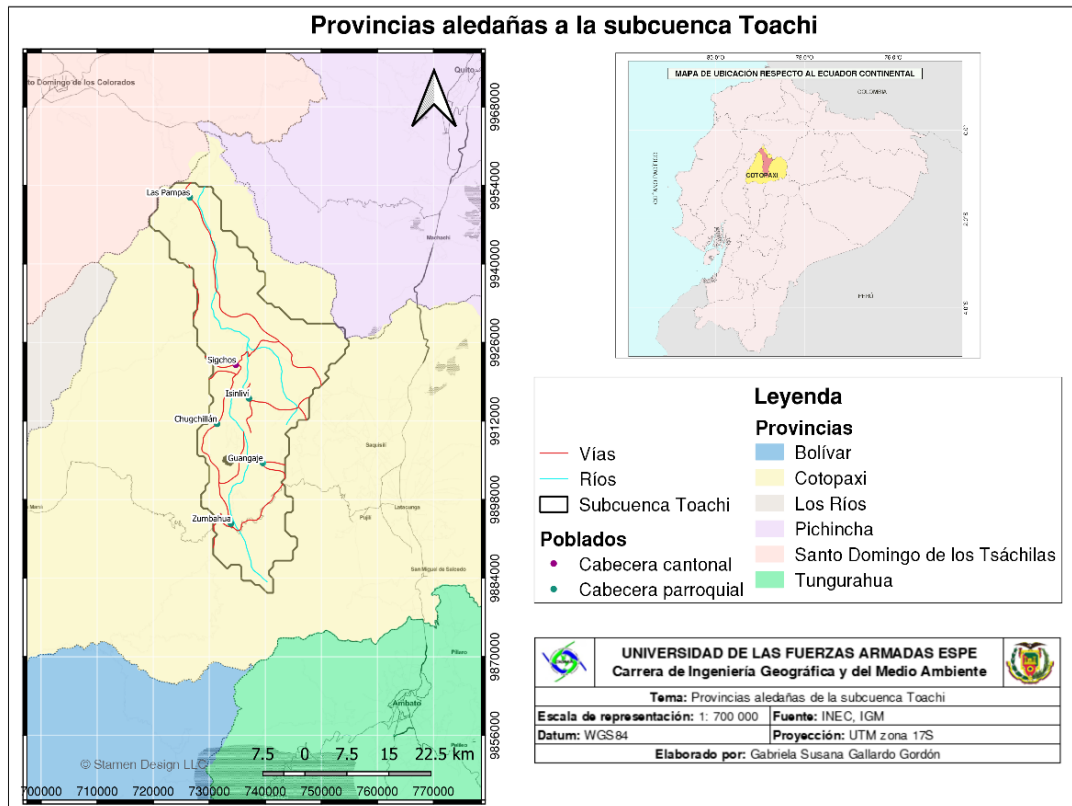
**Delimitación temporal del modelo.** El período de simulación del modelo se definió de 1990-2013, debido a que en estos años se encontró información hidrométrica disponible del área de estudio en los anuarios hidrológicos del INAMHI. Al ser estos datos indispensables para el proceso de calibración, determinaron la delimitación temporal del resto de información como la climática y de demanda hídrica. Además, el paso de tiempo del modelo fue mensual por las características de la herramienta WEAP.

### **Caracterización del área de estudio**

La subcuenca Toachi se encuentra mayormente en la provincia de Cotopaxi, y una mínima parte en las provincias de Santo Domingo de Los Tsáchilas y Pichincha, esto evidencia la falta de correspondencia entre los límites de una cuenca hidrográfica y la división político administrativa de un territorio. El insumo de la información política por provincias corresponde a la geodatabase del INEC; el mapa se visualiza en la Figura 17.

Figura 17

Mapa de la subcuenca Toachi respecto a provincias

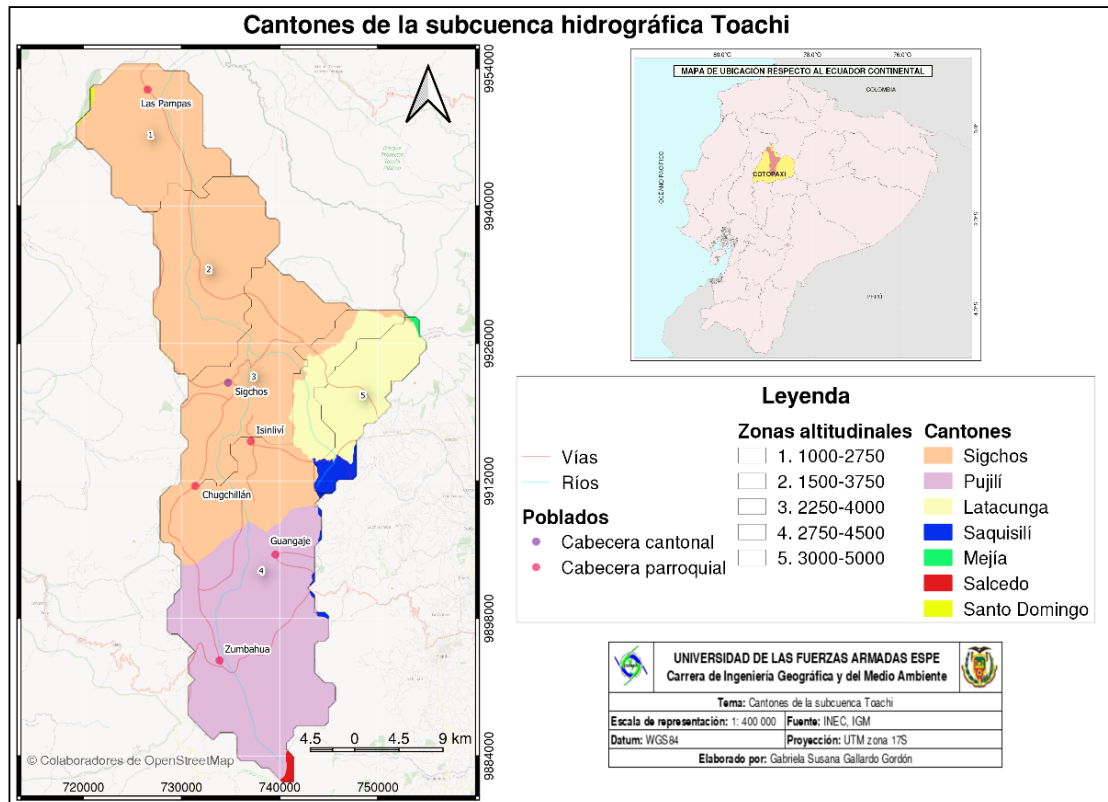


Respecto a los cantones ubicados dentro de la subcuenca hidrográfica Toachi, los tres que abarcan la mayor extensión son: Sigchos, que representa el 58,98% con un área de 638,23 km<sup>2</sup>; Pujilí, que representa el 27,89% con un área de 301,78 km<sup>2</sup> y Latacunga, que representa el 11,70% con un área de 126,65 km<sup>2</sup>. El insumo de la información política por cantones corresponde a la geodatabase del INEC; el mapa se visualiza en la Figura 18.



Figura 18

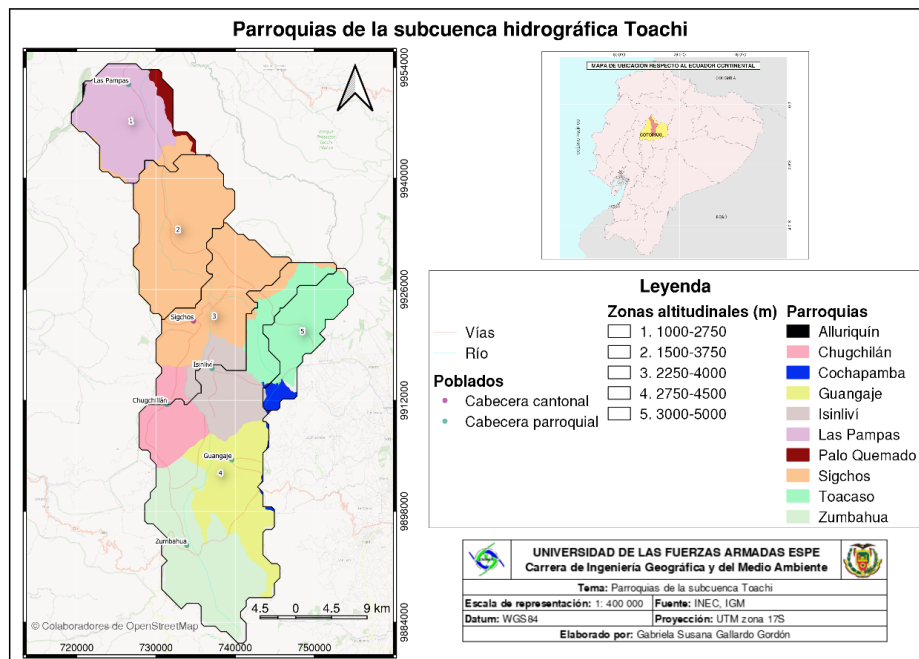
Mapa de la subcuenca Toachi respecto a cantones



En la subcuenca hidrográfica Toachi se encuentran diez parroquias representativas. El insumo de la información política por parroquias corresponde a la geodatabase del INEC; el mapa se visualiza en la Figura 19.

Figura 19

Mapa de la subcuenca Toachi respecto a parroquias

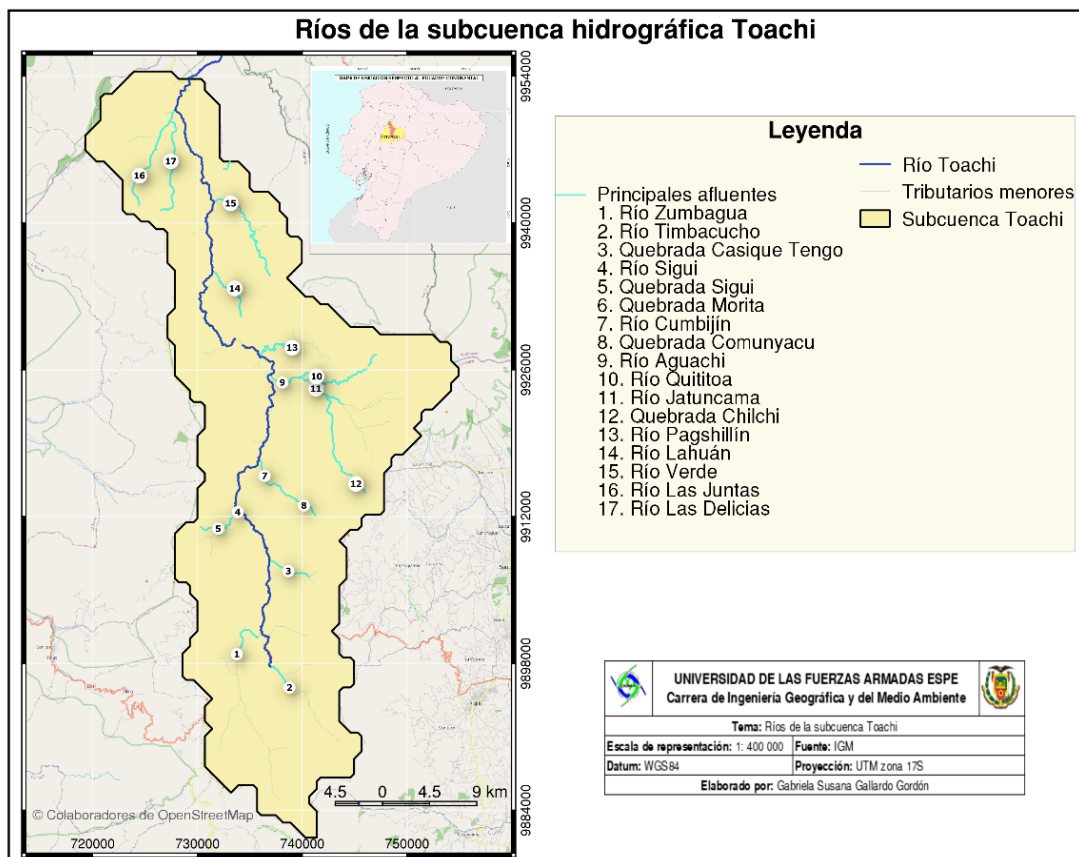


Respecto a la caracterización climática del área de estudio, el cantón Sigchos, que abarca principalmente la parte media y baja de la subcuenca Toachi, reporta una temperatura media anual de 15,8° C y una precipitación de 1.130,4 mm, variable que decrece a partir de mayo (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos, 2015). Respecto al cantón Pujilí, segundo con mayor área en la subcuenca, presenta una temporada seca de 6 meses, de junio a diciembre (Weather Spark, n.d.).

