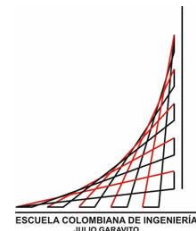


Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL
USO INTEGRADO Y SOSTENIBLE DEL ALMACENAMIENTO
HÍDRICO.**

Ximena Andrea Lemaitre Ruiz

Bogotá, D.C., 31 de mayo de 2019



**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL
USO INTEGRADO Y SOSTENIBLE DEL ALMACENAMIENTO
HÍDRICO.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

Director

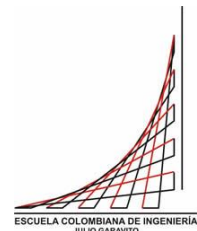
PhD. MSc. Ing. German Ricardo Santos Granados

Codirectores

PhD. MSc. Ing. Gerald Augusto Corzo Pérez

PhD. MSc. Ing. Héctor Andrés Angarita Corredor

Bogotá, D.C., 31 de mayo de 2019



La tesis de maestría titulada “DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL USO INTEGRADO Y SOSTENIBLE DEL ALMACENAMIENTO HÍDRICO”, presentada por Ximena Andrea Lemaitre Ruiz cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Co-Director

Jurado

Bogotá, D.C., día 31 del mes de Mayo del año 2019

Dedicatoria.

A mí amada madre y hermanas, porque sin ellas no habría alcanzado esta meta.

Agradecimientos.

Agradezco a la Escuela Colombiana de Ingeniería y a mi director de tesis Germán Santos por la oportunidad que me dieron al ser asistentes de investigación, y por todas las enseñanzas que me transmitió durante estos años de estudio.

Agradezco al proyecto S-MultiStor por creer en el trabajo interdisciplinario e internacional, por darme una excelente experiencia de investigación que me permitió trabajar con los mejores ingenieros hidráulicos en el mundo.

A mi co-director, tutor, Gerald Corzo, por todas sus exigencias y comentarios que me impulsaron a dar más de mí y a hacer mejores cosas.

Agradezco a mi madre, porque es una guerrera que me enseñó a nunca rendirme y a seguir siempre adelante

Agradezco a mis hermanas, porque en ellas siempre encontré el refugio que necesitaba en los momentos más frustrantes del desarrollo de esta tesis.

A mi amado, Andrés Otálora, no sabemos a dónde llegaremos pero tuviste un papel muy importante en el desarrollo de este trabajo. En ti encontré los regaños y los consejos que necesitaba para seguir adelante.

Y cada persona que con poco o mucho me apoyo y dio ánimos para culminar este proceso de formación.

Resumen.

Palabras clave: Modelo de asignación de agua, Gestión de recursos hídricos, Gestión Integral de Recursos Hídricos, WEAP, RIBASIM.

El problema de la asignación de agua en una cuenca es el núcleo de la gestión de los recursos hídricos. Hoy en día, muchos sistemas de apoyo a la toma de decisiones sobre la informática hidroeléctrica proporcionan sofisticadas herramientas de planificación y simulación de recursos hídricos. Sin embargo, los aspectos sociales y la comunicación multiusuario en tiempo real faltan en muchos de los modelos. Un análisis simple orientado a las partes interesadas solo proporciona la información relacionada con la disponibilidad de los recursos hídricos en una cuenca fluvial. La variabilidad del clima y el clima de una región sumada a los intercambios de agua subterránea, las múltiples corrientes de agua, los impactos ambientales y la gran cantidad de interacciones de los usuarios hacen que la asignación de agua sea un problema computacional complejo. Este estudio presenta una plataforma web basada en el código de Python que integra las interacciones diarias para una GIRH (gestión integrada de los recursos hídricos). La biblioteca de python propuesta funciona como una herramienta para simular, planificar y evaluar escenarios de GIRH. Esta herramienta web integrada hidroinformática (HIWEB) simula un comportamiento de reservorio que representa las reglas operativas, así como su interacción con los distritos de riego. La información requerida para el balance de agua en una cuenca se maneja en una base de datos. La caja de herramientas proporciona módulos específicos para cuantificar el consumo de riego, las demandas de agua doméstica e industrial. Para validar los procesos representados y los resultados obtenidos, la herramienta se prueba en la cuenca del río Coello en Colombia y sus resultados se comparan con WEAP y RIBASIM, dos herramientas de asignación de agua reconocidas mundialmente. Este proyecto se encuentra en el marco de S-MultiStor, un proyecto internacional de investigación e innovación en colaboración, y se espera que se amplíe para incluir una metodología estandarizada para la evaluación de la sostenibilidad de los recursos.

Abstract.

Palabras clave: Allocation water model, Hydraulic resources management, Integrated Water Resources Management, WEAP, RIBASIM.

The water allocation problem in a river basin is at the core of water resources management. Nowadays, many hydro informatics decision support systems provide sophisticated water resources simulation and planning tools. However, social aspects and multi-user communication in real time are missing from many of the models. A simple stakeholder oriented analysis only provides the information related to the availability of water resources in a river basin. The variability of the weather and climate of a region added to the groundwater exchanges, the multiple water streams, the environmental impacts and the large number of user interactions make the water allocation a complex computational problem. This study presents a web platform based on python code that integrates the everyday interactions for an IWRM (integrated water resources management). The proposed python library works as a tool for simulate, plan and evaluate IWRM scenarios. This hydroinformatic integrated web tool (HIWEB) simulates a reservoir behavior representing the operational rules as well as its interaction with irrigation districts. The information required for the water balance in a catchment is handled in a database. The toolbox provides specific modules for quantifying irrigation consumption, domestic and industrial water demands. In order to validate the processes represented and the results obtained, the tool is tested on the Coello river basin in Colombia and its results are compared with WEAP and RIBASIM, two worldwide-recognized water allocation tools. This project is in the framework of S-MultiStor, an international collaborative research and innovation project, and it is expected to be extended to include a standardized methodology for sustainability assessment of the resources.

Índice General

Resumen	7
Abstract	8
Tabla de ilustraciones	11
Tabla de ecuaciones	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
Tabla de tablas	13
Glosario	14
Capítulo 1	16
Introducción	16
1.1 Motivación y descripción del problema	16
1.2 Preguntas de investigación	18
1.3 Objetivos.....	19
1.4 Estructura del documento	19
Capítulo 2	21
Estado del arte	21
2.1 Evolución del concepto “Gestión Integrada de Recursos Hídricos”	21
2.2 Desarrollo de los sistemas de apoyo a toma de decisiones.	24
2.3 Herramientas actuales para el análisis y evaluación de la asignación de agua en las cuencas. .	25
2.4 Aporte de este trabajo al área de conocimiento	27
Capítulo 3	28
Caso de estudio	28
3.1 La cuenca del río Coello.	28
3.2 Caso específico, descripción del problema.....	29
3.3 Relevancia del análisis de la asignación de agua en Coello	30
3.4 Recolección y procesamiento de datos.	30
3.5 Tabla de datos para cálculos de demandas	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

Capítulo 4.....	32
<i>Análisis comparativo de las herramientas disponibles en el mercado para realizar modelos de asignación de agua en una cuenca Que es WEAP.....</i>	32
4.1 Que es WEAP	32
4.2 Ecuaciones utilizadas en WEAP	32
4.3 Estructuración de la topología de la cuenca.....	35
4.4 Que es RIBASIM	38
4.5 Ecuaciones utilizadas en RIBASIM	39
4.6 Configuración del modelo de la cuenca en RIBASIM.....	42
Capítulo 5.....	47
<i>Desarrollo de la plataforma HiWEB</i>	47
5.1 Ecuaciones utilizadas en HiWEB	47
5.2 Desarrollo de software HiWEB	52
Capítulo 6.....	58
<i>Implementación del caso de estudio en HiWEB</i>	58
6.1 Estructuración de la topología de la cuenca.....	58
6.2 Ingreso de datos.	59
Capítulo 7.....	62
<i>Análisis y Comparación de resultados</i>	62
7.1 Resultados modelo en WEAP	62
7.2 Resultados modelo en RIBASIM	66
7.3 Resultado modelo en HIWEB.....	71
7.4 Comparación resultados.....	76
7.5 Ventajas y desventajas de cada software.....	78
Capítulo 8.....	80
<i>Conclusiones y Recomendaciones.</i>	80
8.1 Cumplimiento de objetivos	80
8.2 Innovación	81
8.3 Valor practico	82

8.4	Recomendaciones y trabajo por hacer	83
Capítulo 9		84
Referencias.		84
Anexo 1: Concesiones de agua activas en la cuenca del Coello, Magdalena, Colombia. ..		87
Anexo 2: Pasos y recomendaciones para instalar HiWEB		88
Anexo 3: Códigos de Python de HiWEB		90

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1	Demanda Total de Agua 2014 Fuente: IDEAM	17
Ilustración 2	Cuenca del río Coello Fuente: propia.....	28
Ilustración 3	Operación de embalses WEAP Fuente: Manuela de usuario WEAP	34
Ilustración 4	Nodos de inicio WEAP Fuente: Propia.....	35
Ilustración 5	Configuración topológica de la cuenca de estudio Fuente: Propia.	36
Ilustración 6	Carga de caudales disponibles en WEAP. Fuente: Propia.....	37
Ilustración 7	Ingreso demandas de agua WEAP Fuente: Propia	37
Ilustración 8	Asignación características de los embalses. Fuente: Propia.....	38
Ilustración 9	Demanda de consumo RIBASIM Fuente: Propia	40
Ilustración 10	Demanda por irrigación RIBASIM Fuente: Propia	41
Ilustración 11	Curva de regulación RIBASIM	41
Ilustración 12	Ventana inicial RIBASIM. Configuración modelo. Fuente: Propia.....	42
Ilustración 13	ventana principal configuración modelo Fuente: Propia	42
Ilustración 14	Ventana configuración modelo, edición de la red Fuente: Propia.....	43
Ilustración 15	Edición de la red Fuente: Propia	43
Ilustración 16	Ruta del programa Fuente: Propia	44
Ilustración 17	Modificación de series de datos para caudal Fuente: Propia	44
Ilustración 18	Asignación de caudales de entrada al modelo Fuente: Propia.....	45
Ilustración 19	Diagrama de flujo Balance hídrico HiWEB Fuente: Propia	47
Ilustración 20	Diagrama de flujo demanda real suplida, HIWEB Fuente: Propia	48

Ilustración 21 Ecuaciones para la distribución proporcional del recurso disponible Fuente: Propia	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 22 Código para cálculo de disponibilidad de volúmenes para abastecer las demandas Fuente: Propia.....	48
Ilustración 23 Código para cálculo de la demanda doméstica Fuente: Propia.....	49
Ilustración 24 Código para cálculo de demanda por irrigación Fuente: Propia	50
Ilustración 25 Diagrama de flujo caracterización del uso de los embalses. Fuente: Propia	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 26 Ecuaciones para almacenamiento hídrico Fuente: Propia¡Error! Marcador no definido.	
Ilustración 27 diagrama de flujo interconexión HiWEB Fuente: Propia.....	52
Ilustración 28 Pestaña de inicio HiWEB Fuente: Propia	53
Ilustración 29 Pestaña de ejemplo y pestaña de resultados de asignación de agua Fuente: Propia	54
Ilustración 30 Pestaña de ingreso de datos Fuente: Propia	54
Ilustración 31 Pestaña de ayuda y soporte técnico. Fuente: Propia	55
Ilustración 32 Estructura de base de datos Fuente: Propia	56
Ilustración 33 Diagrama de flujo modelo Python Fuente: Propia	57
Ilustración 34 Ejemplo tabla para características de cuenca y subcuenca a: ejemplo de tabla para cuenca b: Ejemplo de tabla para subcuenca Fuente: Propia.....	58
Ilustración 35 Ejemplo tabla Ríos y la interacción de las demandas Fuente: Propia	59
Ilustración 36 Ingreso de caudales disponibles. A: Ejemplo Tabla de datos. B: lectura de datos desde la web Fuente: Propia.....	60
Ilustración 37 Características de demanda de agua potable Fuente: Propia.....	60
Ilustración 38 Ejemplo de tablas asignación demanda para irrigación. Fuente: Propia	61
Ilustración 39 Ejemplo tabla asignación de característica de embalses Fuente: Propia ...	61
Ilustración 40 Esquema de trabajo WEAP Fuente: Propia	62
Ilustración 41 Demanda suplida Agua potable Fuente: Propia	64
Ilustración 42 Demanda no suplida Agua potable Fuente: Propia	64
Ilustración 43 Demanda suplida irrigación Fuente: Propia	64
Ilustración 44 Demanda no suplida para irigacion Fuente: Propia.....	65
Ilustración 45 Porcentaje de cobertura de demanda Fuente: Propia	65
Ilustración 46 Representación gráfica de la cuenca Coello, RIBASIM Fuente: Propia.....	66

Ilustración 47 Demanda suplida agua potable, RIBASIM Fuente: Propia	67
Ilustración 48 Resultados demanda total agua potable, RIBASIM Fuente: Propia	¡Error!
Marcador no definido.	
Ilustración 49 Resultados porcentaje de cobertura de demanda de agua potable, RIBASIM Fuente: Propia	67
Ilustración 50 Demanda Total para irrigación, RIBASIM Fuente: Propia	¡Error!
Marcador no definido.	
Ilustración 51 Resultados demanda suplida para irrigación, RIBASIM Fuente: Propia	69
Ilustración 52 Tabla resumen demanda de agua potable Fuente: Propia.....	69
Ilustración 53 Porcentaje de cubrimiento de la demanda, RIBASIM Fuente: Propia	68
Ilustración 54 Tabla resumen demanda para irrigación Fuente: Propia.....	70
Ilustración 55 Ubicación de resultados cuenca ríos Coello, HiWEB Fuente: Propia	71
Ilustración 56 Resultados HiWEB I Fuente: Propia	72
Ilustración 57 Resultados HiWEB III Fuente: Propia	74
Ilustración 58 Resultados HiWEB II Fuente: Propia	¡Error! Marcador no definido.