La red hídrica representativa de la subcuenca hidrográfica Toachi, se la obtuvo a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT) entregado por el Instituto Geográfico Militar (IGM). El software utilizado para este proceso fue "ArcGIS Pro 2.9", descargado con licencia gratuita a través de "Learn ArcGIS". El caudal medio anual del río Toachi, se determinó a partir de los datos disponibles de la estación hidrométrica H166, su valor fue 19,44 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 20, se visualiza la red hídrica.

Figura 20

Mapa de red hídrica de la subcuenca Toachi



**Caracterización morfométrica.** Este proceso se realizó a partir de los datos de área, perímetro y longitud de la cuenca de estudio, presentados en la Tabla 5, para luego determinar los parámetros de forma: coeficiente de compacidad (Índice de Gravelius), factor de forma de Horton y el coeficiente de circularidad (coeficiente de Miller); mismos que se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 5***Datos básicos de la subcuenca hidrográfica Toachi*

Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Longitud (km)
1081,33	211,59	72,8

**Tabla 6***Caracterización morfométrica de la subcuenca hidrográfica Toachi*

Parámetro	Valor	Forma
Índice de Gravelius (Kc)	1,82	Rectangular
Factor de forma de Horton (Ff)	0,20	Muy alargada
Coefficiente de Miller (Cc)	0,30	Semi rectangular

***Recopilación de datos***

**Datos climatológicos e hidrométricos.** En primera instancia se realizó un inventario de las estaciones activas en el área de estudio, meteorológicas para el clima e hidrométricas para el caudal del río Toachi, las mismas se presentan en la Figura 21 y se detallan sus características en las Tablas 7 y 8 respectivamente. Luego, se descargaron los anuarios meteorológicos e hidrológicos disponibles en el portal web del INAMHI, correspondientes a los años 1990-2013. Se identificaron en los anuarios las estaciones y variables de interés. Después, se transcribió la información a paso de tiempo mensual por variable a un archivo “csv” en Excel, de acuerdo al formato establecido por la herramienta WEAP para ingresar la información.

**Tabla 7***Estaciones meteorológicas activas del área de estudio*

Código	Nombre	Tipo
M363	Sigchos	Pluviómetrica (PV)
M362	Las Pampas	Pluviográfica (PG) Climatológica ordinaria (CO) (desde 2005)

*Nota:* Elaboración propia basado en (INAMHI, 2017a).

**Tabla 8***Estación hidrológica activa del área de estudio*

Código	Nombre	Tipo
H166	Toachi en Las Pampas	Limnigráfica (LG)

*Nota:* Elaboración propia basado en (INAMHI, 2015).



**Datos de demanda hídrica.** Estos datos se obtuvieron a través de la solicitud del Registro Único de Autorizaciones de Agua (RUAA) al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)-Subsecretaría de Recursos Hídricos-Dirección de Administración y Calidad de los Recursos Hídricos (DACRH).

Se depuró la información respecto al área de estudio y periodo de simulación. Por otro lado, se identificaron cuatro usos del recurso hídrico en la subcuenca Toachi: riego, consumo humano, acuicultura y abrevadero; cuyas concesiones se detallan en la Tabla 9. Además, en la Figura 23, se presenta un mapa de la distribución espacial del RUAA en el área de estudio.

**Tabla 9**

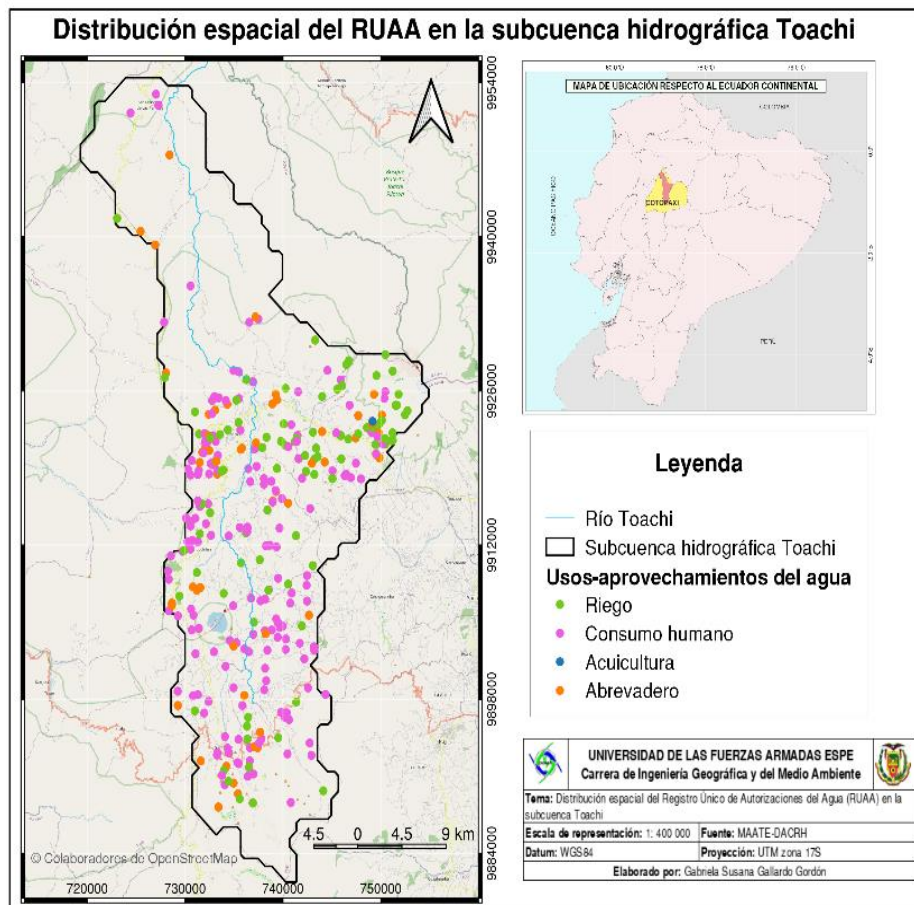
*Concesiones del RUAA en el área de estudio*

Uso-aprovechamiento	Caudal (l/s)	Porcentaje (%)
Riego	1689,26	93,54
Consumo humano	87,72	4,86
Acuicultura	21,70	1,20
Abrevadero	7,29	0,40

*Nota:* Elaboración propia basado en (MAATE et al., 2021).

Figura 23

Mapa de distribución espacial del RUAA en el área de estudio



*Nota:* Elaboración propia basado en (MAATE et al., 2021).

**Cobertura y uso de la tierra.** Esta información se la obtuvo mediante solicitud al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)-Dirección de Generación de Geo información Agropecuaria. Se escogió el “niv1” de clasificación para trabajar, debido a ser concreto y simplificado. Estas categorías se detallan en la Tabla 10 y se visualizan en la Figura 24.



Tabla 10

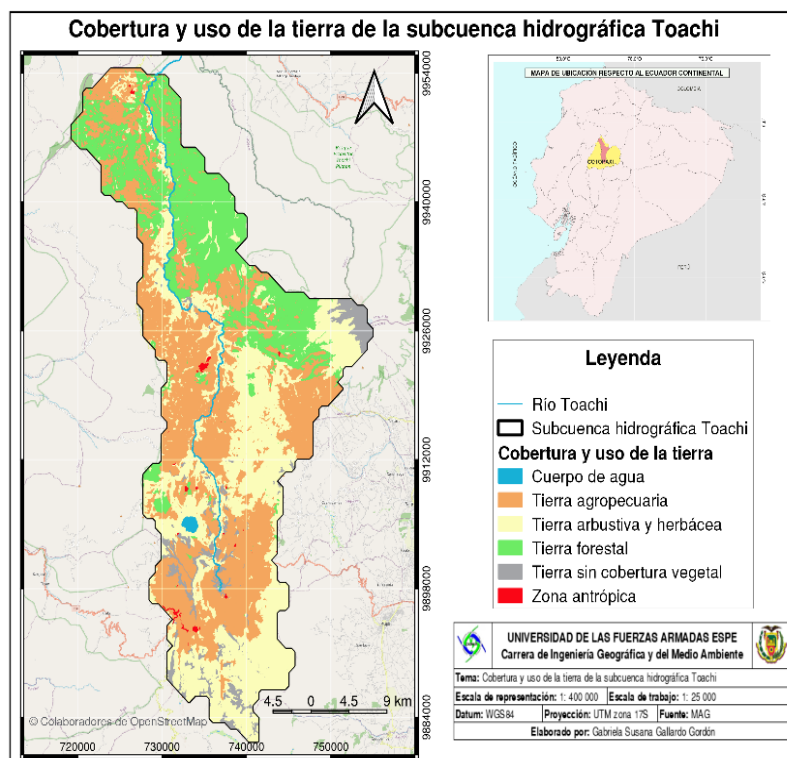
*Categorías de cobertura y uso de la tierra del área de estudio*

Categoría	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Cuerpo de agua	4,66	0,43
Tierra sin cobertura vegetal	45,37	4,20
Zona antrópica	2,81	0,26
Tierra agropecuaria	464,79	42,98
Tierra forestal	224,12	20,73
Tierra arbustiva y herbácea	339,58	31,40

*Nota:* Elaboración propia basado en (MAG, 2019).

Figura 24

*Mapa de cobertura y uso de la tierra del área de estudio*



*Nota:* Elaboración propia basado en (MAG, 2019).

### ***Generación de datos climatológicos en Google Earth Engine (GEE)***

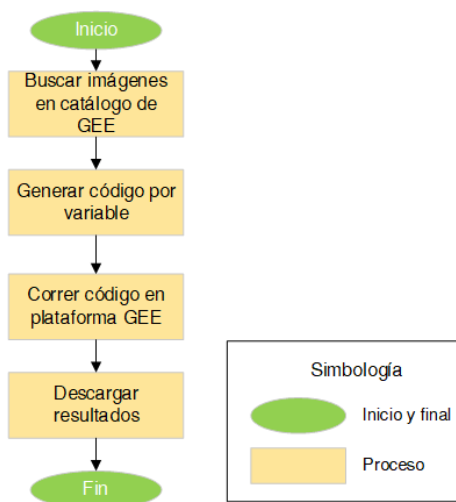
Este proceso se realizó debido a que la información climática disponible por el INAMHI no cubre, en su mayoría, los años del periodo de simulación; tampoco toda el área de estudio. Este problema se lo evidenció en el paso anterior.

En efecto, se generó la información de variables climáticas por zonas altitudinales (descritas en la Tabla 4) de 1990-2013, a través de la plataforma GEE. De esta manera se aseguró que los datos cubran el periodo de simulación y toda el área de estudio.

En primer lugar, se realizó una búsqueda de imágenes históricas en el catálogo público de datos de Earth Engine según: el periodo de simulación, variable meteorológica y área de estudio. Cada conjunto de datos provee un fragmento de código, mismos que se adaptaron y modificaron para los fines pertinentes. Éstos fueron corridos en el editor de código de GEE por variable y zona altitudinal, para finalmente descargar los resultados. En la Figura 25 se presenta un flujograma que engloba estos procesos.

**Figura 25**

*Flujograma de generación de datos climatológicos en GEE*



A continuación, se presentan los códigos utilizados para cada variable climática.

**Precipitación, temperatura y velocidad del viento.** En primera instancia, estas variables se descargaron de la colección de GEE “ERA5-Land Monthly Averaged - ECMWF Climate Reanalysis”, que cuenta con una resolución temporal mensual y una resolución espacial de aproximadamente 11 kilómetros (km).

En el caso de la temperatura se realizó una conversión de unidades de grados Kelvin (°K) a grados Celsius (°C), su código se presenta en la Figura 26. En cuanto a la variable viento, se descargó información de sus componentes este y norte, mismos que se combinaron para obtener la velocidad en m/s; su código se presenta en la Figura 27.

Respecto a la precipitación, se realizó una conversión de unidades de metros (m) a milímetros (mm), no obstante, se identificó una sobre estimación considerable en relación a los datos de las estaciones del INAMHI. Por consiguiente, esta variable se descargó de otra colección de GEE denominada “TerraClimate: Monthly Climate and Climatic Water Balance for Global Terrestrial Surfaces, University of Idaho”, que cuenta con una resolución temporal mensual y una resolución espacial de aproximadamente 4 km. En TerraClimate la unidad de medida de la precipitación es mm. En la Figura 28 se presenta el código utilizado.

Figura 26

Código para la variable temperatura

```

Imports (1 entry)
1 //Visualizar
2 Map.addLayer(table);
3 //Centrar la figura zoom
4 Map.centerObject(table,9);
5 var dataset = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
6     .filter(ee.Filter.date('1990-01-01', '2013-12-31'))
7     .filterBounds(table)
8     .select('temperature_2m')
9     .map(function(image){return image.clip(table)});
10 var Addtemperature_2m = function(temperature_2mKelvin){
11     var temperature_2mCelcius = temperature_2mKelvin.select('temperature_2m').subtract(273.15).rename('temperature_2mCelcius');
12     return temperature_2mKelvin.addBands(temperature_2mCelcius); };
13
14 var ERA5filtro = dataset.map(Addtemperature_2m);
15
16 var visualization = {
17     bands: ['temperature_2m'],
18     min: 250.0,
19     max: 320.0,
20     palette: [
21         "#000080", "#0000D9", "#4000FF", "#8000FF", "#0080FF", "#00FFFF",
22         "#00FF80", "#80FF00", "#DAFF00", "#FFFF00", "#FFF500", "#FFDA00",
23         "#FFB000", "#FFA400", "#FF4F00", "#FF2500", "#FF0A00", "#FF00FF",
24     ]
25 };
26
27 Map.setCenter(22.2, 21.2, 0);
28
29 Map.addLayer(dataset, visualization, "Air temperature [°C] at 2m height");
30 print(ui.Chart.image.series(ERA5filtro.select('temperature_2mCelcius'),table));

```

Nota: Adaptado de (Muñoz, 2019).

Figura 27

Código para componentes del viento

```

Imports (1 entry)
1 //Visualizar
2 Map.addLayer(table);
3 //Centrar la figura zoom
4 Map.centerObject(table,9);
5 // u_component_of_wind_10m
6 var era5_u_wind_10m = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
7     .filter(ee.Filter.date('1990-01-01', '2013-12-31'))
8     .filterBounds(table)
9     .select('u_component_of_wind_10m')
10    .map(function(image){return image.clip(table)});
11 // v_component_of_wind_10m
12 var era5_v_wind_10m = ee.ImageCollection("ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY")
13     .filter(ee.Filter.date('1990-01-01', '2013-12-31'))
14     .filterBounds(table)
15     .select('v_component_of_wind_10m')
16     .map(function(image){return image.clip(table)});
17
18 // Visualization palette for u- and v-component of 10m wind
19 var visWind = {
20     min: 0,
21     max: 30,
22     palette: [
23         'FFFFFF', '#FFF71', '#DEFF00', '#9EFF00', '#77B038', '#007E55', '#005F51',
24         '#004B51', '#013A7B', '#023AAD'
25     ]
26 };
27 // Add layer to map
28 Map.addLayer(era5_u_wind_10m.filter(ee.Filter.date('1990-01-01', '2013-12-31')), visWind,
29     'u_component_of_wind_10m');
30 Map.addLayer(era5_v_wind_10m.filter(ee.Filter.date('1990-01-01', '2013-12-31')), visWind,
31     'v_component_of_wind_10m');
32 print(ui.Chart.image.series(era5_u_wind_10m.select('u_component_of_wind_10m'),table));
33 print(ui.Chart.image.series(era5_v_wind_10m.select('v_component_of_wind_10m'),table));

```

Nota: Adaptado de (Muñoz, 2019).

Figura 28

Código para variable precipitación

```

Imports (1 entry)
1 //Visualizar
2 Map.addLayer(table);
3 //Centrar la figura zoom
4 Map.centerObject(table,9);
5
6
7 var PrecipitacionAcumulada = ee.ImageCollection("IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE")
8     .filter(ee.Filter.date('1990-01-01', '2013-12-31'))
9     .filterBounds(table)
10    .select('pr')
11    .map(function(image){return image.clip(table)});
12
13 // Representacion de las variables globales de TerraClimate
14 Map.addLayer (PrecipitacionAcumulada, {max: 0.0, min: 7245.0,
15 palette: ['1a3678', '2955bc', '5699ff', '8dbae9', 'acd1ff', 'caebff', 'e5f9ff', 'fdffb4',
16 'ffe6a2', 'ffc969', 'ffa12d', 'ff7c1f', 'ca531a', 'ff0000', 'ab0000']}, 'PrecipitacionAcumulada');
17 print(ui.Chart.image.series(PrecipitacionAcumulada.select('pr'),table));

```

Nota: Adaptado de (Abatzoglou et al., 2018)

**Fracción de nubosidad.** Se la descargó de la colección de GEE “NCEP-DOE Reanalysis 2 (Gaussian Grid), Total Cloud Coverage”, que cuenta con una resolución temporal diaria que se la transformó a mensual, y una resolución espacial de aproximadamente 278 km. La unidad de la variable se presenta en porcentaje, misma que se cambió a una escala de 0 a 1; siendo “0” ausencia de nubes y “1” totalmente nublado. Sin embargo, se debe considerar que la herramienta WEAP interpreta estos valores de manera contraria, por lo que se realizaron los cambios pertinentes. En la Figura 29 se presenta el código utilizado.

Figura 29

*Código para la variable fracción de nubosidad*

```

Imports (1 entry)
1 //Visualizar
2 Map.addLayer(table);
3 //Centrar la figura zoom
4 Map.centerObject(table,9);
5 var dataset = ee.ImageCollection('NOAA/NCEP_DOE_RE2/total_cloud_coverage')
6   .filter(ee.Filter.date('2010-01-01', '2010-12-31'))
7   .filterBounds(table)
8   .select('tcdc')
9   .map(function(image){return image.clip(table)});
10 var Addtcdc = function(tcdc_per){
11   var tcdc_01 = tcdc_per.select('tcdc').divide(100).rename('tcdc_01');
12   return tcdc_per.addBands(tcdc_01);
13   var NOAAfiltro = dataset.map(Addtcdc);
14
15   // Define visualization parameters.
16   var vis = {
17     min: 0,
18     max: 80, // dataset max is 100
19     palette: ['black', 'white'],
20   };
21   Map.addLayer(dataset,vis,"Fracción de nubosidad");
22   var chart = ui.Chart.image.series(
23     NOAAfiltro.select('tcdc_01'),table,
24     ee.Reducer.median(),100,'system:time_start'
25   ).setChartType('LineChart')
26   .setOptions({
27     title : 'Fracción de nubosidad',
28     vAxis : {title : 'FN'},
29     hAxis : {title : 'Dias'},
30     lineWidth : 2,
31     //pointSize : 1,
32     series : {
33       0 : {color : 'blue'}
34     }
35   });
36   print(chart);

```

*Nota:* Adaptado de (Kanamitsu et al., 2002).

### ***Procesamiento de datos***

Tras la generación de datos descrita en el paso anterior, se obtuvo un archivo por corrida en formato csv con la información correspondiente al periodo de simulación establecido, variable y zona altitudinal. Después, se agrupó en un solo archivo csv los datos descargados de las cinco zonas altitudinales por variable. Finalmente, se obtuvieron cuatro archivos csv correspondientes a: precipitación, temperatura, velocidad del viento y fracción de nubosidad; listos para ser ingresados a WEAP. Respecto a la variable humedad relativa, no se halló código para su generación y se mantuvo la información disponible por el INAMHI.

Además, se realizó la corrección de datos de precipitación respecto a los disponibles por las estaciones meteorológicas.

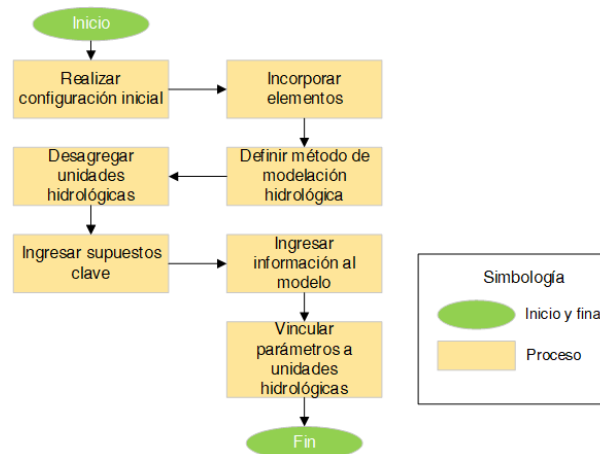
### ***Construcción del modelo en herramienta WEAP***

La página web <http://www.weap21.org/> ofrece libre descarga a la versión de evaluación de WEAP, misma que es totalmente funcional, con la única excepción de que la opción de

guardar datos no está habilitada. Por tal motivo, para el presente proyecto se realizó una solicitud de una licencia gratuita de WEAP, debido a que se cumple los requisitos establecidos para obtenerla. Éstos son pertenecer a una organización sin ánimo de lucro, gubernamental o académica con sede en un país en vía de desarrollo. La solicitud de la licencia fue aprobada, por lo tanto, se tuvo acceso a la licencia gratuita de la herramienta WEAP durante un año. En la Figura 30 se presenta un flujograma que engloba los procesos realizados durante la construcción del modelo en WEAP.

**Figura 30**

*Flujograma de construcción del modelo en WEAP*



*Nota:* Elaboración propia basado en (Stockholm Environment Institute, 2020b).

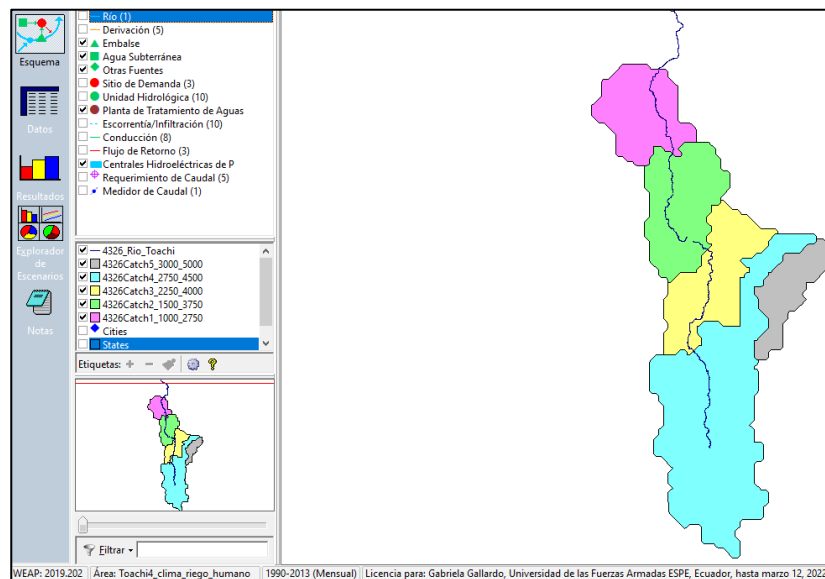
A continuación, se desglosa cada uno de los procesos.

**Configuración inicial.** En primera instancia, se estableció el idioma del programa WEAP a español. Se creó un área de trabajo y se definieron los límites del área de estudio. Después, se importaron las capas vector en formato shapefile de las cinco zonas altitudinales y del río Toachi; mismas que deben tener el sistema de referencia WGS84, correspondiente al código EPSG: 4326.

Además, se configuró el período de simulación del modelo de 1990 a 2013 y se definió un paso de tiempo mensual. En la Figura 31, se presentan las capas vector importadas a WEAP.

**Figura 31**

*Vista de capas vector importadas a WEAP*


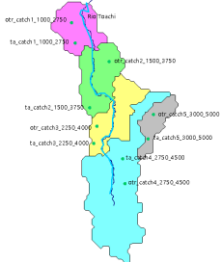
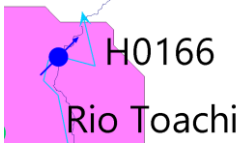
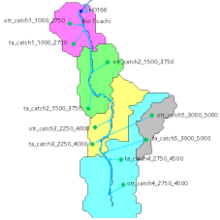



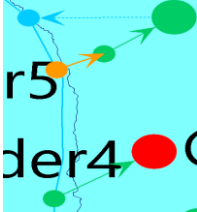
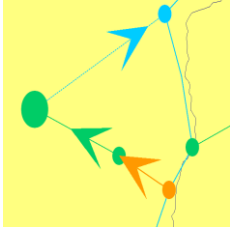
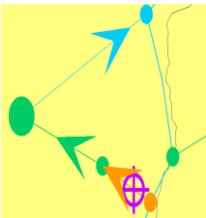
**Incorporación de elementos.** En la Tabla 11 se representan todos los elementos utilizados para la construcción del modelo.




Tabla 11

## Elementos incorporados al modelo hidrológico

Elemento	Cantidad	Descripción	Gráfico
Río	1	Trazado en dirección del flujo, aguas arriba a aguas abajo. Se le asignó el nombre de "Río Toachi".	
Unidad hidrológica	10	En cada zona altitudinal se agregaron dos unidades hidrológicas, una de tierra agropecuaria (ta) y otra para los demás usos del suelo (otr).	
Medidor de caudal	1	Ubicado en la parte baja de la cuenca. Se lo nombró "H0166".	
Vínculo escorrentía/infiltración	10	Conecta las unidades hidrológicas al "Río Toachi", se debe agregar en dirección del flujo.	