Tabla de tablas

Tabla 1 Caudales disponibles después de suplir demanda en cada tramo, en millones de metros cúbicos. Fuente: Propia	62
Tabla 2 Demanda no suplida en millones de metros cubicos Fuente: Propia.....	63
Tabla 3 Demandas suplidas en cada nodo, en millones de metros cúbicos Fuente: Propia	63
Tabla 4 Porcentaje de cubrimiento de las demandas WEAP Fuente: Propia	63
Tabla 5 Resultados demanda no suplida Irrigación en m3 Fuente: Propia.....	75
Tabla 6 Resultados caudales disponibles después de suplir demandas en m3 Fuente: Propia	75
Tabla 7 Tabla resultados demanda no suplida Agua potable en m3 Fuente: Propia	75
Tabla 8 Porcentaje de cubrimiento demanda agua potable, HiWEB Fuente: Propia	75
Tabla 9 Porcentaje de cobertura demanda de irrigación, HiWEB Fuente: Propia.....	76
Tabla 10 caudales disponible según cada modelos en millones de metros cúbicos.....	76

Glosario

Asignación de agua: La asignación de agua se puede definir desde dos puntos de vista diferentes; el primero en el cual se asigna un volumen disponible de agua a cada uso dentro de una cuenca; y en el segundo por el cual se determina como debería ser asignada el agua entre diferentes regiones administrativas o sectores de uso (Speed, Yuanyuan, Tom, Pegram, & Zhiewi, 2013).

El resultado de estos procesos se conoce como plan de asignación de agua en una cuenca, y es el instrumento que define el agua disponible para ser asignada, en Colombia se cuenta con “La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico” de la cual se desprenden los “Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas – POMCA-“.

Concesiones de agua: Las concesiones de agua en Colombia se refiere a los permisos que se adquieren para derivar una cierta cantidad de caudal.

Demanda hídrica: En este trabajo de grado se definirá como demanda hídrica a un requerimiento de volumen de agua mensual para satisfacer una necesidad. Se trabajaron dos de los requerimientos de agua más influyentes en una cuenca; Irrigación y consumo humano (Speed et al., 2013).

Almacenamiento hídrico: Se definirá como la cantidad de agua almacenada en un embalse para ser usada cuando se necesite suplir la demanda hídrica hacia aguas abajo.

Oferta hídrica: Es el volumen total del recurso hídrico disponible dentro de una región o cuenca para su uso. Dependiendo del contexto, podría () incluir el agua subterránea y el agua fresca. (Speed et al., 2013).

Agua utilizable: Es el volumen de agua potencialmente disponible para derivaciones. El volumen total de agua disponible dependerá de la hidrología del sistema y de la estructura hídrica del sistema. Los embalses pueden incrementar el agua disponible gracias a la retención de la misma (Speed et al., 2013).

Agua asignable: El volumen de agua que podría ser asignado entre diferente regiones, grupos o sectores. Se determina sustrayendo del agua utilizable el agua requerida para objetivos ambientales (caudales ambientales). El agua disponible para asignar dependerá

de la hidrología, infraestructura y adicionalmente de los requerimientos ambientales (Speed et al., 2013).

Usuarios del agua: Los usuarios del agua se definen de acuerdo con las actividades de producción económica, actividades de regulación ambiental, actividades que sustenten formas de vida y funciones de transferencia. Por lo que, los usos del agua incluyen: domésticos, industriales, agricultura, piscicultura, ecosistemas, hidroenergía, navegación, recreación, entre otros.

Requerimientos de agua: Los requerimientos de agua es la cantidad de agua solicitada por un sector o una región.

Interfaz online: Se desarrolló en código HTML y JAVA, en donde se le muestra al usuario las funcionalidades generales de HIWEB, un ejemplo de aplicación y resultados de la herramienta con la cuenca del río Coello, una página de soporte técnico y una página en donde se le permite al usuario ingresar los datos necesarios para simular un nuevo sistema hídrico.

Base de datos: La base de datos está desarrollada y gestionada por MySQL. En ella se guardan los datos proporcionados por el usuario para la creación de nuevos modelos de asignación de agua y los resultados proporcionados por el modelo numérico.

Modelo numérico de simulación de la asignación de agua en una cuenca: El modelo numérico se desarrolló en Python. En este se realizan los cálculos de los requerimientos para irrigación, consumo humano y almacenamiento, así como, el cálculo de la ecuación de balance hídrico en el sistema y la asignación del agua.

Capítulo 1

Introducción

El proyecto “Sustainable Hydropower and Multipurpose Storage to meet Water, Food, and Energy Development Goals: A Program for Collaborative Research and Innovation, S-MultiStor”, (<http://smultistor.nl/>) nace como una iniciativa del gobierno holandés para apoyar el desarrollo de herramientas computacionales que apoyen la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en países en vía de desarrollo y con cuencas hídricas importantes: la de Zambezi en el sur del Africa, la de Irrawaddy en Myanmar en el sureste de Asia y la del río Magdalena en Colombia.

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, The Nature Conservancy Colombia y “The Institute For Water Education - IHE”, se unen dentro del marco general de este proyecto para el desarrollo del presente trabajo de grado, el cual tiene como objetivo presentar una herramienta computacional que apoye a los usuarios del agua a lograr una mejor distribución del recurso.

1.1 Motivación y descripción del problema

Tomar decisiones en temas relacionados con la asignación del recurso hídrico dentro de una comunidad es un reto en sí mismo. La planeación del uso y asignación del recurso hídrico en una cuenca requiere la interacción no solo de expertos de varias disciplinas sino también, la aplicación de varios modelos que logren representar las múltiples interacciones físicas, económicas y sociales relacionadas con el uso del agua.

La gestión del agua es un problema complejo que se relaciona con variables humanas y físicas. En los últimos años, se han desarrollado modelos para representar estos complejos sistemas los cuales fluctúan desde sistemas de apoyo a la decisión (Johnson, Williams, & Kirshen, 1995) hasta sistemas de apoyo a la discusión, como los modelos basados en juegos serios (Craven, Angarita, Corzo Perez, & Vasquez, 2017).

Sin embargo, aún existen variables culturales, sociales y humanas (Prácticas agrícolas, crecimiento de las ciudades y otras) que son difíciles de representar dentro de las complejas interacciones de la distribución del agua y el sistema hidrológico. Los modelos actuales como WEAP (Figueroa & Escobar, 2015) o RIBASIM (Omar, 2014) permiten una gran

variedad de interacciones sin embargo, a veces, la información que se presenta en estas herramientas no es clara o accesible para los múltiples usuarios del agua. Por lo que, en este trabajo se presenta un espacio interactivo para la toma de decisiones en línea, que permite la representar escenarios de planeación futura o actual de forma más amigable y flexible.

En los últimos 9 años, en Colombia, se han desarrollado políticas para la implementación de la gestión hídrica. Estas políticas, han reunido e involucrado en su desarrollo a la comunidad científica nacional para la formulación de los planes de ordenamiento y manejo de las cuencas, POMCA (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Como resultado del trabajo, el territorio de Colombia se organizó desde el punto de vista hídrico y se reconocieron 5 macrocuencas: Magdalena Cauca, Amazonas, Pacifico, Orinoco y Catatumbo. La del Magdalena Cauca siendo es la más grande e importante, pero no tiene el mejor rendimiento hídrico. Dentro de esta cuenca, se han desarrollado la mayoría de las

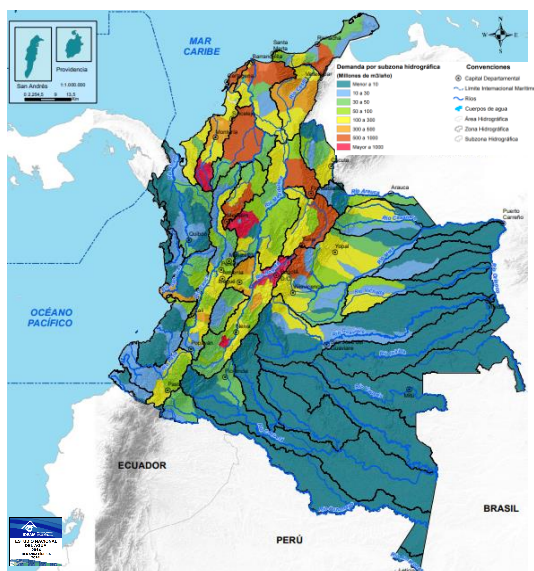


Ilustración 1 Demanda Total de Agua 2014
Fuente: IDEAM

ciudades más importantes del país, así como, los centros de industrialización y agricultura. Por lo que, esta cuenca se presenta actualmente el mayor volumen de demanda hídrica, como se ve en la Ilustración 1 (IDEAM, 2014). Abastecer totalmente dichas demandas representado un desafío tanto para el recurso como para los planeadores.

Como se mencionó anteriormente, la cuenca del Magdalena ha sido el foco de desarrollo agrícola e industrial en Colombia. Uno de estos centros agrícolas más importantes se ubica en el departamento del Tolima a lo largo del río

Coello. La cuenca del río Coello tiene ciudades grandes como: Ibagué y Cajamarca. Es el centro agrícola del país, con una producción estimada del 60% del PIB nacional.

Hidrológicamente, la cuenca mayor es la del río Coello que tiene un caudal medio de 31,24 m³/s, con una oferta hídrica neta de 30,90 m³/s, con un caudal ecológico de 0.34 m³/s, y

un índice de escasez de 0,77 lo que se considera alto e indica una demanda alta de agua (CORTOLIMA, 2017c).

Esta investigación presenta una plataforma web apoyada en scripts en Python que integra la información hidrológica de disponibilidad y oferta para apoyar la gestión hídrica. La plataforma permite la comparación de escenarios en los que diferentes variables como la cantidad de agua disponible y asignación de la misma es analizada de diferentes formas dentro del sistema hídrico. Los resultados se comparan con los de herramientas existentes ampliamente utilizadas: WEAP y RIBASIM, en la cuenca del río Coello, la cual, como se describió anteriormente, es de gran importancia nacional gracias a su producción agrícola.

Además, pensando en un aporte significativo en esta área, se desarrolló una nueva librería de scripts en Python. Gracias al diseño modular y con código abierto, los scripts permiten el análisis flexible de múltiples escenarios y la fácil escalabilidad del sistema. El modelo numérico se basa en la aplicación en la cuenca de la ecuación de continuidad y la interacción de usuarios del agua. Este documento también, es una continuación de la investigación desarrollada en WEAP para la cuenca Coello, realizada por Meiline Siahaan (Siahaan, 2016).

Es importante resaltar que, el entregable de este trabajo de grado no es un estudio detallado de la disponibilidad y demanda hídricas en la cuenca del Magdalena o en la del Coello. El producto final de este trabajo de grado, es la plataforma en línea para la evaluación de la asignación de agua en cualquier cuenca, por lo que, no se recolectaron datos más recientes a los utilizados por Meiline en la cuenca del Coello.

1.2 Preguntas de investigación

La metodología presentada en este trabajo de grado, tratará de dar respuesta a la siguiente pregunta.

- ¿Cómo una plataforma en línea podría facilitar la evaluación de la asignación del agua en una cuenca?

1.3 Objetivos.

Para poder dar respuesta a la pregunta de investigación planteada en la sección 1.2, se definieron los siguientes objetivos:

1.3.1 Objetivo general.

Desarrollar una plataforma en línea simple y de fácil acceso, que permita a los usuarios interactuar y comparar escenarios de competencia por el acceso al recurso hídrico.

1.3.2 Objetivos específicos.

Para desarrollar completa y satisfactoriamente el propósito principal de este trabajo de grado, se definieron los siguientes objetivos específicos.

- Hacer una revisión del estado del arte referente a las herramientas computacionales disponibles que facilitan el análisis de asignación de agua.
- Realizar un análisis comparativo de las herramientas disponibles en el mercado para realizar modelos de asignación de agua en una cuenca
- Desarrollar una biblioteca de scripts que soporte la plataforma en línea y que represente de forma simple las posibles demandas hídricas en una cuenca y mejore la asignación de los recursos hídricos en la misma.
- Desarrollar un sistema de almacenamiento de datos para acceder a ellos desde un ambiente en línea.
- Desarrollar una interfaz en línea para que los usuarios del agua tengan acceso al sistema de almacenamiento y a la herramienta de modelación de forma sencilla y sin restricciones de uso.
- Hacer un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de herramientas actuales del mercado de amplio uso y la propuesta en este trabajo.

1.4 Estructura del documento.

Este documento consta de 7 capítulos. En el **Capítulo 1** encontrará la introducción a este trabajo de investigación soportado por la motivación, la descripción del problema, la pregunta de investigación y los objetivos. En el **Capítulo 2**

Estado del arte

2.1 Evolución del concepto “Gestión Integrada de Recursos Hídricos”

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos se define como un proceso en donde se promueve el desarrollo y control coordinado del agua, tierra y recursos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas y el ambiente” (Global Water Partnership, 2019).

Dicho concepto, que desde ahora llamaremos GIRH (en inglés Integrated Water Resources Management IWRM), se ha convertido en una de las iniciativas más discutidas por los gobiernos y cuyos inicios se podrían establecer a finales de los años 70's en la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Agua, en Mar de Plata 1977 (Rahaman & Varis, 2005).

En esta conferencia uno de los principales objetivos fue valorar el estado de los recursos hídricos, y con esto asegurar que existiera un suministro adecuado de agua para satisfacer las necesidades socioeconómicas futuras del planeta. Se logró aprobar el “Plan de Acción Mar de Plata”, el cual fue la primera aproximación internacional de la GIRH.

Quince años después tuvo lugar la conferencia internacional sobre el agua y el ambiente en Dublín, Irlanda. En la cual se establecieron cuatro de las principales recomendaciones para realizar acciones a nivel local, nacional e internacional.

- Se reconoció que el agua dulce es un recurso finito, vulnerable y esencial por lo que se sugirió que el agua es un recurso que debe ser manejado de forma integral.
- Se sugirió que las participaciones involucren usuarios, planeadores y gobernadores en todos los niveles de control y desarrollo.
- Se reconoció el papel central que juegan las mujeres en los temas relacionados con la provisión, manejo y seguridad de abastecimiento del agua en las poblaciones.
- Se sugirió que el agua debe ser tratada como una bien económico(Rahaman & Varis, 2005).

Por lo que, uno de los grandes logros de la conferencia de Dublín fue lograr involucrar a los usuarios del agua, desde los niveles más alto de liderazgo hasta las pequeñas comunidades para que participen activamente en la gestión de los recursos hídricos de sus regiones.