Elemento	Cantidad	Descripción	Gráfico
Sitio de demanda	3	Se agregaron para los usos de consumo humano, acuicultura y abrevadero.	
Conducción	8	Se agregaron desde el “Río Toachi” hacia los sitios de demanda para indicar suministro de agua. También, desde derivaciones hacia unidades hidrológicas de tierra agropecuaria.	
Derivación	5	Se agregaron desde el “Río Toachi” hacia las conducciones de las unidades hidrológicas de tierra agropecuaria.	
Requerimiento de caudal	5	Se agregaron sobre las derivaciones seguidas de una conducción hacia las unidades hidrológicas de tierra agropecuaria, para	

Elemento	Cantidad	Descripción	Gráfico
Flujo de retorno	3	<p>abastecer de agua a sus cultivos.</p> <p>Se agregaron como representación de los vertimientos de los sitios de demanda hacia el “Río Toachi”.</p>	 <p>The map shows a river (Río Toachi) flowing from left to right. Three red dots are placed along the riverbank, each with an arrow pointing towards the river. The dots are labeled 'Abrevadero' (top), 'Acuicultura' (middle), and 'Consumo_humano' (bottom). The background is a light blue color representing water, and the land is a light yellow color.</p>

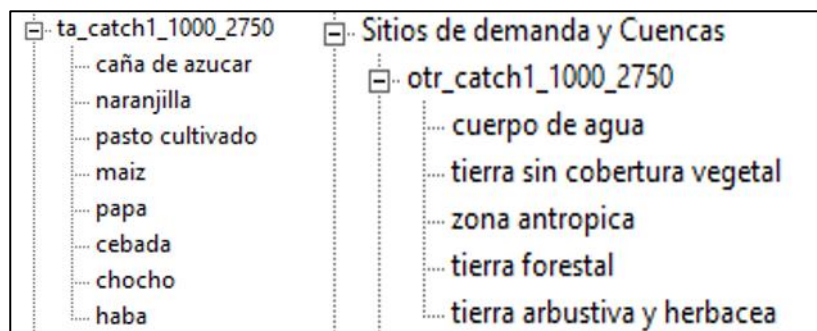
**Definición de método de modelación hidrológica.** En una unidad hidrológica se estableció el método denominado “Esguerrimiento de lluvia- método de la humedad del suelo”; una vez realizado el proceso se define automáticamente el mismo método para las demás unidades hidrológicas.

**Desagregación de unidades hidrológicas.** Primero, se definió la unidad de km<sup>2</sup> para el área de la unidad hidrológica, luego, se la dividió por tipo de cobertura de la tierra y por cultivos en el caso de tierra agropecuaria. Para terminar, se añadió la unidad porción a la subclasificación.

En primera instancia, este proceso se realizó manualmente en una unidad hidrológica; de esta manera, la estructura ya creada y vacía se transfirió al resto de unidades hidrológicas, a través de la opción copiar y pegar ramales. En la Figura 32 se visualizan los ramales de las unidades hidrológicas para tierra agropecuaria y demás usos del suelo. Se evitó el uso de mayúsculas y tildes para simplificar los demás procesos.

**Figura 32**

*Estructura de ramales de unidades hidrológicas*



*Nota:* En el ramal de la izquierda se presenta la desagregación de tierra agropecuaria, y en el de la derecha la de los otros usos.

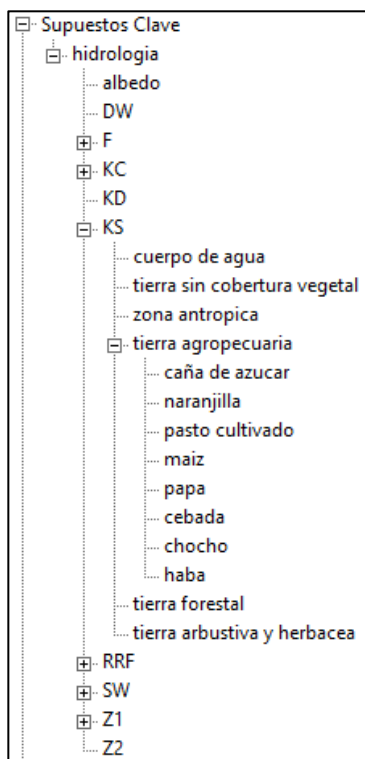
**Ingreso de supuestos clave.** Los supuestos clave se usaron para incorporar los nueve parámetros (descritos en la Tabla 2) del método de la humedad del suelo, que serán usados en el proceso de calibración del modelo.

Se trabajó en la “vista datos”, y dentro de supuestos clave se crearon los ramales de los nueve parámetros. Los seis correspondientes a la capa superior del suelo: dirección preferencial de flujo (F), coeficiente de cultivo (KC), conductividad de zona de raíces (KS), factor de resistencia a la escorrentía (RRF), capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (SW) y nivel de humedad en la zona de raíces (Z1); se desagregaron según la división de las unidades hidrológicas, descrita en el paso anterior. Por otro lado, los parámetros correspondientes a la capa inferior del suelo como: capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (DW), conductividad de zona profunda (KD) y nivel de humedad en la zona profunda (Z2); no fueron desagregados, puesto que, representan un valor único para toda la cuenca.

En la Figura 33, se visualizan los ramales creados en supuestos clave.

**Figura 33**

*Ramales creados en supuestos clave para parámetros de uso del suelo*



Los valores de los parámetros de uso de suelo se obtuvieron de manera inicial del modelo desarrollado por Proaño (2010), en la cuenca del río Guayllabamba, los mismos que se presentan en la Tabla 12 y Tabla 13. Por otra parte, los valores de KC de los cultivos de tierra agropecuaria se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 12**

*Valores iniciales de parámetros de la capa inferior del suelo*

Parámetro	Valor
DW	2.333 mm
KD	110 mm
Z2	35 %

*Nota:* Elaboración propia basado en (Proaño, 2010) & (Escobar et al., 2008).

**Tabla 13***Valores iniciales de parámetros de la capa superior del suelo*

Cobertura de suelo	F	KS (mm)	RRF	SW (mm)	Z1 (%)	KC
Cuerpo de agua	--	--	--	--	35	1
Tierra sin cobertura vegetal	1	150	1,6	250	35	1
Zona antrópica	1	150	2	600	35	1
Tierra forestal	1	150	5	750	35	1
Tierra arbustiva y herbácea	0,2	50	4,7	850	35	1
Tierra agropecuaria	0,2	50	4,7	850	35	1

*Nota:* Elaboración propia basado en (Proaño, 2010) & (Escobar et al., 2008).

**Tabla 14***Coefficientes de cultivo para desagregación de tierra agropecuaria*

Cultivos	KC
Caña de azúcar	0,80
Naranjilla	0,68
Pasto cultivado	0,70
Maíz	0,90
Papa	0,95
Cebada	0,70
Chocho	0,82
Haba	0,92

*Nota:* Elaboración propia basado en (FAO, 2006).

**Ingreso de información al modelo.** A continuación, se presentan los diferentes tipos de información ingresados.

**Área y distribución porcentual.** En primer lugar, se ingresó la información de área en km<sup>2</sup> de cada unidad hidrológica, también, los respectivos porcentajes de la desagregación definida. Este proceso se realizó a través de la opción de WEAP “exportar expresiones a Excel” e “importar expresiones desde Excel”.

En la Tabla 15 se presenta la información ingresada a las unidades hidrológicas de tierra agropecuaria, por otra parte, la correspondiente a los otros usos de suelo se visualiza en la Tabla 16.

**Tabla 15**

*Área y distribución porcentual de unidades hidrológicas de tierra agropecuaria*

Unidad hidrológica	Área km <sup>2</sup>	% caña de azúcar	% naranjilla	% pasto cultivado	% maíz	% papa	% cebada	% chocho	% haba
ta_catch1_1000_2750	69	7	0,1	92	0	0	0	0	0
ta_catch2_1500_3750	62	0,4	0	98	2	0,02	0	0	0
ta_catch3_2250_4000	93	0	0	91	8	1	0	0	0
ta_catch4_2750_4500	201	0	0	19	28	25	28	0,4	0,4

Unidad hidrológica	Área km <sup>2</sup>	% caña de azúcar	% naranjilla	% pasto cultivado	% maíz	% papa	% cebada	% chocho	% haba
ta_catch5_3000_5000	40	0	0	22	0	78	0	0	0

*Nota:* Elaboración propia basado en (MAG, 2019).

**Tabla 16**

*Área y distribución porcentual de unidades hidrológicas de otros usos de suelo*

Unidad hidrológica	Área (km <sup>2</sup> )	% Cuerpo de agua	% Tierra sin cobertura vegetal	% Zona antrópica	% Tierra forestal	% Tierra arbustiva y herbácea
otr_catch1_1000_2750	79,74	0,50	0,07	0,22	88,90	10,30
otr_catch2_1500_3750	123,61	0,48	0,73	0,02	64,66	34,11
otr_catch3_2250_4000	84,97	0,62	0,33	1,01	43,91	54,12
otr_catch4_2750_4500	279,61	1,12	12,67	0,61	9,36	76,24
otr_catch5_3000_5000	48,60	0,00	17,89	0,10	20,22	61,79

*Nota:* Elaboración propia basado en (MAG, 2019).



**Clima.** Se ingresó el clima a cada unidad hidrológica por zona altitudinal, a través de la función "asistente lectura desde archivo". En efecto, se importaron los archivos csv de: precipitación, temperatura, velocidad del viento, fracción de nubosidad y humedad relativa; mismos que se desarrollaron en los procesos previos de recopilación y generación de datos climáticos.

**Latitud.** Se generó en cada zona altitudinal, mediante el software QGIS. Se extrajeron las coordenadas del centroide de cada polígono, a través de la calculadora de campos de QGIS. En la Tabla 17 se muestran las latitudes.

**Tabla 17**

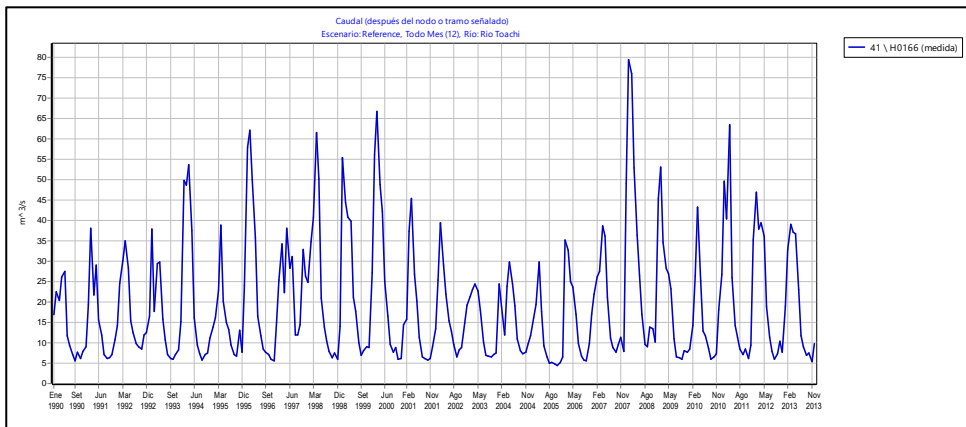
*Latitud por zona altitudinal*

Rango altitudinal (m)	Latitud (°)
1000-2750	-0,48
1500-3750	-0,60
2250-4000	-0,70
2750-4500	-0,88
3000-5000	-0,72

**Serie de caudales.** El archivo csv con la información hidrométrica del río Toachi se importó al elemento "medidor de caudal". En la Figura 34 se visualiza la serie de caudales correspondiente al período de simulación de 1990 a 2013, en la interfaz de WEAP.

**Figura 34**

*Serie de caudales del río Toachi graficados en WEAP*



*Nota:* Información hidrométrica tomada de (INAMHI, 2021).

**Requerimiento de caudal para cultivos.** El ingreso de esta información se realizó en los elementos de requerimiento de caudal, para cada unidad hidrológica de tierra agropecuaria por zona altitudinal. La Tabla 18 presenta los caudales de riego incorporados al modelo, obtenidos del RUAA.

**Tabla 18**

*Caudales de riego por zona altitudinal*

Unidad hidrológica	Caudal de riego (m <sup>3</sup> /s)
ta_catch1_1000_2750	0,001
ta_catch2_1500_3750	0,028
ta_catch3_2250_4000	0,114
ta_catch4_2750_4500	0,982
ta_catch5_3000_5000	0,544

*Nota:* Elaboración propia basado en (MAATE et al., 2021).

**Demanda hídrica.** Esta información se incorporó en los sitios de demanda del modelo, correspondientes a: consumo humano, abrevadero y acuicultura.

Respecto al consumo humano, el dato de población utilizado fue de 46.811 personas, mismo que se determinó del mapa de densidad poblacional elaborado a partir del censo de población y vivienda 2010 por IGM (2017).