En el 2000, el segundo foro mundial del agua se llevó a cabo en La Haya, Países Bajos. Participaron no solo expertos y gobernantes sino también toda clase de usuarios del agua de países desarrollados y en vía de desarrollo. En este foro se discutieron los retos para la implementación, lo que conllevó a que la visión transmitida en el foro se convirtiera en planes de acción en los países participantes (The & Rijsberman, 2000).

Este esfuerzo conjunto lideró la creación de lo que hoy se conoce como La Sociedad Global del Agua (Global Water Partnership), y el espacio permanente para la discusión de la GIRH en la agenda política de muchos países (The & Rijsberman, 2000).

En 1992, tuvo lugar La Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible en Rio, Brasil. En esta cumbre el concepto de GIRH fue objeto de largas discusiones sobre lo que significa ponerlo práctica (Abbas & Xuan, 2017). Igualmente, se aceptó la GIRH como un concepto “sombrija” que abarca interacciones complejas entre los sistemas de recursos hídricos, el ambiente y los sistemas sociales. Por lo que, fue categorizado como un paradigma ingenieril basado en “predecir y proveer” (Rahaman & Varis, 2005).

Así pues, al inicio de los años noventa la GIRH empezó a ser reconocida como un proceso multisectorial, multiregional y multidimensional. En el 2012, La Sociedad Global del Agua dio una de las definiciones más aceptadas actualmente por los expertos y científicos en el área. Se definió la GIRH como “un proceso en donde se promueve el desarrollo y control coordinado del agua, tierra y recursos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas y el ambiente” (Global Water Partnership, 2019).

De ahí que, la efectividad de las estrategias para lidiar con los problemas de calidad y cantidad de agua y su variabilidad, tiene un gran impacto en la calidad de vida y supervivencia de todas las especies. Por lo que, lograr la efectiva implementación de un plan de GIRH en los países reforzará la seguridad alimentaria y el acceso al recurso hídrico.

En 2010, en Colombia, se desarrolló la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), en la cual, se planteó un plan de acción para la planeación, administración, seguimiento y control y manejo de conflictos de los recursos hídricos en el país (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En esta política se realizó un diagnóstico del estado del recurso hídrico, incluyendo la oferta y disponibilidad de agua, la demanda, la calidad y los riesgos asociados al mismo. Con este diagnóstico se crearon las herramientas de planeación como los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH) y los planes de manejo (PM).

A diciembre del 2016, alrededor de 420 procesos de ordenación de cuencas hidrográficas se habían iniciado, lo que corresponde a un área aproximada de 38.2 millones de hectáreas, equivalentes al 36.2% del territorio Colombiano (IDEAM, INVEMAR, SINCHI, IIAP, & IAvH, 2016).

2.1.1 Planeación y manejo de los recursos hídricos.

Las actividades de planeación y manejo de los recursos hídricos son comúnmente impulsadas por problemas que se deben resolver o por oportunidades en las que se identifican beneficios en el uso del agua y la tierra (Beek, 2017).

Existen dos aproximaciones para planear y manejar los recursos hídricos. La primera es de arriba hacia abajo, comúnmente llamado comando y control "*command and control*". La otra forma es desde abajo hacia arriba comúnmente llamado aproximación pasto-raíces "*grass-roots approach*". En este trabajo de grado se utiliza el segundo método, el cual es explicado a continuación.

2.1.1.1 Método de abajo hacia arriba. "grass-root approach".

Durante la última década, el proceso de planeación de los recursos hídricos ha involucrado la participación activa de los interesados; aquellos que se ven afectados de alguna manera por la gerencia del río.

La planificación ascendente debe esforzarse por lograr una visión común o "compartida" de las metas y prioridades entre todas las partes interesadas. Debe conocer y cumplir con todas las leyes y regulaciones aplicables. Debe esforzarse por identificar y evaluar múltiples alternativas y criterios de desempeño, incluidos los criterios de sostenibilidad. Para poder hacer esto, los planificadores deben usar tecnología de información moderna, según esté disponible, para mejorar tanto el proceso como el producto. Esta tecnología, sin embargo,

no eliminará la necesidad de llegar a conclusiones y tomar decisiones sobre la base de datos incompletos e inciertos y el conocimiento científico (Beek, 2017).

2.2 Desarrollo de los sistemas de apoyo a toma de decisiones.

Como se explicó anteriormente poner en práctica la GIRH es un proceso complejo, no solo por las múltiples interacciones entre los usuarios, sino también por la información que se requiere. Es por esto que la GIRH se apoya fuertemente en las herramientas de modelación computacionales, entre las cuales, los Sistemas de Apoyo a las Decisiones (DSS) han cumplido un papel fundamental en el respaldo tecnológico para tomadores de decisiones.

El uso de los modelos computacionales en la GIRH sigue dos necesidades básicas; conocer cuantitativamente el estado del recurso hídrico en un lugar dado; y asignar este recurso de forma óptima y eficiente bajo ciertas restricciones.

Los DSS nacieron entonces, hace más o menos 20 años con los trabajos de Keen and Scott Morton (1978), Bonezek (1980) y Sprague y Carlson (1982) entre otros (Rajasekaram & Nandalal, 2005). Fundamentalmente los DSS tienen el objetivo de asistir en el desarrollo de la toma de decisiones estructuradas o semiestructuradas en un campo multidisciplinario dentro de la teoría de toma de decisiones (Hess, Rees, & Rakes, 2000). Gracias a múltiples investigaciones en diferentes áreas técnicas y de aplicación en la ingeniería han sido fácilmente adoptados en diferentes áreas como: sistemas de gestión en la generación de diálogos (DGMS); Sistemas de administración de modelos (MBMS) y los sistemas de administración de bases de datos (DBMS) (Rajasekaram & Nandalal, 2005).

Un sistema de apoyo a las decisiones (DSS) en la GIRH es un sistema de computadora interactivo e integrado que consiste en el análisis de información y la capacidad de gestionar la información, diseñado para apoyar a los tomadores de decisiones quienes son los encargados de resolver problemas relacionados con la gestión del agua (Adler, 2013). En este contexto entonces, los tomadores de decisiones son los planeadores, gerentes, operadores y gobernantes de los sistemas de recursos hídricos a cargo de resolver problemas relacionados con el agua.

A su vez, el proceso de toma de decisiones en la GIRH sigue un proceso cíclico el cual tiene 4 fases; recolección y procesamiento de la información; análisis del problema; uso de

herramientas de apoyo a la toma de decisiones; implementación de la decisión (Rajasekaram & Nandalal, 2005). De la misma forma, los DSS para la gestión de los recursos hídricos consisten en tres subsistemas principales integrados; una interfaz para el usuario; un conjunto de herramientas de modelación; y almacenamiento masivo de datos y manejo de los mismos (base de datos) (Adler, 2013).

2.3 Herramientas actuales para el análisis y evaluación de la asignación de agua en las cuencas.

Como se presentó en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el concepto de GIRH empezó a tomar fuerza a finales de los años 70's, y con esto el desarrollo de las herramientas computacionales que apoyan técnicamente el desarrollo y análisis de los problemas de interacciones entre usuarios del agua.

Actualmente en el mercado existen varias herramientas que apoyan la evaluación y planeación de la asignación del recurso hídrico en las cuencas, entre estas herramientas se pueden destacar los siguientes softwares: RIBASIM, WEAP, Modsim-DSS e HydroBID.

De estas herramientas la primera en ser lanzada al mercado fue RIBASIM en 1965 por la empresa de consultoría holandesa DELTARES. Esta herramienta fue desarrollada como una aproximación integral al sistema hídrico. RIBASIM es un paquete de modelación genérica que analiza el comportamiento de las cuencas hidrográficas en diversas condiciones hidrológicas (Omar, 2014). Este paquete de modelación es flexible e integral que involucra una variedad de medidas relacionadas con la infraestructura, la gestión operativa, y de la demanda adicional a los términos en cantidad y calidad del agua.

Siguiendo el camino trazado por RIBASIM, fue lanzada al mercado herramienta WEAP en 1988, por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo. WEAP fue creado con el objetivo de ser una herramienta de planeación flexible integral y transparente para evaluar la sustentabilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance (Stockholm Environment Institute (SEI), 2015).

En el 1978, fue lanzado al mercado Modsim-DSS por la Universidad Estatal de Colorado en Estados Unidos. MODSIM-DSS es un sistema generalizado de Apoyo a la Decisión de la cuenca fluvial y un modelo de flujo de red, diseñado específicamente para satisfacer las

crecientes demandas y presiones de los administradores de cuencas hidrográficas en la actualidad. Así mismo, está estructurado como un sistema de apoyo a la decisión, con una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite a los usuarios crear cualquier topología de sistema de cuenca fluvial. Las estructuras de datos incorporadas en cada objeto modelo se controlan mediante un sistema de administración de bases de datos, que también se consulta mediante la simple activación del mouse (Berhe, Melesse, Hailu, & Sileshi, 2013). Estas tres herramientas fueron las únicas disponibles por un largo tiempo, pues eran las únicas que estaban apoyando computacionalmente los desarrollados de los planes de GIRH.

Y finalmente, la herramienta más actual en salir al mercado fue HydroBID, desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo en el 2016. HydroBID es una herramienta que permite gestionar y planificar los recursos hídricos de manera eficiente a través de modelos de simulación de disponibilidad presente y futura. Este es un software está integrado por dos componentes: un modelo numérico que incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad de volúmenes y caudales de agua dulce a escalas regionales, a nivel de cuencas y de sub-cuencas; y una base de datos con la delimitación, pre-parametrización y conectividad de aproximadamente 250 mil cuencas de América Latina y el Caribe. Adicionalmente, cuenta actualmente con módulos de manejo de embalses y transporte de sedimentos e interacción con aguas subterráneas. Además de las funciones principales, esta herramienta aporta información necesaria para la realización de tareas adicionales como soporte para la toma de decisiones, estimación de costos y beneficios de las medidas de adaptación, ayuda en la decisión de los diseños alternativos de proyectos de infraestructura, así como políticas de gestión de recursos hídricos (Nalesso, n.d.).

Es así que, a medida que la GIRH toma fuerza en la planeación de las cuencas, al mismo tiempo, el desarrollo de las herramientas computacionales se vuelve más importante. Por lo que, en este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta que apoya el desarrollo y la planeación de la GIRH y será comprada y validada con dos de las mencionadas anteriormente, WEAP y RIBASIM.

2.4 Aporte de este trabajo al área de conocimiento

En este trabajo se presenta una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en línea, que tiene la capacidad de recolectar, procesar y analizar la información de oferta y demanda de un sistema de recursos hídricos.

HiWEB es una herramienta de asignación de agua la cual, a partir de la ecuación de balance hídrico logra darles a los usuarios del agua y tomadores de decisiones información del estado de la oferta y demanda hídrica en su cuenca. Por lo que, con esta herramienta se pretende dar apoyo tecnológico y científico a los planes de GIRH que se quieran implementar, especialmente en el plan de acción de Colombia con la PNGIRH.

Como se mencionó anteriormente en Colombia hay un plan de GIRH en acción. Este plan tiene cuatro objetivos importantes; Conocimiento detallado de la oferta; Conocimiento detallado de la demanda; Conocimiento de la calidad actual del recurso hídrico nacional y Riesgo asociado la oferta y disponibilidad del agua (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). De estos cuatro objetivos, HiWEB como herramienta de análisis de la asignación de agua dentro de cada sistema, podrá ayudar de primera mano en los primeros dos objetivos y en segundo plano en el tercer y cuarto objetivo.

Por lo que, se espera que con el desarrollo de esta herramienta se implementen análisis de asignación de agua en los procesos presentes y futuros que se desarrollen en el país.

Capítulo 3

Caso de estudio

3.1 La cuenca del río Coello.

El río Coello nace en el cono del nevado del Tolima en la Cordillera Central. Empieza su recorrido a los 3.600 m.s.n.m recorre 9,8Km aproximadamente hasta los 2.150 m.s.n.m, dicho recorrido lo realiza con una pendiente media de cauce de 18%. Continúa su recorrido aproximadamente 17,9 Km hasta una cota de 1.400 m.s.n.m y con una pendiente media de cauce de 5,4%. En el límite con Ibagué recibe río Bermellón y sigue su recorrido hasta llegar al río Magdalena.

La cuenca del río mayor del río Coello desde su nacimiento hasta su desembocadura, posee una longitud de 124,76 Km y sus aguas corren en sentido Occidente – Oriente drenando una extensión de 184.257 Ha correspondientes aproximadamente al 7,8% del área total del departamento del Tolima, lo que la hace la tercera más grande del departamento. (CORTOLIMA, 2017a).

Esta cuenca está localizada al occidente del Departamento del Tolima en el costado Central – Oriental de la cordillera Central, enmarcada en las coordenadas planas:

$$X_{min}: 830.000 \quad Y_{min}: 955.000 \quad X_{max}: 1.015.000 \quad Y_{max}: 915.000$$

Adicionalmente, la temperatura media de la cuenca es de 19,8 °C, con variaciones de temperatura entre los 28.6°C y 9.3°C, lo que genera en la cuenca alrededor de 11 provincias climáticas, de las que se destacan los clima de páramo, templado y cálido (CORTOLIMA, 2017b).

3.2 Caso específico, descripción del problema.

Como se describió anteriormente la cuenca del río Coello tiene una gran relevancia en el departamento del Tolima y a nivel nacional, pues es una de las más grandes aportantes a la Macrocuena del Magdalena-Cauca. A continuación, se describirá la oferta y demanda hídrica que esta cuenca presenta.

La cuenca mayor del río Coello tiene un caudal medio de 31,24 m³/s, con una oferta hídrica neta de 30,90 m³/s, con un caudal ecológico de 0.34 m³/s (CORTOLIMA, 2017c).

Igualmente, en Colombia se maneja el índice de escasez el cual, representa la demanda de agua que ejercen en conjunto las actividades económicas y sociales para su uso y aprovechamiento frente a la oferta hídrica disponible. La cuenca mayor del río Coello posee un índice de escasez de 0,77 lo que se considera alto e indica una demanda alta de agua (CORTOLIMA, 2017c).

A continuación, se describen los principales tipos de demandas hídricas presentes en la cuenca del río Coello. La primera demanda hídrica importante es la de consumo humano la cual, de acuerdo con el POMCA de la cuenca citada, se calcula mediante el uso de coeficientes estándares de consumo básico diario de agua por habitante, establecidas por el IDEAM: 170 litros/habitante/día (CORTOLIMA, 2017c).

El cultivo de arroz constituye la principal actividad agrícola y económica del Departamento, y por lo tanto es la actividad con mayor demanda hídrica la cual se calcula alrededor de los 500.036 Millones de metros cúbicos al año (0,016m³/s). También se destacan las hortalizas con 1.45 Millones de metros cúbicos al año, las frutas con 40.662 Millones de metros cúbicos al año y el Sorgo y el Algodón con 20.500 Millones de metros cúbicos al año (CORTOLIMA, 2017c).

Como se explicó anteriormente, aunque la cuenca del río Coello provea abundante agua, las demandas agrícolas y de consumo humano están creando problemas de escasez en la región, por lo que es necesario un estudio de asignación de agua para complementar los esfuerzos e investigaciones adelantadas por la Corporación Autónoma del Tolima, CORTOLIMA. Así mismo, debido al alcance de este trabajo, se utilizarán las demandas hídricas de consumo humano en las ciudades principales como Ibagué, Cajamarca y Espinal, y la del cultivo de arroz por su relevancia económica en la región.

3.3 Relevancia del análisis de la asignación de agua en Coello

El río Coello es un afluente importante del río Magdalena, y con el objetivo de cumplir el plan de acción nacional desarrollado por la PNGIRH, en donde se propone el conocimiento del estado de todos los sistemas hídricos del país. Este trabajo propone una herramienta

general de apoyo a la evaluación de la asignación de agua actual y futura, que se probará en la cuenca del río Coello, pues como se mencionó en capítulos anteriores las demandas hídricas en la región están afectando la disponibilidad del recurso.

El departamento del Tolima es catalogado como el centro alimentario del país, por lo que es de gran importancia evaluar y mejorar la asignación de agua actual, para que en todos los puntos de demanda hídrica haya disponibilidad del recurso a lo largo de los periodos climatológicos del año.

3.4 Recolección y procesamiento de datos.

Para la evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Coello, se contactó con la corporación autónoma del Tolima, CORTOLIMA, y se solicitaron las concesiones de agua activas a la fecha (ver anexo 1). Igualmente se reutilizaron los datos utilizados por Harliana, Meiline en su trabajo de grado titulado “Development of a Web-Based Water Allocation Model”.

Dichos datos tienen series de caudal disponible en la cabecera de la cuenca, desde 1980 hasta el 2013 en milímetros al mes. Dichos caudales fueron calculados a partir del modelo hidrológico WFLOW, desarrollado por **Deltares**. Igualmente, dentro del paquete de datos mencionados también se obtuvieron datos de demanda para irrigación en el mismo periodo de tiempo (ver anexo 1). Los cuales fueron calculados como la evapotranspiración de referencia menos la precipitación medida en la cuenca para el estudio “Adaptation to Climate change in Colombia” realizado igualmente por **Deltares** en compañía de **IHE-Delft**.

Adicionalmente, para los datos de demanda doméstica (población, industria y minería) se tomaron las proyecciones de unidades de consumo y su demanda anual de agua realizadas en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, realizado por **Deltares** en compañía con **IHE-Delft** (Deltares & Institute for Water Education IHE, 2014).

Capítulo 4

Análisis comparativo de las herramientas disponibles en el mercado para realizar modelos de asignación de agua en una cuenca

4.1 WEAP

WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos cuyo propósito es ayudar a los expertos en la planificación.

WEAP funciona usando el principio básico del balance hídrico, puede ser aplicado en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas transfronterizos. Por otra parte, WEAP puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo la escorrentía por precipitación, flujo base y recarga de aguas subterráneas por precipitación; análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos de agua y propiedades de asignación (Johnson et al., 1995).

El análisis representa el sistema en términos de sus diversas fuentes de suministro, extracción, transferencia y plantas de tratamiento de agua residual; demandas de agua; generación de contaminación y requisitos de los ecosistemas (Stockholm Environment Institute (SEI), 2015).

4.2 Ecuaciones utilizadas en WEAP

4.2.1 Balance hídrico

En WEAP la relación de las variables hidrológicas que entran y salen del punto de control se realiza a nivel mensual y nodo a nodo en la estructura topológica. Esta relación se calcula a partir de las ecuaciones de balance de masa en el punto de control aplicada de la siguiente manera:

$$Vin_{i,j} - Vout_{i,j} = \Delta S_{i,j} \quad [1]$$

Donde:

- i es el índice para el nodo
- j es el índice para el mes.
- $V_{in_{i,j}}$ es el volumen de agua que entra al punto de control en forma de precipitación o caudal de escorrentía para el nodo i en el mes j .
- $V_{out_{i,j}}$ es el volumen de agua que sale del punto de control en forma de caudal de escorrentía, evaporación o caudal extraído para suplir demandas, en el nodo i y en el tiempo j .
- $\Delta S_{i,j}$ será el almacenamiento generado en embalses o acuíferos, en el nodo i y en el tiempo j .

Cada nodo tiene su ecuación de balance hídrico (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), y adicionalmente ecuaciones que restringen la entrada de agua a los nodos como:

$$V_{in_{i,j}} \leq \text{Requerimientos}_{i,j} \quad [2]$$

Donde:

- $\text{Requerimientos}_{i,j}$ será el volumen de agua que requiera cada nodo i en el mes j para suplir sus demandas. Los cuales nunca podrán ser superior al volumen de agua disponible que entre a cada nodo.

Para la asignación de agua en la cuenca es importante establecer prioridades en cada tipo de nodo, WEAP tiene preestablecido dos prioridades, establecerá la más alta para las demandas domésticas y la más baja para el llenado de embalses. Si todos los nodos tienen la misma demanda, WEAP tratara de satisfacer la demanda hídrica de forma equitativa y simultánea.

Usando la prioridad de las demandas y las preferencias de suministro, WEAP determina el orden de asignación de agua. Todos los enlaces de transmisión de caudal y requerimientos de caudal con la misma priorización son calculados al mismo tiempo. Por ejemplo; el caudal a través de las conexiones de transmisión con prioridad 1 serán calculadas, mientras que las otras conexiones con prioridad 2 o menor serán establecidas temporalmente en cero. Una vez se hayan determinado los caudales para las conexiones de prioridad 1, se

calcularán las conexiones con prioridades 2, mientras que las conexiones con prioridad 3 o menor serán puestas en cero temporalmente, y así sucesivamente.

4.2.2 Demanda de agua potable

La cantidad de agua potable requerida por cada nodo es calculada como:

$$Dom_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [3]$$

Dónde:

- $Actividad_Anual_{i,j}$ Es la cantidad de unidades de consumo que anualmente requieren agua.
- $Uso_{i,j}$ Es la cantidad de agua que cada unidad de consumo requiere en un año.
- $Dom_Demand_{i,j}$ Son los requerimientos de agua potable de un nodo.

4.2.3 Demanda de agua para irrigación

La cantidad de agua requerida para la irrigación de las plantas en cada nodo es calculada como:

$$Irr_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [4]$$

Dónde:

- $Actividad_Anual_i$ Es la cantidad de áreas irrigables que anualmente se cultivan.
- Uso_i Es la cantidad de agua que se requiere por área de irrigación en un año.
- Irr_Demand_i son los requerimientos de agua para irrigación por nodo en un año.

4.2.4 Almacenamiento de agua

Los embalses son representados a partir de unas zonas de uso predefinidas. Dichas zonas son: zona de control de crecientes, zona de conservación, zona de amortiguamiento y zona inactiva.

Para definir estas zonas se deben ingresar los volúmenes correspondientes al máximo de cada una. WEAP permite que el embalse suelte agua de forma libre, si su volumen se encuentra en la zona de conservación.

Cuando el volumen baja de la zona de conservación y llega a la zona de amortiguamiento la cantidad de agua liberada por el embalse estará en función de la siguiente ecuación:

$$Month_Release_{i,j} \leq BC * \forall agua_ZA_{i,j} \quad [5]$$

Donde:

- $Month_Release_{i,j}$, es la cantidad de agua disponible en el embalse i para ser liberada en cada mes j del año.
- $\forall agua_ZA_{i,j}$, es el volumen de agua en la zona de amortiguamiento en cada mes del año.
- BC , es el coeficiente de amortiguación el cual, entre más cercano a 1 este generará un mayor cubrimiento de la demanda y una rápida liberación del volumen de agua almacenado. Si es cercano a cero, mantendrá los niveles del embalse, pero no se suplirán completamente las demandas.

4.3 Estructuración de la topología de la cuenca

Para iniciar el proceso de configuración del modelo en WEAP, se debe contar con una licencia, la cual se solicita en la página: <https://www.weap21.org/>, donde también se encuentran las instrucciones de descarga e instalación. Igualmente, en la página mencionada está disponible un tutorial para aquellos que trabajan por primera vez a esta herramienta.

Una vez instalado WEAP, en la pantalla principal a la izquierda aparecerán varias herramientas de dibujo según los tipos de nodo que este software puede representar en su proceso de asignación de agua. Para el desarrollo de la cuenca de estudio se necesitarán;

River: el cual representa gráficamente los ríos de forma esquemática.

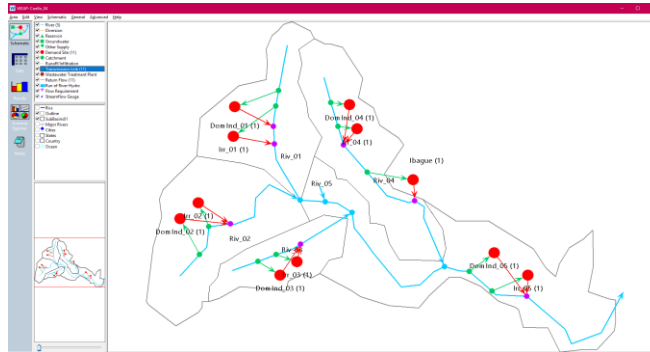
Demand Site: el cual representa un punto de demanda de caudal, que puede ser para suplir demandas domesticas o para irrigación.

Transmission link: permite extraer el caudal demandando por los nodos ("Demand Site") y asignarlo a cada uno de ellos.

Return Flow: permite devolver el caudal de los puntos de demanda aguas abajo de la extracción.

Reservoir: permite la representación de los embalses dentro del entorno de la herramienta.

Luego de determinar los tipos de nodos requeridos, se prosigue a dibujar la estructura topológica de la cuenca. La configuración topológica se muestra en la Ilustración 5.



*Ilustración 5 Configuración topológica de la cuenca de estudio en WEAP
Fuente: Propia.*

4.3.1 Ingreso de datos.

A continuación, se ilustrarán los datos necesarios para la configuración del modelo de la cuenca en estudio.

4.3.1.1 Caudales de entrada.

Una vez estructurada la topología de cuenca, se ingresan los datos de caudal disponible, que para este trabajo fueron calculados a partir de un modelo hidrológico desarrollado en WFLOW. Dichos datos se cargan al modelo a través del ayudante para la lectura de archivos en formato .csv que posee WEAP.

4.3.1.2 *Demandas de agua*

En la ventana de Datos, se encuentra la pestaña Demand Sites, al desplegarla se encuentra la configuración de los nodos de demanda (doméstica y de irrigación). Esta configuración requiere la siguiente información: Unidades de demanda como número de personas en la ciudad, industrias o puntos de extracción minera, también requiere demanda de agua anual por unidad, variación mensual de la demanda, si la hay, y el consumo que se genera en la unidad. La serie de datos se obtuvieron como se explicó en la sección 3.4. y serán los mismos que se utilizarán para RIBASIM y HiWEB.

4.3.1.3 *Asignación de características de los embalses.*

En la ventana de datos se encuentra la pestaña Recursos y Suministros. Al desplegarla encontramos la pestaña río y luego Embalses, al desplegar esta última se encuentran los requerimientos de datos para la modelación de los embalses. Dicha configuración requiere la siguiente información: Capacidad de almacenamiento en volumen anual y la curva de almacenamiento. Los datos ingresados en esta sección son los explicados en la sección 3.4 y será en este caso lo mismo que se ingresarán para RIBASIM y para HiWEB

4.4 RIBASIM

Es un paquete de modelación genérico para analizar el comportamiento de los ríos y cuencas bajo diferentes condiciones hidrológicas. Es un paquete de modelación flexible y amigable con el usuario en el cual las entradas hidrológicas al sistema son unidas o relacionadas a varias ubicaciones con requerimientos de agua específicos dentro del sistema.

RIBASIM le permite al usuario evaluar una variedad de manejos y evaluaciones relacionadas con la infraestructura, operación y demanda hídrica. Así mismo, permite

evaluar los resultados en términos de calidad y cantidad de agua. RIBASIM provee una herramienta de análisis, dando diferentes puntos de vista en el origen del agua disponible en cualquier lugar de la cuenca (Omar, 2014).

Este software es un instrumento de modelación para la planeación y manejo de las cuencas. Está diseñado para realizar cualquier análisis en donde se requiera la inclusión del balance de agua. El resultado de este balance de agua provee la información básica sobre la cantidad de agua disponible, así como, el comportamiento del flujo en cualquier lugar y momento dentro de la cuenca. Igualmente, proporciona los medios para evaluar dichos balances con los detalles requeridos, teniendo en cuenta el drenaje de la agricultura, los vertidos de la industria y la reutilización aguas abajo. Se generan varios parámetros de rendimiento de cuenca para la evaluación de las situaciones simuladas (Omar, 2014).

4.5 Ecuaciones utilizadas en RIBASIM

4.5.1 Balance hídrico

En RIBASIM la relación de las variables hidrológicas que entran y salen del punto de control se realiza dependiendo del intervalo de tiempo que se haya configurado en el archivo de datos (día, mes, hora, etc.), y en la red se realiza nodo a nodo. Esta relación se calcula a partir de las ecuaciones de balance de masa aplicada en el punto de control de la siguiente manera:

$$Q_{in_{i,j}} - Q_{out_{i,j}} = \Delta Q_{i,j} \quad [6]$$

Donde:

- $Q_{in_{i,j}}$ es el caudal que entra al punto de control en forma de escorrentía para el nodo i en el tiempo j .
- $Q_{out_{i,j}}$ es el caudal de agua que sale del punto de control en forma de caudal de escorrentía o caudal extraído para suplir demandas, en el nodo i y en el tiempo j .
- $\Delta Q_{i,j}$ será el caudal que siga como caudal disponible para el nodo i aguas abajo en el tiempo j .