La Tabla 19 presenta los valores de tasa anual de uso del agua, determinados a partir de la información del RUAA.

**Tabla 19**

*Tasa anual de uso del agua en la subcuenca Toachi*

Uso	Tasa anual de uso del agua (m <sup>3</sup> )
Consumo humano	58,27 m <sup>3</sup> /persona
Abrevadero	230.055
Acuicultura	684.331

*Nota:* Elaboración propia basado en (MAATE et al., 2021).

**Vinculación de parámetros de usos de suelo a unidades hidrológicas.** Es importante recordar que los valores de los parámetros de uso de suelo ya fueron importados durante el proceso "Ingreso de supuestos clave".

En el presente paso, se vincularon dichos parámetros a cada una de las unidades hidrológicas creadas, y a su respectiva desagregación. Este proceso se realizó a través de las herramientas de WEAP "exportar expresiones a Excel" e "importar expresiones desde Excel", que permitieron simplificar y agilizar este paso.

### Calibración

Este proceso se llevó a cabo a través de la herramienta "WEAP Calibration and Ensemble with R tool", desarrollada por Moncada (2020).

En primer lugar, se descargaron los programas "R" y "RStudio", además, la carpeta "WEAP\_Calibration\_and\_Ensamble\_with\_R\_Tool-master", proporcionada por Moncada (2020). En ésta, se detallan las instrucciones a seguir y se encuentran plantillas de documentos csv a ser utilizados en el proceso.

Los archivos se modificaron según el modelo a ser calibrado, luego, se ejecutó el código de la aplicación de Moncada (2020) en RStudio, se importaron los archivos a la herramienta y, tras realizarse las corridas necesarias se filtraron los resultados con las mejores medidas estadísticas.

El proceso de calibración se realizó con los parámetros de uso de suelo de las tres coberturas con mayor área en la subcuenca Toachi: tierra agropecuaria, tierra arbustiva y herbácea, y tierra forestal. De la Figura 35 a la Figura 37, se presentan los valores mínimos y máximos de los parámetros ingresados con su respectiva variación por cobertura de la tierra.

### Figura 35

*Parámetros de uso de suelo iniciales de tierra agropecuaria y toda la subcuenca*

	A	B	C	D
1	Keys	Min	Max	Variations
2	Key\hidrologia\DW	3000	5000	2
3	Key\hidrologia\KD	80	150	1
4	Key\hidrologia\Z2	20	35	1
5	Key\hidrologia\KC\tierra agropecuaria	0.1	0.5	2
6	Key\hidrologia\SW\tierra agropecuaria	500	1500	2
7	Key\hidrologia\RRF\tierra agropecuaria	0.2	3	2
8	Key\hidrologia\KS\tierra agropecuaria	70	150	2
9	Key\hidrologia\F\tierra agropecuaria	1	1	1
10	Key\hidrologia\Z1\tierra agropecuaria	20	35	1

**Figura 36**

*Parámetros de uso de suelo iniciales de tierra arbustiva y herbácea*

	A	B	C	D
1	Keys	Min	Max	Variations
2	Key\hidrologia\KC\tierra arbustiva y herbacea	0.1	1	2
3	Key\hidrologia\SW\tierra arbustiva y herbacea	500	2000	2
4	Key\hidrologia\RRF\tierra arbustiva y herbacea	0.2	5	2
5	Key\hidrologia\KS\tierra arbustiva y herbacea	50	200	2
6	Key\hidrologia\F\tierra arbustiva y herbacea	0.1	1	2
7	Key\hidrologia\Z1\tierra arbustiva y herbacea	20	35	2

**Figura 37**

*Parámetros de uso de suelo iniciales de tierra forestal*

A	B	C	D
Keys	Min	Max	Variations
Key\hidrologia\KC\tierra forestal	0.1	1	2
Key\hidrologia\SW\tierra forestal	500	3000	2
Key\hidrologia\RRF\tierra forestal	0.2	7	2
Key\hidrologia\KS\tierra forestal	50	200	2
Key\hidrologia\F\tierra forestal	0.1	1	2
Key\hidrologia\Z1\tierra forestal	10	35	2

En efecto, se realizaron 64 corridas para tierra forestal, en un tiempo aproximado de seis horas. Igualmente, para tierra arbustiva y herbácea. Con relación a tierra agropecuaria y parámetros con valores únicos para toda la subcuenca, se realizaron 32 corridas que tomaron aproximadamente cinco horas en ejecutarse.

Una vez obtenidos el set de parámetros que permitieron que los valores de caudales simulados se asemejan a los datos históricos de la manera más cercana posible, se determinaron las medidas estadísticas: NSE, Bias y RMSE para estimar la precisión del modelo. Las mejores medidas estadísticas se obtuvieron tras un proceso reiterativo de ajuste de parámetros de uso del suelo.

Los parámetros calibrados y las medidas estadísticas finales del modelo se presentan en la sección de resultados.

#### ***Uso del modelo para propuesta de manejo del recurso hídrico***

Se realizaron análisis anuales y mensuales del balance hídrico obtenido en la subcuenca Toachi, de esta manera, se identificó la disponibilidad hídrica en la subcuenca; con el fin de proponer las medidas necesarias que garanticen la provisión de agua, especialmente para consumo humano.

Además, se analizó la demanda hídrica a un paso de tiempo mensual y se la comparó con la oferta de agua en la subcuenca, con el objetivo de identificar los meses de déficit para los diferentes usos y aprovechamientos del recurso hídrico. Por otra parte, se determinó el caudal ecológico a ser mantenido mediante la metodología propuesta por Sandoval (2019).

## Capítulo 4

### Resultados

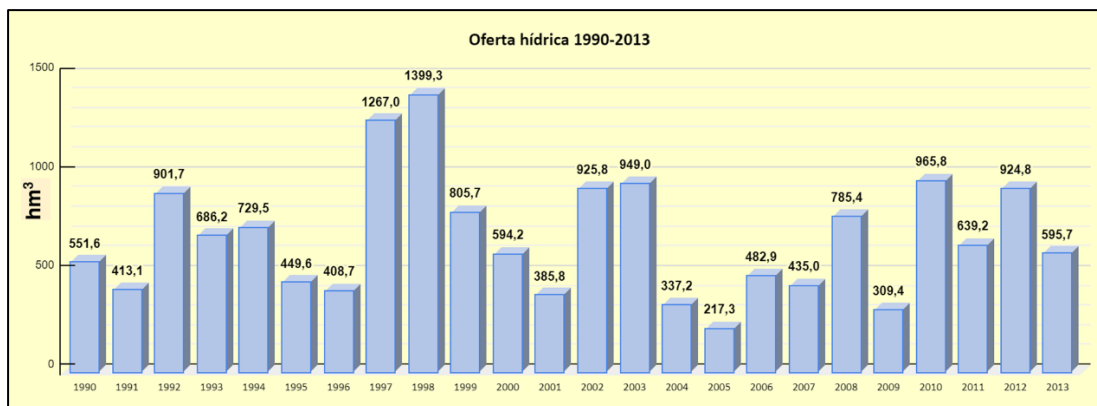
#### *Balance hídrico de la subcuenca del río Toachi*

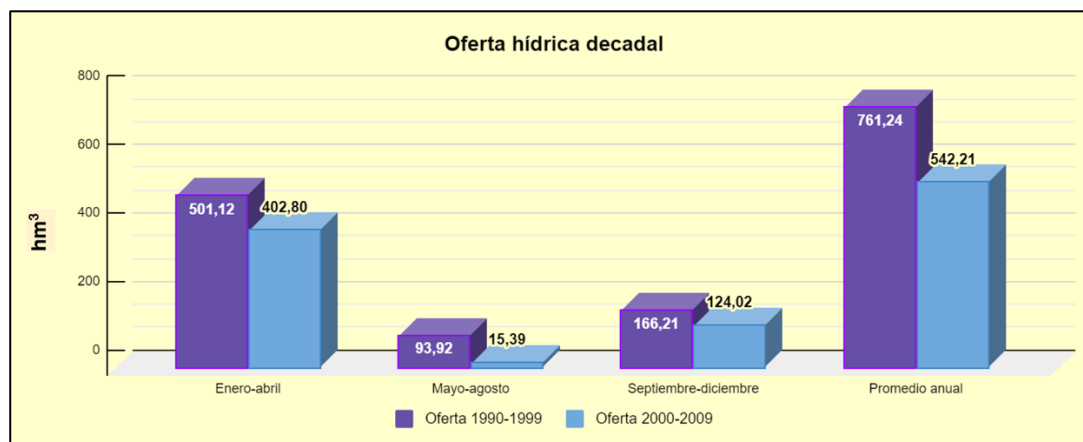
Respecto al análisis multianual de la oferta de agua, que se determinó mediante la diferencia entre los componentes precipitación y evapotranspiración, de 1990 a 2013; el año con mayor disponibilidad fue 1998 con 1.399,3 hm<sup>3</sup>. Por el contrario, el año que reportó menor oferta hídrica fue 2005 con 217,3 hm<sup>3</sup>. En la Figura 38 se observa la oferta de agua anual disponible durante el período de simulación.

En cuanto a la década de 1990 a 1999, se determinó una disponibilidad hídrica media anual de 761,24 hm<sup>3</sup>, mientras que, la década de 2000 a 2009 reportó una oferta media anual de 542,21 hm<sup>3</sup>. Igualmente, en la primera década la oferta hídrica en época lluviosa fue de 111,21 hm<sup>3</sup>/mes, mientras que en la segunda década fue de 86,68 hm<sup>3</sup>/mes. En la Tabla 20, se detalla la oferta de agua decadal y en la Tabla 21, la decadal por época. Asimismo, la Figura 39 permite visualizar la disponibilidad hídrica por década.

#### Figura 38

##### *Oferta de agua anual en la subcuenca Toachi*



**Figura 39***Oferta de agua por década en la subcuenca Toachi***Tabla 20***Oferta de agua por década en la subcuenca Toachi*

Cuatrimestre	Oferta (hm <sup>3</sup> ) 1990-1999	Oferta (hm <sup>3</sup> ) 2000-2009
Enero-abril	501,12	402,80
Mayo-agosto	93,92	15,39
Septiembre-diciembre	166,21	124,02
Promedio anual	761,24	542,21

**Tabla 21***Oferta de agua decadal por época en la subcuenca Toachi (1990-2013)*

Década	Oferta (hm <sup>3</sup> /mes) época lluviosa	Oferta (hm <sup>3</sup> /mes) época seca
	(diciembre-abril)	(mayo-noviembre)
1990-1999	111,21	29,32
2000-2009	86,68	15,54



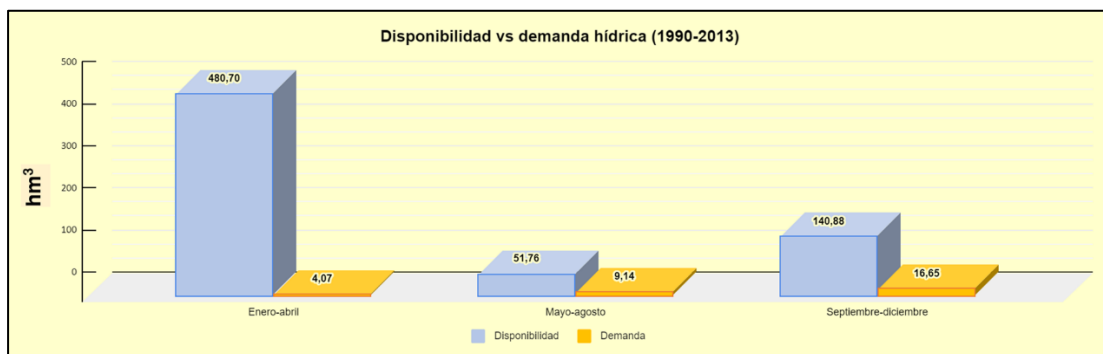
El balance hídrico, que representa la diferencia entre las entradas y salidas del sistema cuenca, se analizó a un paso de tiempo mensual, durante el período de simulación. En efecto, el mes que presentó mayor superávit fue febrero con  $48,79 \text{ hm}^3$ , en cambio, el mes que reportó mayores salidas que entradas al sistema fue agosto con  $-57,43 \text{ hm}^3$ . Además, los meses que indicaron que sale más agua de la que ingresa al sistema comprendieron de mayo a octubre. La Tabla 22 presenta la satisfacción de demanda por cuatrimestres, y la Tabla 23 el balance hídrico mensual de la subcuenca.

En la Figura 40, se visualizan la oferta y demanda de agua determinadas en la subcuenca Toachi. Por otro lado, el balance hídrico en época seca representó mayores salidas que entradas al sistema, con un valor de  $-28,58 \text{ hm}^3$ , al contrario, en la época lluviosa representó un superávit de  $31,48 \text{ hm}^3$ . En la Tabla 24 se visualizan estos resultados.