En los enlaces categorizados como “Diversion” irá el caudal requerido por el nodo en su totalidad, se suplirá la demanda y se devolverá el porcentaje de caudal que se haya establecido como caudal de retorno en la configuración.

Para RIBASIM es indiferente si hay o no agua disponible en el enlace directamente aguas arriba del nodo, en el caso no de haber suficiente agua para suplir los requerimientos, este pondrá el caudal faltante como negativo, y seguirá haciendo los cálculos del balance de masas con los caudales faltantes hasta llegar al nodo final de la cuenca “outflow”.

4.5.2 Demanda de agua potable

Para la demanda de agua potable se utilizaron los mismos valores de la sección 3.4 para uso y número de habitantes. A continuación, se muestra el cálculo para la demanda del nodo de consumo 1, vinculado con el río 1 de la cuenca.

En el estudio, “Adaptation to Climate Change in Colombia”, se determinó que el consumo diario de una persona son 0.125 metros cúbicos. Adicionalmente, se determinó que para el nodo de consumo 1 la población era de 50.000 mil personas. Por lo que:

$$Q_{consumo} = \text{numero de personas} * \frac{\text{caudal} \left[\frac{m^3}{\text{persona} - \text{dia}} \right]}{\text{segundos de un dia}} \quad [7]$$

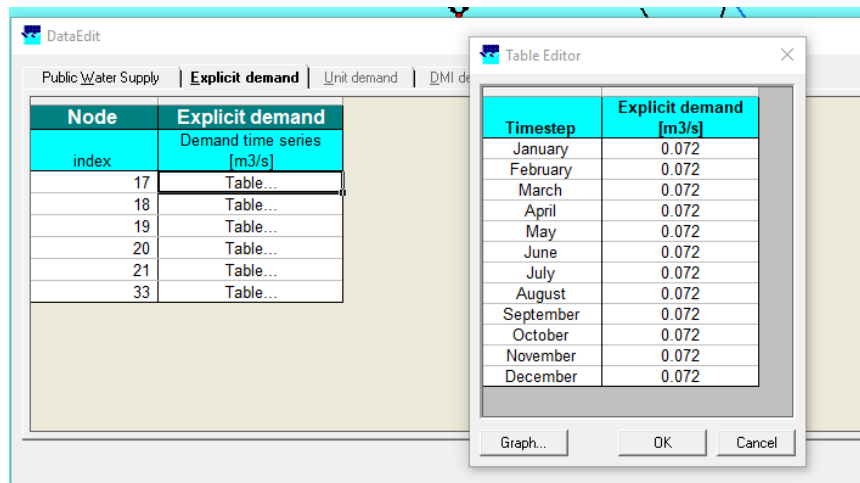
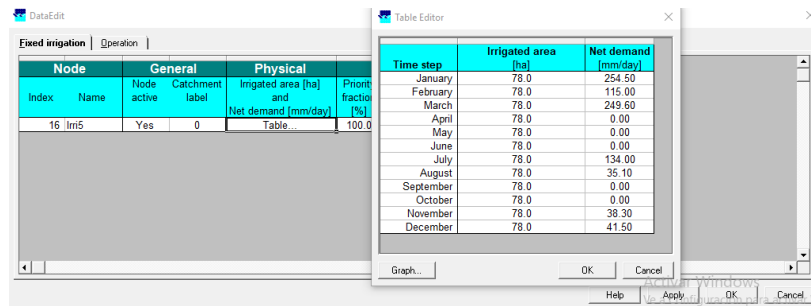


Ilustración 9 Demanda de consumo RIBASIM

Fuente: Propia

4.5.3 Demanda de agua para irrigación

Para la demanda de irrigación se utilizó la serie de datos proporcionada en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, y se ingresó de forma explícita.



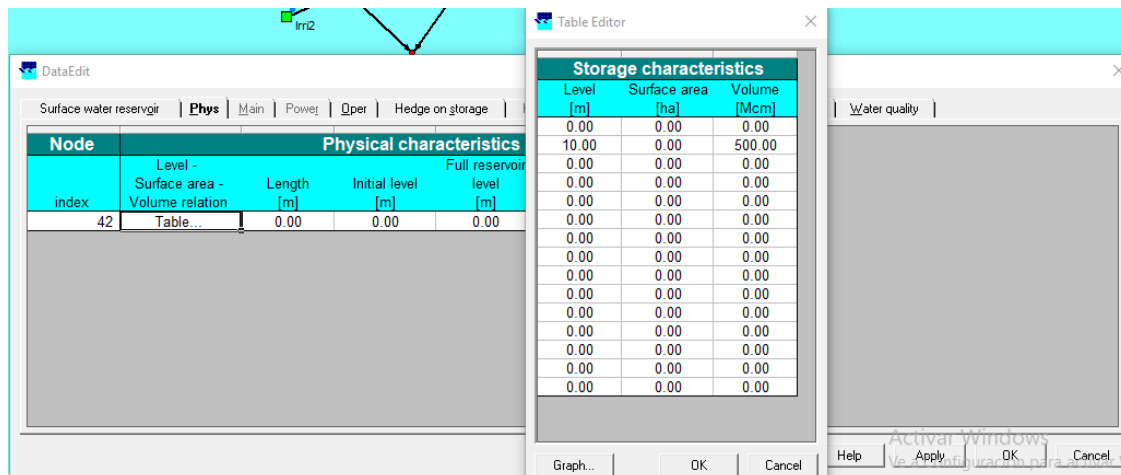
The screenshot displays two overlapping windows from the RIBASIM software. The 'DataEdit' window shows the 'Fixed irrigation' configuration for node 'Irr5', with a priority fraction of 100.0. The 'Table Editor' window is open to edit the irrigation data table.

Time step	Irrigated area [ha]	Net demand [mm/day]
January	78.0	254.50
February	78.0	115.00
March	78.0	249.60
April	78.0	0.00
May	78.0	0.00
June	78.0	0.00
July	78.0	134.00
August	78.0	35.10
September	78.0	0.00
October	78.0	0.00
November	78.0	38.30
December	78.0	41.50

Ilustración 10 Demanda por irrigación RIBASIM
Fuente: Propia

4.5.4 Almacenamiento de agua

Para la caracterización de los embalses se utilizó la curva de regulación proporcionada en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, y se ingresó de forma explícita.



The screenshot shows the 'DataEdit' window for 'Surface water reservoir' node 'Irr2' and a 'Table Editor' window. The 'Physical characteristics' window shows values for surface area, length, and initial level. The 'Storage characteristics' window displays a table for defining the reservoir's storage curve.

Level [m]	Surface area [ha]	Volume [Mcm]
0.00	0.00	0.00
10.00	0.00	500.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00

Ilustración 11 Curva de regulación RIBASIM

Esta curva fue supuesta por los tomadores de decisiones para un escenario ficticio de regulación de agua para la cuenca de estudio. Dicho escenario se explica en el documento “Adaptation to Climate Change in Colombia”.

4.6 Configuración del modelo de la cuenca en RIBASIM

4.6.1 Estructuración de la topología de la cuenca

Para iniciar la configuración del modelo en RIBASIM se debe contar con una licencia educacional. La misma se puede solicitar al correo Wil.vanderKrogt@deltares.nl. Con la licencia se provee una guía rápida de instalación. La misma contiene videos tutoriales y ejemplos de aplicación.

Una vez instalado el RIBASIM, se abrirá y se seleccionará el botón nombrado “Add Basin” en donde se deberá asignar el nombre de la cuenca de estudio, para este trabajo Coello.

Inmediatamente después, se ingresará al botón “Open and Simulate”, se selecciona la cuenca creada y se abrirá la ventana principal de RIBASIM.

A continuación, se configurará el escenario seleccionando en la barra de herramientas, Caso, nuevo caso y asignándole un nombre. En seguida, se selecciona Select Scenario's measurement and strategies, para establecer los archivos de donde serán leídos los datos para la modelación. Los archivos deberán estar previamente configurados.

A continuación, se selecciona “Specify simulation control data” para configurar el tiempo de modelación que deberá estar dentro del rango de fechas de los datos ingresados.

El siguiente paso es seleccionar “Edit network and data base on map” en donde se encontrará la ventana mostrada en la Ilustración 14. En ella se selecciona “Edit network”. En este espacio se dibuja la topología de la cuenca siguiendo el flujo del agua al conectar los nodos.

RIBASIM tiene diferentes tipos de nodos y de enlaces para conectar dichos nodos. Dentro del espacio de edición de la topología se encontrarán los siguientes tipos de nodos:

Inflow”, en donde se asignan los caudales de entrada.

“Public Water Supply”, el cual representa la demanda de agua potable.

“Fix Irrigation”, el cual representa la demanda de agua para irrigación.

“**SW reservoir**”, el cual representa el almacenamiento de agua en los embalses. “**Diversión**” el cual representa la extracción de caudal para suplir las demandas. “**OutFlow**” el cual representa la salida de la cuenca.

Así mismo, los diferentes tipos de uniones entre nodos también debe ser seleccionadas. Se deberá utilizar:

“**SW Flow**” el cual representa el flujo de caudal en el río de un nodo a otro. “**Diverted Flow**” el cual representa la conducción del caudal demandado a los puntos de demanda.

4.6.2 Ingreso de datos.

A continuación se ilustra el proceso necesario para el ingreso de datos en RIBASIM.

4.6.2.1 Configuración archivos

Se recomienda instalar los archivos en la raíz de alguno de los discos duros como se muestra en la Ilustración 16.

Una vez ubicado el programa se accede a la cuenca creada. Dentro de esta carpeta principal se encontrarán otras carpetas secundarias en donde se configuran los archivos de texto para el modelo. Primero se ingresa a la carpeta “Hydrolog”, en la cual se encontrarán varios escenarios por defecto de RIBASIM . El escenario que se vaya a modificar debe coincidir con el que se haya establecido en el paso anterior, como se ve en la Ilustración 17

Una vez en la carpeta del escenario correspondiente se abre el archivo “ACTINFLW.TMS”. Dentro de este archivo están las instrucciones para editarlo con los datos correspondientes a la cuenca de estudio, como Número de estaciones, unidad de la serie de datos, nombre de la estación, Identificación de la estación (ID), y los datos típicos de las series de datos (año, intervalo de tiempo, y el valor de la serie). La serie de datos utilizada en este trabajo es la misma de la sección 4.3.1.1.

4.6.2.2 Asignación de caudales

Una vez configurados los archivos con los datos del modelo, se regresa a la sección de edición de la red de RIBASIM.

En el nodo “inflow” se selecciona, datos del modelo, Modelo de simulación con el botón derecho. En la pestaña variable de la ventana de edición de datos, se asigna la identificación de cada nodo de la serie de tiempo correspondiente del archivo ACTINFLW.TMS. (Ver Ilustración 18)

4.6.2.3 Asignación de demandas hídricas

- Consumo.

La demanda por consumo se asigna en la ventana de edición de red, seleccionando con el botón derecho el nodo de consumo, datos del modelo, modelo de simulación.

Aunque la demanda de consumo se puede calcular de varias formas, en este trabajo de grado se utilizó la forma explícita, y se ingresó el caudal demandado mensualmente en cada nodo en metros cúbicos por segundo. Esta demanda se calculó de la misma forma que en la sección 3.4

- Irrigación.

De manera similar, la demanda por irrigación se asigna seleccionando el nodo de irrigación, datos del modelo, modelo de simulación en la ventana de edición de la red.

En la sección “Physical” de la ventana de edición de datos se ingresar una tabla con los valores de área irrigada y demanda neta mensual por nodo. Estos datos son los mismos que se mencionaron en la sección 3.4.

Igualmente, se pedirán datos de operación como la eficiencia de riego superficial y subsuperficial y el porcentaje de flujo devuelto como escorrentía superficial y como flujo subterráneo. De tener los valores se deberán ingresar. Para este trabajo se utilizaron los valores por defecto.

- Asignación de características de los embalses.

Las características de los embalses se asignan en la ventana de edición de red, seleccionando con el botón derecho el nodo de consumo, datos del modelo, modelo de simulación.

Utilizando las diferentes pestañas de la ventana de edición de datos se introducen la superficie de agua en el embalse, las características de almacenamiento, en donde deberá ingresar la curva de regulación del embalse (nivel en metros, área superficial en hectáreas y volumen en metro cubico al mes) y las reglas de operación, en donde se ingresan los niveles mensuales para control de flujo, almacenamiento constante y altura deseada del embalse.

Capítulo 2

Estado del arte

2.5 Evolución del concepto “Gestión Integrada de Recursos Hídricos”

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos se define como un proceso en donde se promueve el desarrollo y control coordinado del agua, tierra y recursos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas y el ambiente” (Global Water Partnership, 2019).

Dicho concepto, que desde ahora llamaremos GIRH (en inglés Integrated Water Resources Management IWRM), se ha convertido en una de las iniciativas más discutidas por los gobiernos y cuyos inicios se podrían establecer a finales de los años 70's en la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Agua, en Mar de Plata 1977 (Rahaman & Varis, 2005).

En esta conferencia uno de los principales objetivos fue valorar el estado de los recursos hídricos, y con esto asegurar que existiera un suministro adecuado de agua para satisfacer las necesidades socioeconómicas futuras del planeta. Se logró aprobar el “Plan de Acción Mar de Plata”, el cual fue la primera aproximación internacional de la GIRH.

Quince años después tuvo lugar la conferencia internacional sobre el agua y el ambiente en Dublín, Irlanda. En la cual se establecieron cuatro de las principales recomendaciones para realizar acciones a nivel local, nacional e internacional.

- Se reconoció que el agua dulce es un recurso finito, vulnerable y esencial por lo que se sugirió que el agua es un recurso que debe ser manejado de forma integral.
- Se sugirió que las participaciones involucran usuarios, planeadores y gobernadores en todos los niveles de control y desarrollo.
- Se reconoció el papel central que juegan las mujeres en los temas relacionados con la provisión, manejo y seguridad de abastecimiento del agua en las poblaciones.
- Se sugirió que el agua debe ser tratada como una bien económico (Rahaman & Varis, 2005).

Por lo que, uno de los grandes logros de la conferencia de Dublín fue lograr involucrar a los usuarios del agua, desde los niveles más alto de liderazgo hasta las pequeñas

comunidades para que participen activamente en la gestión de los recursos hídricos de sus regiones.

En el 2000, el segundo foro mundial del agua se llevó a cabo en La Haya, Países Bajos. Participaron no solo expertos y gobernantes sino también toda clase de usuarios del agua de países desarrollados y en vía de desarrollo. En este foro se discutieron los retos para la implementación, lo que conllevó a que la visión transmitida en el foro se convirtiera en planes de acción en los países participantes (The & Rijsberman, 2000).

Este esfuerzo conjunto lideró la creación de lo que hoy se conoce como La Sociedad Global del Agua (Global Water Partnership), y el espacio permanente para la discusión de la GIRH en la agenda política de muchos países (The & Rijsberman, 2000).

En 1992, tuvo lugar La Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible en Rio, Brasil. En esta cumbre el concepto de GIRH fue objeto de largas discusiones sobre lo que significa ponerlo práctica (Abbas & Xuan, 2017). Igualmente, se aceptó la GIRH como un concepto “sombrija” que abarca interacciones complejas entre los sistemas de recursos hídricos, el ambiente y los sistemas sociales. Por lo que, fue categorizado como un paradigma ingenieril basado en “predecir y proveer” (Rahaman & Varis, 2005).

Así pues, al inicio de los años noventa la GIRH empezó a ser reconocida como un proceso multisectorial, multiregional y multidimensional. En el 2012, La Sociedad Global del Agua dio una de las definiciones más aceptadas actualmente por los expertos y científicos en el área. Se definió la GIRH como “un proceso en donde se promueve el desarrollo y control coordinado del agua, tierra y recursos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas y el ambiente” (Global Water Partnership, 2019).

De ahí que, la efectividad de las estrategias para lidiar con los problemas de calidad y cantidad de agua y su variabilidad, tiene un gran impacto en la calidad de vida y supervivencia de todas las especies. Por lo que, lograr la efectiva implementación de un plan de GIRH en los países reforzará la seguridad alimentaria y el acceso al recurso hídrico.

En 2010, en Colombia, se desarrolló la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), en la cual, se planteó un plan de acción para la planeación,

administración, seguimiento y control y manejo de conflictos de los recursos hídricos en el país (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En esta política se realizó un diagnóstico del estado del recurso hídrico, incluyendo la oferta y disponibilidad de agua, la demanda, la calidad y los riesgos asociados al mismo. Con este diagnóstico se crearon las herramientas de planeación como los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH) y los planes de manejo (PM).

A diciembre del 2016, alrededor de 420 procesos de ordenación de cuencas hidrográficas se habían iniciado, lo que corresponde a un área aproximada de 38.2 millones de hectáreas, equivalentes al 36.2% del territorio Colombiano (IDEAM, INVEMAR, SINCHI, IIAP, & IAvH, 2016).

2.5.1 Planeación y manejo de los recursos hídricos.

Las actividades de planeación y manejo de los recursos hídricos son comúnmente impulsadas por problemas que se deben resolver o por oportunidades en las que se identifican beneficios en el uso del agua y la tierra (Beek, 2017).

Existen dos aproximaciones para planear y manejar los recursos hídricos. La primera es de arriba hacia abajo, comúnmente llamado comando y control "*command and control*". La otra forma es desde abajo hacia arriba comúnmente llamado aproximación pasto-raíces "*grass-roots approach*". En este trabajo de grado se utiliza el segundo método, el cual es explicado a continuación.

2.5.1.1 Método de abajo hacia arriba. "grass-root approach".

Durante la última década, el proceso de planeación de los recursos hídricos ha involucrado la participación activa de los interesados; aquellos que se ven afectados de alguna manera por la gerencia del río.

La planificación ascendente debe esforzarse por lograr una visión común o "compartida" de las metas y prioridades entre todas las partes interesadas. Debe conocer y cumplir con todas las leyes y regulaciones aplicables. Debe esforzarse por identificar y evaluar múltiples alternativas y criterios de desempeño, incluidos los criterios de sostenibilidad. Para poder

hacer esto, los planificadores deben usar tecnología de información moderna, según esté disponible, para mejorar tanto el proceso como el producto. Esta tecnología, sin embargo, no eliminará la necesidad de llegar a conclusiones y tomar decisiones sobre la base de datos incompletos e inciertos y el conocimiento científico (Beek, 2017).

2.6 Desarrollo de los sistemas de apoyo a toma de decisiones.

Como se explicó anteriormente poner en práctica la GIRH es un proceso complejo, no solo por las múltiples interacciones entre los usuarios, sino también por la información que se requiere. Es por esto que la GIRH se apoya fuertemente en las herramientas de modelación computacionales, entre las cuales, los Sistemas de Apoyo a las Decisiones (DSS) han cumplido un papel fundamental en el respaldo tecnológico para tomadores de decisiones.

El uso de los modelos computacionales en la GIRH sigue dos necesidades básicas; conocer cuantitativamente el estado del recurso hídrico en un lugar dado; y asignar este recurso de forma óptima y eficiente bajo ciertas restricciones.

Los DSS nacieron entonces, hace más o menos 20 años con los trabajos de Keen and Scott Morton (1978), Bonezek (1980) y Sprague y Carlson (1982) entre otros (Rajasekaram & Nandalal, 2005). Fundamentalmente los DSS tienen el objetivo de asistir en el desarrollo de la toma de decisiones estructuradas o semiestructuradas en un campo multidisciplinario dentro de la teoría de toma de decisiones (Hess, Rees, & Rakes, 2000). Gracias a múltiples investigaciones en diferentes áreas técnicas y de aplicación en la ingeniería han sido fácilmente adoptados en diferentes áreas como: sistemas de gestión en la generación de diálogos (DGMS); Sistemas de administración de modelos (MBMS) y los sistemas de administración de bases de datos (DBMS) (Rajasekaram & Nandalal, 2005).

Un sistema de apoyo a las decisiones (DSS) en la GIRH es un sistema de computadora interactivo e integrado que consiste en el análisis de información y la capacidad de gestionar la información, diseñado para apoyar a los tomadores de decisiones quienes son los encargados de resolver problemas relacionados con la gestión del agua (Adler, 2013). En este contexto entonces, los tomadores de decisiones son los planeadores, gerentes, operadores y gobernantes de los sistemas de recursos hídricos a cargo de resolver problemas relacionados con el agua.

A su vez, el proceso de toma de decisiones en la GIRH sigue un proceso cíclico el cual tiene 4 fases; recolección y procesamiento de la información; análisis del problema; uso de herramientas de apoyo a la toma de decisiones; implementación de la decisión (Rajasekaram & Nandalal, 2005). De la misma forma, los DSS para la gestión de los recursos hídricos consisten en tres subsistemas principales integrados; una interfaz para el usuario; un conjunto de herramientas de modelación; y almacenamiento masivo de datos y manejo de los mismos (base de datos) (Adler, 2013).

2.7 Herramientas actuales para el análisis y evaluación de la asignación de agua en las cuencas.

Como se presentó en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el concepto de GIRH empezó a tomar fuerza a finales de los años 70's, y con esto el desarrollo de las herramientas computacionales que apoyan técnicamente el desarrollo y análisis de los problemas de interacciones entre usuarios del agua.

Actualmente en el mercado existen varias herramientas que apoyan la evaluación y planeación de la asignación del recurso hídrico en las cuencas, entre estas herramientas se pueden destacar los siguientes softwares: RIBASIM, WEAP, Modsim-DSS e HydroBID.

De estas herramientas la primera en ser lanzada al mercado fue RIBASIM en 1965 por la empresa de consultoría holandesa DELTARES. Esta herramienta fue desarrollada como una aproximación integral al sistema hídrico. RIBASIM es un paquete de modelación genérica que analiza el comportamiento de las cuencas hidrográficas en diversas condiciones hidrológicas (Omar, 2014). Este paquete de modelación es flexible e integral que involucra una variedad de medidas relacionadas con la infraestructura, la gestión operativa, y de la demanda adicional a los términos en cantidad y calidad del agua.

Siguiendo el camino trazado por RIBASIM, fue lanzada al mercado herramienta WEAP en 1988, por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo. WEAP fue creado con el objetivo de ser una herramienta de planeación flexible integral y transparente para evaluar la sustentabilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance (Stockholm Environment Institute (SEI), 2015).

En el 1978, fue lanzado al mercado Modsim-DSS por la Universidad Estatal de Colorado en Estados Unidos. MODSIM-DSS es un sistema generalizado de Apoyo a la Decisión de la cuenca fluvial y un modelo de flujo de red, diseñado específicamente para satisfacer las crecientes demandas y presiones de los administradores de cuencas hidrográficas en la actualidad. Así mismo, está estructurado como un sistema de apoyo a la decisión, con una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite a los usuarios crear cualquier topología de sistema de cuenca fluvial. Las estructuras de datos incorporadas en cada objeto modelo se controlan mediante un sistema de administración de bases de datos, que también se consulta mediante la simple activación del mouse (Berhe, Melesse, Hailu, & Sileshi, 2013). Estas tres herramientas fueron las únicas disponibles por un largo tiempo, pues eran las únicas que estaban apoyando computacionalmente los desarrollados de los planes de GIRH.

Y finalmente, la herramienta más actual en salir al mercado fue HydroBID, desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo en el 2016. HydroBID es una herramienta que permite gestionar y planificar los recursos hídricos de manera eficiente a través de modelos de simulación de disponibilidad presente y futura. Este es un software está integrado por dos componentes: un modelo numérico que incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad de volúmenes y caudales de agua dulce a escalas regionales, a nivel de cuencas y de sub-cuencas; y una base de datos con la delimitación, pre-parametrización y conectividad de aproximadamente 250 mil cuencas de América Latina y el Caribe. Adicionalmente, cuenta actualmente con módulos de manejo de embalses y transporte de sedimentos e interacción con aguas subterráneas. Además de las funciones principales, esta herramienta aporta información necesaria para la realización de tareas adicionales como soporte para la toma de decisiones, estimación de costos y beneficios de las medidas de adaptación, ayuda en la decisión de los diseños alternativos de proyectos de infraestructura, así como políticas de gestión de recursos hídricos (Nalesso, n.d.).

Es así que, a medida que la GIRH toma fuerza en la planeación de las cuencas, al mismo tiempo, el desarrollo de las herramientas computacionales se vuelve más importante. Por lo que, en este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta que apoya el desarrollo y la planeación de la GIRH y será comprada y validada con dos de las mencionadas anteriormente, WEAP y RIBASIM.

2.8 Aporte de este trabajo al área de conocimiento

En este trabajo se presenta una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en línea, que tiene la capacidad de recolectar, procesar y analizar la información de oferta y demanda de un sistema de recursos hídricos.

HiWEB es una herramienta de asignación de agua la cual, a partir de la ecuación de balance hídrico logra darles a los usuarios del agua y tomadores de decisiones información del estado de la oferta y demanda hídrica en su cuenca. Por lo que, con esta herramienta se pretende dar apoyo tecnológico y científico a los planes de GIRH que se quieran implementar, especialmente en el plan de acción de Colombia con la PNGIRH.

Como se mencionó anteriormente en Colombia hay un plan de GIRH en acción. Este plan tiene cuatro objetivos importantes; Conocimiento detallado de la oferta; Conocimiento detallado de la demanda; Conocimiento de la calidad actual del recurso hídrico nacional y Riesgo asociado la oferta y disponibilidad del agua (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). De estos cuatro objetivos, HiWEB como herramienta de análisis de la asignación de agua dentro de cada sistema, podrá ayudar de primera mano en los primeros dos objetivos y en segundo plano en el tercer y cuarto objetivo.

Por lo que, se espera que con el desarrollo de esta herramienta se implementen análisis de asignación de agua en los procesos presentes y futuros que se desarrollen en el país.

Capítulo 3

Caso de estudio

3.5 La cuenca del río Coello.

El río Coello nace en el cono del nevado del Tolima en la Cordillera Central. Empieza su recorrido a los 3.600 m.s.n.m recorre 9,8Km aproximadamente hasta los 2.150 m.s.n.m, dicho recorrido lo realiza con una pendiente media de cauce de 18%. Continúa su recorrido aproximadamente 17,9 Km hasta una cota de 1.400 m.s.n.m y con una pendiente media de cauce de 5,4%. En el límite con Ibagué recibe río Bermellón y sigue su recorrido hasta llegar al río Magdalena.

La cuenca del río mayor del río Coello desde su nacimiento hasta su desembocadura, posee una longitud de 124,76 Km y sus aguas corren en sentido Occidente – Oriente drenando una extensión de 184.257 Ha correspondientes aproximadamente al 7,8% del área total del departamento del Tolima, lo que la hace la tercera más grande del departamento. (CORTOLIMA, 2017a).

Esta cuenca está localizada al occidente del Departamento del Tolima en el costado Central – Oriental de la cordillera Central, enmarcada en las coordenadas planas:

$$X_{min}: 830.000 \quad Y_{min}: 955.000 \quad X_{max}: 1.015.000 \quad Y_{max}: 915.000$$

Adicionalmente, la temperatura media de la cuenca es de 19,8 °C, con variaciones de temperatura entre los 28.6°C y 9.3°C, lo que genera en la cuenca alrededor de 11 provincias climáticas, de las que se destacan los clima de páramo, templado y cálido (CORTOLIMA, 2017b).

3.6 Caso específico, descripción del problema.

Como se describió anteriormente la cuenca del río Coello tiene una gran relevancia en el departamento del Tolima y a nivel nacional, pues es una de las más grandes aportantes a la Macrocuenca del Magdalena-Cauca. A continuación, se describirá la oferta y demanda hídrica que esta cuenca presenta.

La cuenca mayor del río Coello tiene un caudal medio de 31,24 m³/s, con una oferta hídrica neta de 30,90 m³/s, con un caudal ecológico de 0.34 m³/s (CORTOLIMA, 2017c).