El uso del recurso hídrico que indicó mayor demanda fue el riego, siendo el mes de septiembre el que reportó mayor requerimiento de agua con  $5,60 \text{ hm}^3$ . En cambio, el mes que reportó el menor requerimiento de demanda hídrica para riego fue febrero con  $0,36 \text{ hm}^3$ . En la Figura 41 se presenta la demanda de agua mensual por usos en la subcuenca Toachi.

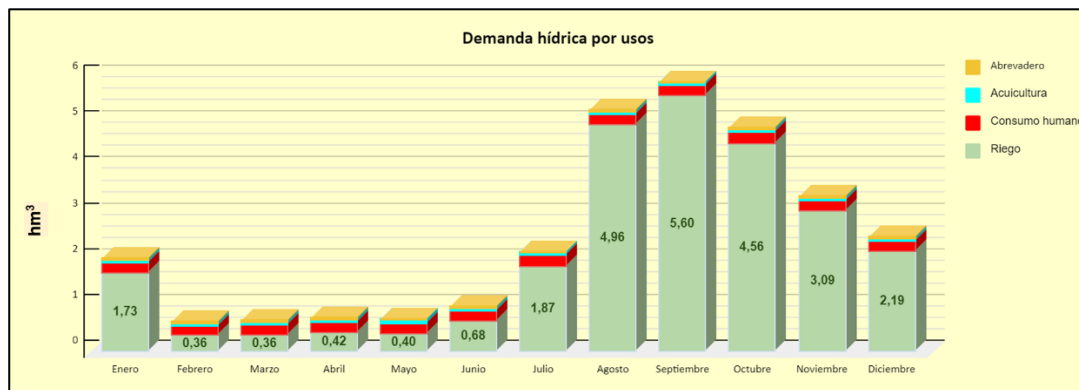
### Figura 40

#### *Oferta vs demanda hídrica en la subcuenca Toachi*



**Figura 41**

*Demanda hídrica mensual por usos en la subcuenca Toachi*

**Tabla 22**

*Verificación de satisfacción de demanda en la subcuenca Toachi (1990-2013)*

Cuatrimestre	Oferta (hm <sup>3</sup> ) (precipitación- evapotranspiración)	Demanda (hm <sup>3</sup> )	Oferta- demanda (hm <sup>3</sup> )	Satisfacción de demanda
Enero-abril	480,70	4,07	476,63	Sí
Mayo- agosto	51,76	9,14	42,62	Sí
Septiembre- diciembre	140,88	16,65	124,23	Sí

**Tabla 23**

*Balace hídrico mensual en la subcuenca Toachi (1990-2013)*

Mes	Balace hídrico (hm <sup>3</sup> )
Enero	24,74
Febrero	48,79

Mes	Balance hídrico (hm <sup>3</sup> )
Marzo	37,53
Abril	44,59
Mayo	-11,46
Junio	-48,11
Julio	-47,15
Agosto	-57,43
Septiembre	-38,74
Octubre	-7,86
Noviembre	10,67
Diciembre	1,77

**Tabla 24**

*Balance hídrico por época seca y lluviosa en la subcuenca Toachi*

Época	Balance hídrico (hm <sup>3</sup> /mes)
Seca (mayo-noviembre)	-28,58
Lluviosa (diciembre-abril)	31,48

#### ***Modelo calibrado del balance hídrico***

En cuanto a la calibración del modelo y su exactitud, la Tabla 24 presenta los parámetros calibrados de la capa inferior del suelo y la Tabla 25 los de la capa superior. Asimismo, la Tabla

26 muestra las medidas estadísticas definitivas del modelo hidrológico, determinadas de 1991-2013, debido a que 1990 se consideró como el año de calentamiento del modelo. El NSE fue de 0,42, que según Molnar (2011) indica un buen ajuste. El bias fue de 1,33%, que indica una sobre estimación de los caudales simulados respecto a los observados, no obstante, el valor corresponde al rango de un buen ajuste. Por otro lado, se obtuvo un RMSE de 11,32%. La Figura 42 representa el esquema final del modelo en WEAP. En la Figura 43 se visualizan los caudales simulados por WEAP y los medidos por la estación H0166.

**Tabla 25**

*Valores calibrados de parámetros de la capa inferior del suelo*

Parámetro	Valor
DW	5.000 mm
KD	80 mm
Z2	20 %

**Tabla 26**

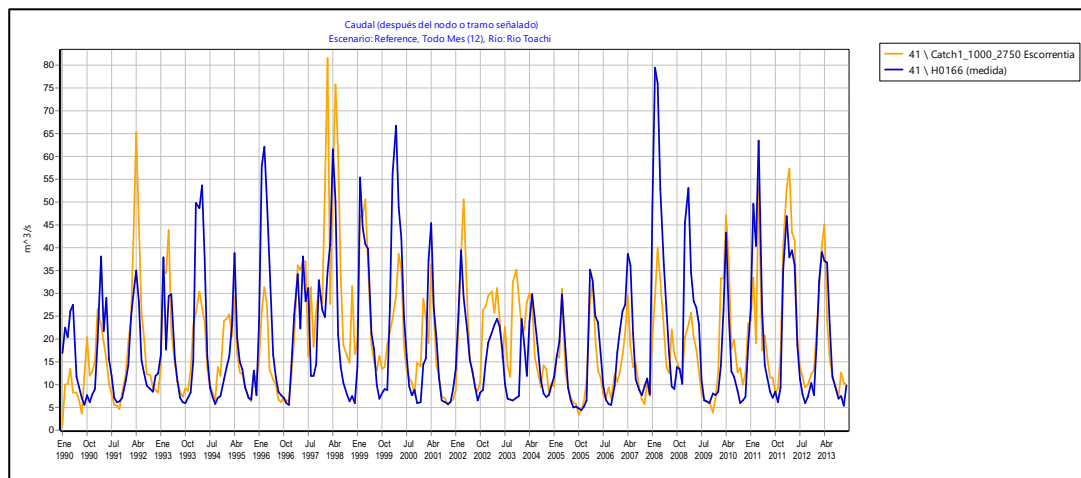
*Valores calibrados de parámetros de la capa superior del suelo*

Cobertura de suelo	F	KS (mm)	RRF	SW (mm)	Z1 (%)	KC
Cuerpo de agua	1	10	0,1	10	35	1
Tierra sin cobertura vegetal	1	150	7	250	35	1
Zona antrópica	1	150	0,1	600	35	1
Tierra forestal	1	50	7	500	50	0,1
Tierra arbustiva y herbácea	0,1	200	7	2.000	50	1



Figura 43

Caudales simulados por WEAP y los medidos por la estación H0166



## Capítulo 5

### Propuesta de manejo del recurso hídrico en la subcuenca del río Toachi

De acuerdo a los hallazgos obtenidos en el presente estudio, se proponen los siguientes programas descritos a continuación:

#### ***Programa de manejo sustentable***

**Introducción.** El balance hídrico mensual de la subcuenca Toachi obtenido del modelo en WEAP, indicó que los meses en los que sale más agua de la que ingresa al sistema comprendieron de mayo a octubre, en efecto, se propone la construcción de obras de retención para disponibilidad hídrica futura. Por otro lado, el riego representa el uso que mayor suministro de agua requiere, sobre todo en septiembre, mes correspondiente a época seca, con 5,60 hm<sup>3</sup>. Por tanto, se propone realizar un almacenamiento temporal del agua a través de albardas en las zonas agrícolas para uso en los periodos secos. Se recomienda aplicar esta medida durante los meses de época lluviosa, especialmente, en el mes de febrero que reportó el mayor superávit con 48,79 hm<sup>3</sup>.

En la Tabla 28, se detalla el contenido del programa.

Tabla 28

## Programa de manejo sustentable

Programa de manejo sustentable		
<b>Objetivo:</b> Promover la gestión sustentable del recurso hídrico mediante la implementación de medidas de manejo en la subcuenca hidrográfica Toachi.		
Proyectos	Acciones	Responsables
Construcción de albarradas.	Realizar un estudio técnico que contemple criterios ambientales, de diseño, construcción, implementación y mantenimiento de albarradas.	GAD provincial de Cotopaxi en articulación con los GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.
	Construir albarradas para almacenamiento de agua, y garantizar su aprovisionamiento en época seca para riego.	GAD provincial de Cotopaxi en articulación con los GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.
	Mantener el caudal ecológico en la parte baja de la subcuenca de 7,51 m <sup>3</sup> /s, y determinar su valor en afluentes considerados para la construcción de albarradas.	GAD provincial de Cotopaxi en articulación con los GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.
Construcción de obras de retención	Realizar un estudio de identificación de áreas prioritarias para la construcción de obras de retención de agua, que garantizarán la disponibilidad hídrica futura.	GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.



<b>Programa de manejo sustentable</b>		
	Construir obras de retención como zanjas de infiltración o represas	GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.
	Instalar sistemas de tratamiento de agua como filtros artesanales y trampas de grasa en zonas agrícolas.	GAD provincial de Cotopaxi en articulación con los GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.
Tratamiento de aguas residuales.	Identificar áreas óptimas para la construcción de plantas de tratamiento.	Juntas de agua, GAD provincial de Cotopaxi en articulación con los GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.

***Programa de uso de tecnologías de riego***

**Introducción.** En base a la información del RUAA, proporcionado por MAATE et al., (2021), se determinó que el 62% de las concesiones de agua para riego en la subcuenca Toachi durante el periodo 1990-2013 aplican el riego por gravedad, mientras que el 38% emplean el riego por aspersión. En efecto, se recomienda implementar tecnología de riego por aspersión o por goteo, para favorecer la llegada del agua a todos los cultivos. Por tanto, al promover la eficiencia del agua de riego, se puede usar el resto del recurso hídrico para cubrir otras necesidades, especialmente en época seca. En la Tabla 29, se detalla el contenido del programa.

Tabla 29

*Programa de uso de tecnologías de riego*

<b>Programa de uso de tecnologías de riego</b>		
<b>Objetivo:</b> Aplicar riego tecnificado en las zonas de cultivo, para promover el uso eficiente del recurso hídrico y garantizar la soberanía alimentaria.		
<b>Proyectos</b>	<b>Acciones</b>	<b>Responsables</b>
Riego tecnificado.	Adquirir tecnología de sistemas de riego tecnificados, como goteo o aspersión, para reemplazar los sistemas por gravedad.	Juntas de riego y drenaje, usuarios del riego, hacendados y agricultores.
	Mantener en buen estado los dispositivos empleados para riego por aspersión o goteo, y así garantizar el funcionamiento del sistema.	Juntas de riego y drenaje, usuarios del riego, hacendados y agricultores.
	Preservar el caudal ecológico de 7,51 m <sup>3</sup> /s, en la parte baja de la subcuenca del río Toachi; y determinar su respectivo valor en demás afluentes donde se capta el agua para riego.	Juntas de riego y drenaje, GADs municipales.

***Programa de educación ambiental***

**Introducción.** Los territorios que se encuentran en la subcuenca Toachi presentan problemas ambientales. Según Cadena & Rivera (2014), en el cantón Pujilí se vierten aguas residuales a quebradas y ríos sin ningún control, siendo las principales fuentes de contaminación las actividades industrial, agrícola y alfarera. Además, la transformación de cobertura vegetal natural de bosques y páramos ha ocasionado la disminución de agua dulce disponible. Por otro lado, según el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos (2015), el territorio presenta disminución de caudales a raíz de la deforestación y cambio de uso de suelo de actividades agropecuarias y pastizales en bosques. En efecto, se propone aplicar el siguiente programa de educación ambiental, mismo que se detalla en la Tabla 30.

Tabla 30

*Programa de educación ambiental*

<b>Programa de educación ambiental</b>		
<b>Objetivo:</b> Impartir programa de educación ambiental a todos los actores de la subcuenca Toachi como: ciudadanía, ganaderos, agricultores y comunidades locales; con el fin de concientizar y lograr una comprensión del medio ambiente, especialmente del recurso hídrico.		
<b>Proyectos</b>	<b>Acciones</b>	<b>Responsables</b>
Consumo doméstico de agua eficiente.	Impartir charlas sobre hábitos de uso de agua que favorezcan la reducción del consumo en el hogar, destinado a toda la población, desde niños hasta adultos mayores.	MAATE y GADs Municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.
Uso eficiente de agua de riego.	Realizar talleres de capacitación respecto al diseño, operación y mantenimiento de sistemas de riego tecnificados.	MAATE y GADs Municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.