Igualmente, en Colombia se maneja el índice de escasez el cual, representa la demanda de agua que ejercen en conjunto las actividades económicas y sociales para su uso y aprovechamiento frente a la oferta hídrica disponible. La cuenca mayor del río Coello posee un índice de escasez de 0,77 lo que se considera alto e indica una demanda alta de agua (CORTOLIMA, 2017c).

A continuación, se describen los principales tipos de demandas hídricas presentes en la cuenca del río Coello. La primera demanda hídrica importante es la de consumo humano la cual, de acuerdo con el POMCA de la cuenca citada, se calcula mediante el uso de coeficientes estándares de consumo básico diario de agua por habitante, establecidas por el IDEAM: 170 litros/habitante/día (CORTOLIMA, 2017c).

El cultivo de arroz constituye la principal actividad agrícola y económica del Departamento, y por lo tanto es la actividad con mayor demanda hídrica la cual se calcula alrededor de los 500.036 Millones de metros cúbicos al año (0,016m³/s). También se destacan las hortalizas con 1.45 Millones de metros cúbicos al año, las frutas con 40.662 Millones de metros cúbicos al año y el Sorgo y el Algodón con 20.500 Millones de metros cúbicos al año (CORTOLIMA, 2017c).

Como se explicó anteriormente, aunque la cuenca del río Coello provea abundante agua, las demandas agrícolas y de consumo humano están creando problemas de escasez en la región, por lo que es necesario un estudio de asignación de agua para complementar los esfuerzos e investigaciones adelantadas por la Corporación Autónoma del Tolima, CORTOLIMA. Así mismo, debido al alcance de este trabajo, se utilizarán las demandas hídricas de consumo humano en las ciudades principales como Ibagué, Cajamarca y Espinal, y la del cultivo de arroz por su relevancia económica en la región.

3.7 Relevancia del análisis de la asignación de agua en Coello

El río Coello es un afluente importante del río Magdalena, y con el objetivo de cumplir el plan de acción nacional desarrollado por la PNGIRH, en donde se propone el conocimiento del estado de todos los sistemas hídricos del país. Este trabajo propone una herramienta

general de apoyo a la evaluación de la asignación de agua actual y futura, que se probará en la cuenca del río Coello, pues como se mencionó en capítulos anteriores las demandas hídricas en la región están afectando la disponibilidad del recurso.

El departamento del Tolima es catalogado como el centro alimentario del país, por lo que es de gran importancia evaluar y mejorar la asignación de agua actual, para que en todos los puntos de demanda hídrica haya disponibilidad del recurso a lo largo de los periodos climatológicos del año.

3.8 Recolección y procesamiento de datos.

Para la evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Coello, se contactó con la corporación autónoma del Tolima, CORTOLIMA, y se solicitaron las concesiones de agua activas a la fecha (ver anexo 1). Igualmente se reutilizaron los datos utilizados por Harliana, Meiline en su trabajo de grado titulado “Development of a Web-Based Water Allocation Model”.

Dichos datos tienen series de caudal disponible en la cabecera de la cuenca, desde 1980 hasta el 2013 en milímetros al mes. Dichos caudales fueron calculados a partir del modelo hidrológico WFLOW, desarrollado por **Deltares**. Igualmente, dentro del paquete de datos mencionados también se obtuvieron datos de demanda para irrigación en el mismo periodo de tiempo (ver anexo 1). Los cuales fueron calculados como la evapotranspiración de referencia menos la precipitación medida en la cuenca para el estudio “Adaptation to Climate change in Colombia” realizado igualmente por **Deltares** en compañía de **IHE-Delft**.

Adicionalmente, para los datos de demanda doméstica (población, industria y minería) se tomaron las proyecciones de unidades de consumo y su demanda anual de agua realizadas en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, realizado por **Deltares** en compañía con **IHE-Delft** (Deltares & Institute for Water Education IHE, 2014).

Capítulo 4

Análisis comparativo de las herramientas disponibles en el mercado para realizar modelos de asignación de agua en una cuenca

4.7 WEAP

WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos cuyo propósito es ayudar a los expertos en la planificación.

WEAP funciona usando el principio básico del balance hídrico, puede ser aplicado en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas transfronterizos. Por otra parte, WEAP puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo la escorrentía por precipitación, flujo base y recarga de aguas subterráneas por precipitación; análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos de agua y propiedades de asignación (Johnson et al., 1995).

El análisis representa el sistema en términos de sus diversas fuentes de suministro, extracción, transferencia y plantas de tratamiento de agua residual; demandas de agua; generación de contaminación y requisitos de los ecosistemas (Stockholm Environment Institute (SEI), 2015).

4.8 Ecuaciones utilizadas en WEAP

4.8.1 Balance hídrico

En WEAP la relación de las variables hidrológicas que entran y salen del punto de control se realiza a nivel mensual y nodo a nodo en la estructura topológica. Esta relación se calcula a partir de las ecuaciones de balance de masa en el punto de control aplicada de la siguiente manera:

$$V_{in_{i,j}} - V_{out_{i,j}} = \Delta S_{i,j} \quad [1]$$

Donde:

- i es el índice para el nodo
- j es el índice para el mes.
- $V_{in_{i,j}}$ es el volumen de agua que entra al punto de control en forma de precipitación o caudal de escorrentía para el nodo i en el mes j .
- $V_{out_{i,j}}$ es el volumen de agua que sale del punto de control en forma de caudal de escorrentía, evaporación o caudal extraído para suplir demandas, en el nodo i y en el tiempo j .
- $\Delta S_{i,j}$ será el almacenamiento generado en embalses o acuíferos, en el nodo i y en el tiempo j .

Cada nodo tiene su ecuación de balance hídrico (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), y adicionalmente ecuaciones que restringen la entrada de agua a los nodos como:

$$V_{in_{i,j}} \leq \text{Requerimientos}_{i,j} \quad [2]$$

Donde:

- $\text{Requerimientos}_{i,j}$ será el volumen de agua que requiera cada nodo i en el mes j para suplir sus demandas. Los cuales nunca podrán ser superior al volumen de agua disponible que entre a cada nodo.

Para la asignación de agua en la cuenca es importante establecer prioridades en cada tipo de nodo, WEAP tiene preestablecido dos prioridades, establecerá la más alta para las demandas domésticas y la más baja para el llenado de embalses. Si todos los nodos tienen la misma demanda, WEAP tratara de satisfacer la demanda hídrica de forma equitativa y simultánea.

Usando la prioridad de las demandas y las preferencias de suministro, WEAP determina el orden de asignación de agua. Todos los enlaces de transmisión de caudal y requerimientos de caudal con la misma priorización son calculados al mismo tiempo. Por ejemplo; el caudal a través de las conexiones de transmisión con prioridad 1 serán calculadas, mientras que las otras conexiones con prioridad 2 o menor serán establecidas temporalmente en cero. Una vez se hayan determinado los caudales para las conexiones de prioridad 1, se

calcularán las conexiones con prioridades 2, mientras que las conexiones con prioridad 3 o menor serán puestas en cero temporalmente, y así sucesivamente.

4.8.2 Demanda de agua potable

La cantidad de agua potable requerida por cada nodo es calculada como:

$$Dom_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [3]$$

Dónde:

- $Actividad_Anual_{i,j}$ Es la cantidad de unidades de consumo que anualmente requieren agua.
- $Uso_{i,j}$ Es la cantidad de agua que cada unidad de consumo requiere en un año.
- $Dom_Demand_{i,j}$ Son los requerimientos de agua potable de un nodo.

4.8.3 Demanda de agua para irrigación

La cantidad de agua requerida para la irrigación de las plantas en cada nodo es calculada como:

$$Irr_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [4]$$

Dónde:

- $Actividad_Anual_i$ Es la cantidad de áreas irrigables que anualmente se cultivan.
- Uso_i Es la cantidad de agua que se requiere por área de irrigación en un año.
- Irr_Demand_i son los requerimientos de agua para irrigación por nodo en un año.

4.8.4 Almacenamiento de agua

Los embalses son representados a partir de unas zonas de uso predefinidas. Dichas zonas son: zona de control de crecientes, zona de conservación, zona de amortiguamiento y zona inactiva.

Para definir estas zonas se deben ingresar los volúmenes correspondientes al máximo de cada una. WEAP permite que el embalse suelte agua de forma libre, si su volumen se encuentra en la zona de conservación.

Cuando el volumen baja de la zona de conservación y llega a la zona de amortiguamiento la cantidad de agua liberada por el embalse estará en función de la siguiente ecuación:

$$Month_Release_{i,j} \leq BC * \forall agua_ZA_{i,j} \quad [5]$$

Donde:

- $Month_Release_{i,j}$, es la cantidad de agua disponible en el embalse i para ser liberada en cada mes j del año.
- $\forall agua_ZA_{i,j}$, es el volumen de agua en la zona de amortiguamiento en cada mes del año.
- BC , es el coeficiente de amortiguación el cual, entre más cercano a 1 este generará un mayor cubrimiento de la demanda y una rápida liberación del volumen de agua almacenado. Si es cercano a cero, mantendrá los niveles del embalse, pero no se suplirán completamente las demandas.

4.9 Estructuración de la topología de la cuenca

Para iniciar el proceso de configuración del modelo en WEAP, se debe contar con una licencia, la cual se solicita en la página: <https://www.weap21.org/>, donde también se encuentran las instrucciones de descarga e instalación. Igualmente, en la página mencionada está disponible un tutorial para aquellos que trabajan por primera vez a esta herramienta.

Una vez instalado WEAP, en la pantalla principal a la izquierda aparecerán varias herramientas de dibujo según los tipos de nodo que este software puede representar en su proceso de asignación de agua. Para el desarrollo de la cuenca de estudio se necesitarán;

River: el cual representa gráficamente los ríos de forma esquemática.

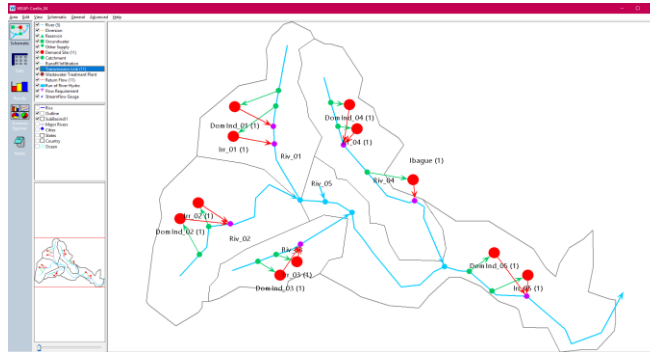
Demand Site: el cual representa un punto de demanda de caudal, que puede ser para suplir demandas domesticas o para irrigación.

Transmission link: permite extraer el caudal demandando por los nodos ("Demand Site") y asignarlo a cada uno de ellos.

Return Flow: permite devolver el caudal de los puntos de demanda aguas abajo de la extracción.

Reservoir: permite la representación de los embalses dentro del entorno de la herramienta.

Luego de determinar los tipos de nodos requeridos, se prosigue a dibujar la estructura topológica de la cuenca. La configuración topológica se muestra en la Ilustración 5.



*Ilustración 5 Configuración topológica de la cuenca de estudio en WEAP
Fuente: Propia.*

4.9.1 Ingreso de datos.

A continuación, se ilustrarán los datos necesarios para la configuración del modelo de la cuenca en estudio.

4.9.1.1 Caudales de entrada.

Una vez estructurada la topología de cuenca, se ingresan los datos de caudal disponible, que para este trabajo fueron calculados a partir de un modelo hidrológico desarrollado en WFLOW. Dichos datos se cargan al modelo a través del ayudante para la lectura de archivos en formato .csv que posee WEAP.

4.9.1.2 Demandas de agua

En la ventana de Datos, se encuentra la pestaña Demand Sites, al desplegarla se encuentra la configuración de los nodos de demanda (doméstica y de irrigación). Esta configuración requiere la siguiente información: Unidades de demanda como número de personas en la ciudad, industrias o puntos de extracción minera, también requiere demanda de agua anual por unidad, variación mensual de la demanda, si la hay, y el consumo que se genera en la unidad. La serie de datos se obtuvieron como se explicó en la sección 3.4. y serán los mismos que se utilizarán para RIBASIM y HiWEB.

4.9.1.3 Asignación de características de los embalses.

En la ventana de datos se encuentra la pestaña Recursos y Suministros. Al desplegarla encontramos la pestaña río y luego Embalses, al desplegar esta última se encuentran los requerimientos de datos para la modelación de los embalses. Dicha configuración requiere la siguiente información: Capacidad de almacenamiento en volumen anual y la curva de almacenamiento. Los datos ingresados en esta sección son los explicados en la sección 3.4 y será en este caso lo mismo que se ingresarán para RIBASIM y para HiWEB

4.10 RIBASIM

Es un paquete de modelación genérico para analizar el comportamiento de los ríos y cuencas bajo diferentes condiciones hidrológicas. Es un paquete de modelación flexible y amigable con el usuario en el cual las entradas hidrológicas al sistema son unidas o relacionadas a varias ubicaciones con requerimientos de agua específicos dentro del sistema.

RIBASIM le permite al usuario evaluar una variedad de manejos y evaluaciones relacionadas con la infraestructura, operación y demanda hídrica. Así mismo, permite

evaluar los resultados en términos de calidad y cantidad de agua. RIBASIM provee una herramienta de análisis, dando diferentes puntos de vista en el origen del agua disponible en cualquier lugar de la cuenca (Omar, 2014).

Este software es un instrumento de modelación para la planeación y manejo de las cuencas. Está diseñado para realizar cualquier análisis en donde se requiera la inclusión del balance de agua. El resultado de este balance de agua provee la información básica sobre la cantidad de agua disponible, así como, el comportamiento del flujo en cualquier lugar y momento dentro de la cuenca. Igualmente, proporciona los medios para evaluar dichos balances con los detalles requeridos, teniendo en cuenta el drenaje de la agricultura, los vertidos de la industria y la reutilización aguas abajo. Se generan varios parámetros de rendimiento de cuenca para la evaluación de las situaciones simuladas (Omar, 2014).