***Programa de monitoreo de caudales***

**Introducción.** El análisis decadal registró un descenso de la disponibilidad de agua en la época lluviosa, siendo en la primera década 111,21 hm<sup>3</sup>, y en la segunda 86,68 hm<sup>3</sup>. En efecto, se recomienda, especialmente al GAD Municipal de Sigchos, tomar las medidas necesarias en el presente para garantizar la seguridad hídrica de la población; manteniendo al mismo tiempo un caudal ecológico mínimo de 7,51 m<sup>3</sup>/s en la parte baja de la cuenca para asegurar la preservación de flora y fauna. En efecto, se plantea un programa de monitoreo de caudales, que se detalla en la Tabla 31.

Tabla 31

*Programa de monitoreo de caudales*

<b>Programa de monitoreo de caudales</b>		
<b>Objetivo:</b> Monitorear caudales de ríos mediante la instalación de estaciones hidrométricas, para determinar el caudal ecológico y realizar proyecciones que contribuyan a la toma de decisiones.		
<b>Proyectos</b>	<b>Acciones</b>	<b>Responsables</b>
	Instalar estaciones hidrométricas en el río principal Toachi, y en los principales afluentes de la subcuenca: río Zumbagua, río Cumbijín, río Aguachi, río Lahuán y río Las Juntas.	GADs municipales de Sigchos, Pujilí e INAMHI.
	Monitorear los caudales de los ríos: Toachi, Zumbagua, Cumbijín, Aguachi, Lahuán y río Las Juntas; a un paso de tiempo mensual.	GADs municipales de Sigchos, Pujilí e INAMHI.
Registro de información hidrométrica	Realizar un mantenimiento operacional de las estaciones hidrométricas instaladas, cada seis meses.	GADs municipales de Sigchos, Pujilí e INAMHI.
	Determinar el caudal ecológico de los afluentes principales de la subcuenca con la información hidrométrica registrada, para su aplicación en proyectos específicos.	GADs municipales de Sigchos, Pujilí.
	Realizar proyecciones con la información hidrométrica registrada para la toma de decisiones pertinentes.	GADs municipales de Sigchos, Pujili.

***Programa de difusión de la herramienta WEAP***

**Introducción.** La página web <http://www.weap21.org/> permite libre descarga a la versión de evaluación de WEAP, misma que es totalmente funcional, con la única excepción de que la opción de guardar datos no está habilitada. No obstante, el Stockholm Environment Institute (SEI), ofrece una licencia gratuita por un año, a empleados o estudiantes que pertenecen a una organización sin ánimo de lucro, gubernamental o académica con sede en un país en vía de desarrollo. En efecto, se propone difundir el uso de la herramienta WEAP como apoyo a los tomadores de decisiones; el programa se detalla en la Tabla 32.



Tabla 32

*Programa de difusión de la herramienta WEAP*

<b>Programa de difusión de la herramienta WEAP</b>		
<b>Objetivo:</b> Promover el uso de la herramienta “Water Evaluation and Planning” (WEAP), a través de campañas de difusión en instituciones educativas y GADs municipales, con el fin de apoyar la educación ambiental y a los tomadores de decisiones en la gestión del recurso hídrico.		
<b>Proyectos</b>	<b>Acciones</b>	<b>Responsables</b>
WEAP al alcance de todos.	Adquirir los medios tecnológicos necesarios, como computadores, en las instituciones educativas.	GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga en articulación con planteles educativos.
	Realizar capacitaciones sobre el uso de la herramienta WEAP, a los docentes de las instituciones educativas y servidores públicos de los GADs, a través de guías y tutoriales disponibles libremente en internet.	GADs municipales de Sigchos, Pujilí y Latacunga.

## Capítulo 6

### Conclusiones

En esta tesis se realizó la modelación del balance hídrico en la subcuenca del río Toachi, mediante la herramienta WEAP, para proponer medidas de manejo del recurso agua. Lo más importante del proceso de modelación fue contar con información climática, porque de ésta dependen los principales componentes del balance hídrico. Lo que más ayudó a realizar el modelo fueron las imágenes históricas del catálogo público de GEE, pues disponían de la mayoría de variables climáticas necesarias como: precipitación, temperatura, velocidad del viento y fracción de nubosidad; y abarcaron la cobertura temporal del modelo (1990-2013) y toda el área de estudio. Lo más difícil de la modelación fue generar los códigos de la información climática, porque requirió la búsqueda de las variables meteorológicas en diferentes imágenes históricas, conversión de unidades de medida y obtención de resultados en formato csv. Además, no se esperaba que la información de los anuarios meteorológicos presentara faltantes.

En este trabajo se delimitó la subcuenca hidrográfica del río Toachi y sus microcuencas, para definir la unidad básica de modelación y realizar una caracterización morfométrica del área de estudio. En efecto, según la Tabla 6, la subcuenca hidrográfica Toachi, presenta una caracterización morfométrica rectangular alargada. Lo más importante de la delimitación de la subcuenca fue contar con el producto cartográfico MDT del área de interés, porque es el insumo principal del proceso. Por otro lado, lo que más contribuyó a delimitar la subcuenca fue el uso del software GRASS integrado a QGIS, al ser una aplicación libre y de código abierto. Además, la mayor dificultad durante el proceso de delimitación, fue la obtención del insumo cartográfico, porque requirió varios procesos administrativos y la espera de aproximadamente un mes hasta recibirlo por parte de la institución a la cual se realizó la solicitud.

También, en esta tesis se recopiló y procesó los datos requeridos de clima, uso de suelo, demanda hídrica e información hidrométrica para la construcción del modelo en la herramienta WEAP. Lo más importante del proceso de recopilación fue identificar puntualmente la información requerida para el modelo, de modo que se evite malgastar el recurso tiempo al solicitar datos innecesarios. Respecto al procesamiento de datos, lo más relevante fue estandarizar las unidades de las variables climáticas y adecuar la información al formato requerido para ser importada al programa WEAP. Lo que más ayudó al proceso de recopilación fue un pronto acercamiento a las instituciones custodias de la información, esto permitió reconocer la necesidad de generar información climática a partir de imágenes históricas, puesto que, no fue suficiente la información disponible en los anuarios meteorológicos del INAMHI. Al mismo tiempo, un aspecto complicado en el proceso de recopilación fue la identificación de instituciones que contaran con datos de demanda hídrica acordes al periodo de simulación del modelo, porque varias se crearon en años recientes y no contaban con información desde 1990. Además, tras la identificación del MAATE como institución custodia de dicha información, otro aspecto complejo fue la espera de tres semanas para recibir los datos.

Igualmente, en el presente estudio se calibró el modelo mediante el ajuste de parámetros de uso de suelo, para conocer su exactitud. Lo más importante de este proceso fue contar con información hidrométrica de la estación Toachi en Las Pampas (H166), de modo que se pudo comparar los caudales simulados con los medidos por la estación, a través del cálculo de las medidas estadísticas NSE, bias y RMSE. Lo más relevante de dicho cálculo, fue obtener un valor aceptable del NSE que fue de 0,42, pues es una de las medidas más representativas en la calibración de modelos hidrológicos. Por otra parte, la herramienta “WEAP Calibration and Ensemble with R Tool”, desarrollada por Moncada (2020), representó una ayuda clave, porque facilitó un proceso de calibración automática, no obstante, requirió horas de ejecución en las

tres coberturas con mayor área en la subcuenca: tierra agropecuaria, tierra arbustiva y herbácea y tierra forestal. Además, hallar valores de parámetros de uso de suelo iniciales, representó la parte más difícil de este proceso, pues no se contó con bibliografía que brinde estos datos conforme a las características particulares de la subcuenca; en consecuencia, se utilizaron en su mayoría como parámetros iniciales los valores promedio obtenidos por Proaño (2010), en su estudio de la cuenca Guayllabamba.

Finalmente, en este trabajo se realizó una propuesta de manejo del recurso hídrico con los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la herramienta WEAP. Lo más importante de la realización de la propuesta fue contar con el modelo calibrado del balance hídrico y sus respectivos valores de oferta y demanda, pues brindaron un panorama general de la cantidad de agua disponible en la subcuenca del río Toachi durante el periodo de simulación. Los análisis anuales, mensuales, decadales y por época, fueron clave para proponer medidas de manejo del recurso, siendo el más relevante el análisis decadal, porque permitió identificar una realidad distinta de la ya conocida climáticamente; mostrando una tendencia de disminución del recurso hídrico cada diez años. Se propusieron cinco programas con sus respectivos proyectos y acciones.

Por otro lado, el análisis de oferta versus demanda hídrica, presentado en la Figura 40, indicó que la subcuenca Toachi sí dispone de suficiente agua para suplir las demandas. Por tanto, esto puede indicar que los problemas relacionados con el recurso hídrico tienden a ser causados principalmente por su mala distribución y falta de infraestructura para acceder al mismo. En efecto, el año con mayor disponibilidad fue 1998 con  $1.399,3 \text{ hm}^3$ , y el que reportó menor oferta hídrica fue 2005 con  $217,3 \text{ hm}^3$ . Además, los valores del balance hídrico de mayo a octubre, presentados en la tabla 23, indican principalmente que sale más agua de la que entra al

sistema, por lo que se propuso construir obras de retención, en el Programa de manejo sustentable, para garantizar la disponibilidad hídrica a futuro.

Otro aspecto de gran utilidad para la elaboración de la propuesta, fue la determinación del caudal ecológico de 7,51 m<sup>3</sup>/s con los datos de la estación hidrométrica H166, que se deben garantizar ante cualquier proyecto o política a aplicar. Asimismo, fue de gran relevancia la estadística determinada a partir del RUAA, de que el 62% de las concesiones de agua para riego, uso de mayor demanda hídrica, emplean la técnica por gravedad; pues permitió proponer la aplicación de tecnología de irrigación por aspersión y goteo.

### **Recomendaciones**

En el presente estudio se utilizó la información de uso y cobertura de la tierra, la misma se asumió como la configuración del territorio desde el inicio hasta el final de la simulación. En efecto, se recomienda realizar una evolución de los usos del suelo como mejora al modelo hidrológico.

Además, el modelo hidrológico realizado en esta investigación fue caracterizado principalmente por el tipo de cobertura y uso de la tierra. Para mejorar la simulación de la realidad de la subcuenca de estudio, se recomienda añadir a la caracterización del área información edafológica de textura del suelo; que influye también en la definición de parámetros iniciales de uso de suelo a ser calibrados.

Se recomienda realizar la evaluación de escenarios futuros en WEAP, especialmente de clima, para describir con mayor detalle las predicciones de disponibilidad de agua en el área de estudio y las medidas de manejo a tomar. Es importante considerar que para esto se requiere contar con información de proyecciones de modelos climáticos.

Por otro lado, se recomienda complementar esta investigación con un estudio hidrogeológico, para cuantificar el volumen de agua almacenado en acuíferos y caracterizar las aguas subterráneas. De este modo, se puede mejorar el modelo hidrológico desarrollado y complementar el balance hídrico superficial.

Por último, se recomienda realizar modelaciones hidrológicas en cuencas hidrográficas de parroquias rurales del país, que carecen de información meteorológica. Esto a través del catálogo público de datos de la plataforma GEE, para conocer la disponibilidad de agua y brindar apoyo a los tomadores de decisiones respecto a la gestión del recurso hídrico.

### Referencias bibliográficas

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Acadity. (2021). *Tipos de escorrentía*. <https://images.app.goo.gl/wzc2ZkGjSTLaG7ZU6>
- Bakker, K. (2012). Water Security: Research Challenges and Opportunities. *Science*, 337(6097), 914–915. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1226337>
- Bauer, A., & Black, A. (1981). Soil carbon, nitrogen, and bulk density comparisons in two cropland tillage systems after 25 years and in virgin grassland. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1166–1170.
- Bronson, K. F., Zobeck, T. M., Chua, T. T., Acosta-Martinez, V., van Pelt, R. S., & Booker, J. D. (2004). Carbon and Nitrogen Pools of Southern High Plains Cropland and Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68(5), 1695–1704. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1695>
- Brooks, K., Ffolliott, P., & Magner, J. (2012). *Hydrology and the Management of Watersheds* (I. John Wiley & Sons (ed.)). <https://doi.org/10.1002/9781118459751>
- Bussettini, M. (2018). *Flujos medioambientales en la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos*. Instituto Para La Protección e Investigación Medioambiental (Italia). [https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/flujos-medioambientales-en-la-gestión-integrada-y-sostenible-de-los-recursos#\\_ftnref1](https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/flujos-medioambientales-en-la-gestión-integrada-y-sostenible-de-los-recursos#_ftnref1)
- Cabrera, J. (n.d.). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Universidad Nacional de Ingeniería*, 1, 1–7. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Cadena, M., & Rivera, M. (2014). *Propuesta Del Plan De Ordenamiento Territorial Del Cantón Pujilí, Provincia De Cotopaxi*. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/7628/1/T->

ESPE-047595.pdf

Carchi, E. (2015). *Elaboración de un balance hídrico de la Cuenca del Río Machángara*.

Universidad de Cuenca.

Casaverde, M. (2011). *¿Qué es una cuenca hidrológica?*

<https://www.google.com/imgres?imgurl=x-raw->

[image:///8a15ec81093e93e7928ed158c0444ff786c6bbb9d520ff7d51588ddc5214631c&imgrefurl=https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-](image:///8a15ec81093e93e7928ed158c0444ff786c6bbb9d520ff7d51588ddc5214631c&imgrefurl=https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf&tbnid=55M-CYHsFYpM_M&vet=1&docid=QZjP6tFKdHIqSM&w=659&h=436&itg=1&source=sh/x/im)

[saw\\_files/publicaciones/varios/cuenca\\_hidrologica.pdf&tbnid=55M-](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf&tbnid=55M-CYHsFYpM_M&vet=1&docid=QZjP6tFKdHIqSM&w=659&h=436&itg=1&source=sh/x/im)

[sam\\_files/publicaciones/varios/cuenca\\_hidrologica.pdf&tbnid=55M-](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf&tbnid=55M-CYHsFYpM_M&vet=1&docid=QZjP6tFKdHIqSM&w=659&h=436&itg=1&source=sh/x/im)

[CYHsFYpM\\_M&vet=1&docid=QZjP6tFKdHIqSM&w=659&h=436&itg=1&source=sh/x/im](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf&tbnid=55M-CYHsFYpM_M&vet=1&docid=QZjP6tFKdHIqSM&w=659&h=436&itg=1&source=sh/x/im)

Castellanos, J. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura (INTAGRI).

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, & Stockholm Environment Institute.

(2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*.

Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research (CISPDR). (2016). *Plan Nacional de Gestión Integrada e Integral de los Recursos Hídricos y de las Cuencas y Microcuencas hidrográficas de Ecuador. Memoria*.

Código orgánico de ambiente. (2017). *Código orgánico del ambiente. Registro Oficial N, 983*.

[Archivo PDF]. [https://www.ambiente.gob.ec/wp-](https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf)

[content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO\\_ORGANICO\\_AMBIENTE.pdf](https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf)

Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Publicada en el Registro Oficial N.º 449, del 20 de octubre de 2008*.

Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J.-C., Suarez, W., Condom, T., & Ramos, C. (2008). *Construcción del Modelo WEAP del Río Santa*. 1–24.



- FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. In *ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE 56* (Vol. 322).
- Fondo Ítalo Ecuatoriano para el Desarrollo Sostenible (FIEDS). (2017). *Protección cuenca hidrográfica del Río Toachi mediante capacitación y reforestación con prioridad de especies agroforestales*. <https://fieds.org/historia-fie/convocatoria/proteccion-cuenca-hidrografica-del-rio-toachi-mediante-capacitacion-y-reforestacion-con-prioridad-de-especies-agroforestales/>
- Frahm, M., Rosas, J. C., Mayek, N., López, E., Acosta, J., & Kelly, J. (2004). Breeding beans for resistance to terminal drought in the lowland tropics. *Euphytica*, 136(2), 223–232. <https://doi.org/10.1023/B>
- gidahatari. (2016). *¿Cuál es la reducción del flujo base por efecto de los tajos del Proyecto Conga?* <https://gidahatari.com/ih-es/cual-es-la-reduccion-del-flujo-base-por-efecto-de-los-tajos-del-proyecto-conga>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Cotopaxi. (2015). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Cotopaxi* (p. 258).
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos. (2012). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Sigchos 2012-2020* (p. 208).
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Sigchos. (2015). *Actualización Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Sigchos 2015-2065* (p. 240).
- Gómez-Isidro, S., & Gómez-Ríos, V. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia). *Dyna*, 83(196), 213–222. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>
- Gonzalez, L. (2018). *Introducción a Bias y Varianza -aprendeIA*. <https://aprendeia.com/bias-y->

varianza-en-machine-learning/

- Graf, R., & Jawgiel, K. (2018). The Impact of the Parameterisation of Physiographic Features of Urbanised Catchment Areas on the Spatial Distribution of Components of the Water Balance Using the WetSpa Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), 278. <https://doi.org/10.3390/ijgi7070278>
- IAEA. (2010). Isotopic Age and Composition of Streamflow as Indicators of Groundwater Sustainability. *Results of a 2004-2009 Coordinated Research Project*.
- IGM. (2017). *Información Visor IGM-Cartografía temática-Densidad Poblacional*. <http://www.geoportaligm.gob.ec/visorIEE/composer/>
- INAMHI. (2015). *Anuario hidrológico N° 51-2013*.
- INAMHI. (2017a). Anuario meteorológico N° 53-2013. In *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología* (Issue 52). [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/docum\\_institucion/anuarios/meteorologicos/Am\\_2013.pdf](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am_2013.pdf)
- INAMHI. (2017b). *Geoinformación Hidrometeorológica. Red de estaciones meteorológicas e hidrológicas convencionales*. <https://www.inamhi.gob.ec/geoinformacion-hidrometeorologica/>
- INAMHI. (2021). *Biblioteca – Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología-Publicaciones hidrológicas*. <http://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/>
- Instituto de Hidrología de España, & Unesco. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos* (A. Sokolov & T. Chapman (eds.)).
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S., Hnilo, J. J., Fiorino, M., & Potter, G. L. (2002). NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *The Bulletin of the American Meteorological Society*, 1631–1644. <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11>

- Lai, C., Zhong, R., Wang, Z., Wu, X., Chen, X., Wang, P., & Lian, Y. (2019). Monitoring hydrological drought using long-term satellite-based precipitation data. *Science of The Total Environment*, 649, 1198–1208. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.08.245>
- Laporte, S. (2012). *Conferencia del Estado de las Redes Hidrometeorológicas en Costa Rica*.
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua. (2014). *Publicada en el Registro Oficial N.º 305, del 6 de agosto de 2014*.
- Llerena, C. (2003). *Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú*.
- Lord, W., & Morris, I. (1996). Una estrategia para fomentar y facilitar una mejor ordenación de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe. In *BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO*.
- MAATE, Subsecretaría de Recursos Hídricos, & DACRH. (2021). *Registro Único de Autorizaciones de Agua*.
- MAG. (2019). *Mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental (sistemas productivos), 2009-2015. Versión editada 2019*.
- Molnar, P. (2011). Calibration. *Chair of Hydrology and Water Resources Management*.
- Moncada, A. (2020). *WEAP Calibration and Ensemble with R Tool*.  
[https://github.com/ammoncadaa/WEAP\\_Calibration\\_and\\_Ensamble\\_with\\_R\\_Tool](https://github.com/ammoncadaa/WEAP_Calibration_and_Ensamble_with_R_Tool)
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.  
<https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muñoz, J. (2019). *ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. <https://doi.org/doi:10.24381/cds.68d2bb30>

- Noreika, N., Li, T., Zumr, D., Krasa, J., Dostal, T., & Srinivasan, R. (2020). Farm-scale biofuel crop adoption and its effects on in-basin water balance. *Sustainability*, *12*(24), 1–15.  
<https://doi.org/10.3390/su122410596>
- Ordoñez, J. (2011a). *Cartilla técnica: Balance Hídrico Superficial*.
- Ordoñez, J. (2011b). *Cartilla técnica ¿Qué es una cuenca hidrológica?* (p. 44).
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). Glosario hidrológico internacional. In *IHP/OHP-Berichte* (Issue 12).  
[http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international\\_glossary/385\\_IGH\\_2012.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf)
- PHI, & UNESCO. (2006). *Balance hídrico dinámico e integrado de El Salvador*.  
<http://www.unesco.org.uy/phi>
- Phue, H. T., & Chuenhooklin, S. (2020). Existing Water Balance in the Bago River Basin, Myanmar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *552*(1).  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/552/1/012003>
- Portillo, G. (n.d.). *Evapotranspiración. Qué es, cómo se mide y qué importancia tiene*. *Meteorología en Red* |. Retrieved January 4, 2022, from  
<https://www.meteorologiaenred.com/evapotranspiracion.html>
- Proaño, D. (2010). *Modelación oferta-demanda de agua en cuencas desarrollada-Cuenca alta del río Guayllabamba y cuencas de abastecimiento de agua para la ciudad de Quito, con la ayuda de la herramienta WEAP*.
- Pullupaxi, J., & Villareal, S. (2013). *Incertidumbre en la modelación hidrológica de cuencas y propagación de crecidas en cauces. Caso de estudio: cuencas hidrográficas de los ríos Toachi y Pilatón*. Escuela Politécnica Nacional.
- Sabas, C., & Paredes, D. (2009). *Estudio De Oferta Y Demanda Hídrica En La Cuenca Del Río*

- Barbas. *Scientia Et Technica*, XV(42), 405–410. <https://doi.org/10.22517/23447214.2705>
- Sandoval, W. (2019). *Diseño de obras Hidrotécnicas*.
- Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s06.htm#bm06>
- Sieber, J., Purkey, D., & Stockholm Environment Institute. (2015). *WEAP Water Evaluation And Planning System USER GUIDE for WEAP 2015*.  
<http://www.weap21.org/WebHelp/index.html>
- Stockholm Environment Institute. (2020a). *Tutorial WEAP 08.1.3 - Hidrología, método de la humedad del suelo - YouTube*. <https://www.youtube.com/watch?v=QTgncmjpXjw&t=3s>
- Stockholm Environment Institute. (2020b). *Tutorial WEAP 08.2.1-08.2.2- Hidrología, Ejercicio1: Desarrollar un modelo hidrológico - YouTube*.  
[https://www.youtube.com/watch?v=fH7Z9IBh\\_vg&t=32s](https://www.youtube.com/watch?v=fH7Z9IBh_vg&t=32s)
- The COMET Program. (2006). *Basic Hydrologic Science Course Runoff Processes-Section Two: Paths to Runoff*.  
[http://www.faculty.luther.edu/~bernatzr/RainfallRunoff/comet/hydro/basic/Runoff/print\\_version/02-pathstorunoff.htm](http://www.faculty.luther.edu/~bernatzr/RainfallRunoff/comet/hydro/basic/Runoff/print_version/02-pathstorunoff.htm)
- Twenergy. (2020). *El déficit hídrico*. <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/como-ahorrar-agua/el-deficit-hidrico-1392/>
- Van Loon, A., & Droogers, P. (2006). Water Evaluation And Planning System, Kitui-Kenya. In *WatManSup project* (Issue 2).
- Weather Spark. (n.d.). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Pujilí*.  
[https://es.weatherspark.com/y/20031/Clima-promedio-en-Pujilí-Ecuador-durante-todo-el-año#google\\_vignette](https://es.weatherspark.com/y/20031/Clima-promedio-en-Pujilí-Ecuador-durante-todo-el-año#google_vignette)

Yáñez, M. (2019). *Balance hídrico de la microcuenca del río Tahuando, parroquia Angochagua – Ibarra*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Yory, F. (2018a). 4. *Cálculo de Área en Rangos de Alturas - YouTube*.

[https://www.youtube.com/watch?v=gAiuu3nC5Yg&list=PLhsXAb0\\_OugFcoSWeY2QstaQhloG5RzJT&index=57](https://www.youtube.com/watch?v=gAiuu3nC5Yg&list=PLhsXAb0_OugFcoSWeY2QstaQhloG5RzJT&index=57)

Yory, F. (2018b). *QGis 29 - Creación de Máscaras en GRASS y Delimitación de Microcuencas -*

*YouTube*. [https://www.youtube.com/watch?v=xoDs3H-](https://www.youtube.com/watch?v=xoDs3H-fIMY&list=PLhsXAb0_OugFcoSWeY2QstaQhloG5RzJT&index=38)

[fIMY&list=PLhsXAb0\\_OugFcoSWeY2QstaQhloG5RzJT&index=38](https://www.youtube.com/watch?v=xoDs3H-fIMY&list=PLhsXAb0_OugFcoSWeY2QstaQhloG5RzJT&index=38)

Yory, F. (2021). *Administración de Información Geográfica utilizando QGis - YouTube*.

[https://www.youtube.com/playlist?list=PLhsXAb0\\_OugFcoSWeY2QstaQhloG5RzJT](https://www.youtube.com/playlist?list=PLhsXAb0_OugFcoSWeY2QstaQhloG5RzJT)

Zhang, M., Liu, N., Harper, R., Li, Q., Liu, K., Wei, X., Ning, D., Hou, Y., & Liu, S. (2017). A global

review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales:

Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*,

546, 44–59. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2016.12.040>

Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2013). Interpretación del contenido de la humedad

del suelo para determinar capacidad de campo y evitar riego excesivo en suelos arenosos

utilizando sensores de humedad. *Edis*, 2, 1–4. <https://doi.org/10.32473/edis-ae496-2013>