4.11 Ecuaciones utilizadas en RIBASIM

4.11.1 Balance hídrico

En RIBASIM la relación de las variables hidrológicas que entran y salen del punto de control se realiza dependiendo del intervalo de tiempo que se haya configurado en el archivo de datos (día, mes, hora, etc.), y en la red se realiza nodo a nodo. Esta relación se calcula a partir de las ecuaciones de balance de masa aplicada en el punto de control de la siguiente manera:

$$Q_{in_{i,j}} - Q_{out_{i,j}} = \Delta Q_{i,j} \quad [6]$$

Donde:

- $Q_{in_{i,j}}$ es el caudal que entra al punto de control en forma de escorrentía para el nodo i en el tiempo j .
- $Q_{out_{i,j}}$ es el caudal de agua que sale del punto de control en forma de caudal de escorrentía o caudal extraído para suplir demandas, en el nodo i y en el tiempo j .
- $\Delta Q_{i,j}$ será el caudal que siga como caudal disponible para el nodo i aguas abajo en el tiempo j .

En los enlaces categorizados como “Diversion” irá el caudal requerido por el nodo en su totalidad, se suplirá la demanda y se devolverá el porcentaje de caudal que se haya establecido como caudal de retorno en la configuración.

Para RIBASIM es indiferente si hay o no agua disponible en el enlace directamente aguas arriba del nodo, en el caso no de haber suficiente agua para suplir los requerimientos, este pondrá el caudal faltante como negativo, y seguirá haciendo los cálculos del balance de masas con los caudales faltantes hasta llegar al nodo final de la cuenca “outflow”.

4.11.2 Demanda de agua potable

Para la demanda de agua potable se utilizaron los mismos valores de la sección 3.4 para uso y número de habitantes. A continuación, se muestra el cálculo para la demanda del nodo de consumo 1, vinculado con el río 1 de la cuenca.

En el estudio, “Adaptation to Climate Change in Colombia”, se determinó que el consumo diario de una persona son 0.125 metros cúbicos. Adicionalmente, se determinó que para el nodo de consumo 1 la población era de 50.000 mil personas. Por lo que:

$$Q_{consumo} = \text{numero de personas} * \frac{\text{caudal} \left[\frac{m^3}{\text{persona} - \text{dia}} \right]}{\text{segundos de un dia}} \quad [7]$$

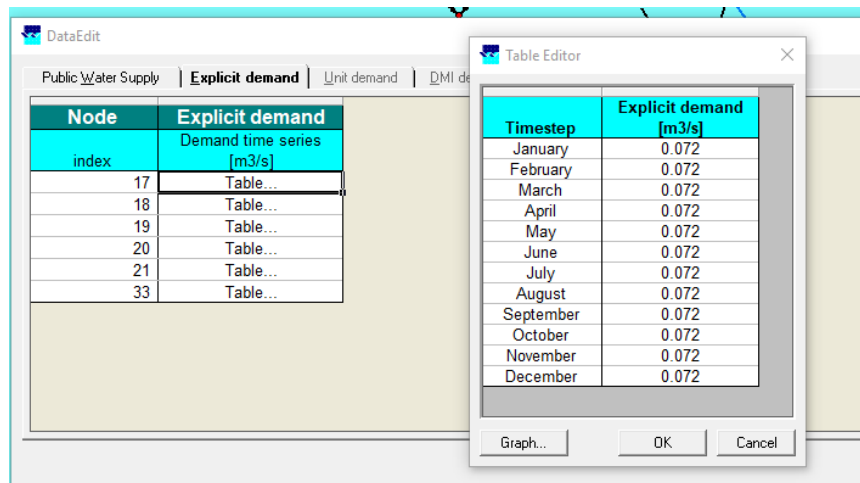
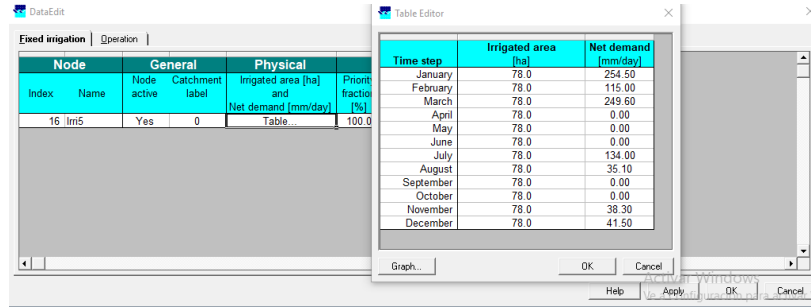


Ilustración 9 Demanda de consumo RIBASIM

Fuente: Propia

4.11.3 Demanda de agua para irrigación

Para la demanda de irrigación se utilizó la serie de datos proporcionada en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, y se ingresó de forma explícita.



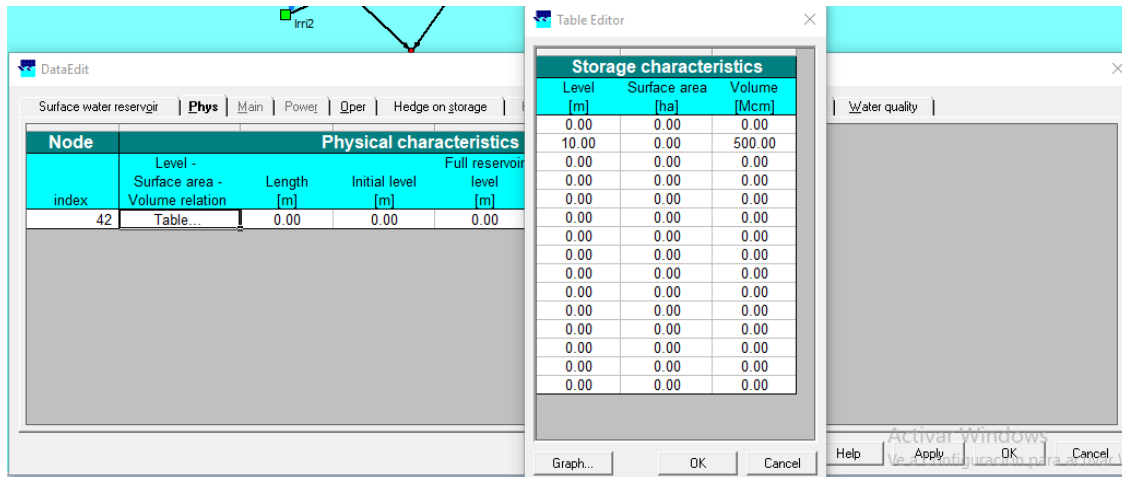
The image shows two overlapping windows from the RIBASIM software. The 'DataEdit' window displays a table for 'Fixed irrigation' with columns for Node, General, and Physical characteristics. The 'Table Editor' window shows a detailed table of irrigation demand data for each month.

Time step	Irrigated area [ha]	Net demand [mm/day]
January	78.0	254.50
February	78.0	115.00
March	78.0	249.60
April	78.0	0.00
May	78.0	0.00
June	78.0	0.00
July	78.0	134.00
August	78.0	35.10
September	78.0	0.00
October	78.0	0.00
November	78.0	38.30
December	78.0	41.50

Ilustración 10 Demanda por irrigación RIBASIM
Fuente: Propia

4.11.4 Almacenamiento de agua

Para la caracterización de los embalses se utilizó la curva de regulación proporcionada en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, y se ingresó de forma explícita.



The image shows two overlapping windows from the RIBASIM software. The 'DataEdit' window displays a table for 'Physical characteristics' of a storage reservoir. The 'Table Editor' window shows a detailed table of storage characteristics data, including level, surface area, and volume for various levels.

Level [m]	Surface area [ha]	Volume [Mcm]
0.00	0.00	0.00
10.00	0.00	500.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00

Ilustración 11 Curva de regulación RIBASIM

Esta curva fue supuesta por los tomadores de decisiones para un escenario ficticio de regulación de agua para la cuenca de estudio. Dicho escenario se explica en el documento “Adaptation to Climate Change in Colombia”.

4.12 Configuración del modelo de la cuenca en RIBASIM

4.12.1 Estructuración de la topología de la cuenca

Para iniciar la configuración del modelo en RIBASIM se debe contar con una licencia educacional. La misma se puede solicitar al correo Wil.vanderKrogt@deltares.nl. Con la licencia se provee una guía rápida de instalación. La misma contiene videos tutoriales y ejemplos de aplicación.

Una vez instalado el RIBASIM, se abrirá y se seleccionará el botón nombrado “Add Basin” en donde se deberá asignar el nombre de la cuenca de estudio, para este trabajo Coello.

Inmediatamente después, se ingresará al botón “Open and Simulate”, se selecciona la cuenca creada y se abrirá la venta principal de RIBASIM.

A continuación, se configurará el escenario seleccionando en la barra de herramientas, Caso, nuevo caso y asignándole un nombre. En seguida, se selecciona Select Scenario's measurement and strategies, para establecer los archivos de donde serán leídos los datos para la modelación. Los archivos deberán estar previamente configurados.

A continuación, se selecciona “Specify simulation control data” para configurar el tiempo de modelación que deberá estar dentro del rango de fechas de los datos ingresados.

El siguiente paso es seleccionar “Edit network and data base on map” en donde se encontrará la ventana mostrada en la Ilustración 14. En ella se selecciona “Edit network”. En este espacio se dibuja la topología de la cuenca siguiendo el flujo del agua al conectar los nodos.

RIBASIM tiene diferentes tipos de nodos y de enlaces para conectar dichos nodos. Dentro del espacio de edición de la topología se encontrarán los siguientes tipos de nodos:

Inflow”, en donde se asignan los caudales de entrada.

“Public Water Supply”, el cual representa la demanda de agua potable.

“Fix Irrigation”, el cual representa la demanda de agua para irrigación.

“**SW reservoir**”, el cual representa el almacenamiento de agua en los embalses. “**Diversión**” el cual representa la extracción de caudal para suplir las demandas. “**OutFlow**” el cual representa la salida de la cuenca.

Así mismo, los diferentes tipos de uniones entre nodos también debe ser seleccionadas. Se deberá utilizar:

“**SW Flow**” el cual representa el flujo de caudal en el río de un nodo a otro. “**Diverted Flow**” el cual representa la conducción del caudal demandado a los puntos de demanda.

4.12.2 Ingreso de datos.

A continuación se ilustra el proceso necesario para el ingreso de datos en RIBASIM.

4.12.2.1 Configuración archivos

Se recomienda instalar los archivos en la raíz de alguno de los discos duros como se muestra en la Ilustración 16.

Una vez ubicado el programa se accede a la cuenca creada. Dentro de esta carpeta principal se encontrarán otras carpetas secundarias en donde se configuran los archivos de texto para el modelo. Primero se ingresa a la carpeta “Hydrolog”, en la cual se encontrarán varios escenarios por defecto de RIBASIM . El escenario que se vaya a modificar debe coincidir con el que se haya establecido en el paso anterior, como se ve en la Ilustración 17

Una vez en la carpeta del escenario correspondiente se abre el archivo “ACTINFLW.TMS”. Dentro de este archivo están las instrucciones para editarlo con los datos correspondientes a la cuenca de estudio, como Número de estaciones, unidad de la serie de datos, nombre de la estación, Identificación de la estación (ID), y los datos típicos de las series de datos (año, intervalo de tiempo, y el valor de la serie). La serie de datos utilizada en este trabajo es la misma de la sección 4.3.1.1.

4.12.2.2 Asignación de caudales

Una vez configurados los archivos con los datos del modelo, se regresa a la sección de edición de la red de RIBASIM.

En el nodo “inflow” se selecciona, datos del modelo, Modelo de simulación con el botón derecho. En la pestaña variable de la ventana de edición de datos, se asigna la identificación de cada nodo de la serie de tiempo correspondiente del archivo ACTINFLW.TMS. (Ver Ilustración 18)

4.12.2.3 Asignación de demandas hídricas

- Consumo.

La demanda por consumo se asigna en la ventana de edición de red, seleccionando con el botón derecho el nodo de consumo, datos del modelo, modelo de simulación.

Aunque la demanda de consumo se puede calcular de varias formas, en este trabajo de grado se utilizó la forma explícita, y se ingresó el caudal demandado mensualmente en cada nodo en metros cúbicos por segundo. Esta demanda se calculó de la misma forma que en la sección 3.4

- Irrigación.

De manera similar, la demanda por irrigación se asigna seleccionando el nodo de irrigación, datos del modelo, modelo de simulación en la ventana de edición de la red.

En la sección “Physical” de la ventana de edición de datos se ingresan una tabla con los valores de área irrigada y demanda neta mensual por nodo. Estos datos son los mismos que se mencionaron en la sección 3.4.

Igualmente, se pedirán datos de operación como la eficiencia de riego superficial y subsuperficial y el porcentaje de flujo devuelto como escorrentía superficial y como flujo subterráneo. De tener los valores se deberán ingresar. Para este trabajo se utilizaron los valores por defecto.

- Asignación de características de los embalses.

Las características de los embalses se asignan en la ventana de edición de red, seleccionando con el botón derecho el nodo de consumo, datos del modelo, modelo de simulación.

Utilizando las diferentes pestañas de la ventana de edición de datos se introducen la superficie de agua en el embalse, las características de almacenamiento, en donde deberá ingresar la curva de regulación del embalse (nivel en metros, área superficial en hectáreas y volumen en metro cubico al mes) y las reglas de operación, en donde se ingresan los niveles mensuales para control de flujo, almacenamiento constante y altura deseada del embalse.

encontrará el marco teórico en donde se definen los conceptos técnicos implementados. En el [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.](#) encontrará el estado de arte consultado para el desarrollo de este trabajo de grado. En el **Capítulo** encontrará una descripción del caso de estudio, la cuenca del río Coello en Colombia. En el **Capítulo** encontrará la descripción de la configuración del caso de estudio en WEAP y RIBASIM. En el **Capítulo** encontrará los resultados obtenidos de la modelación del caso de estudio en tres diferentes herramientas de modelación WEAP, RIBASIM y la que está proponiendo este trabajo HIWEB, así mismo, encontrará un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de utilizar cada uno de ellos. Y finalmente, en el **Capítulo** encontrará las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

Capítulo 2

Estado del arte

2.9 Evolución del concepto “Gestión Integrada de Recursos Hídricos”

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos se define como un proceso en donde se promueve el desarrollo y control coordinado del agua, tierra y recursos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas y el ambiente” (Global Water Partnership, 2019).

Dicho concepto, que desde ahora llamaremos GIRH (en inglés Integrated Water Resources Management IWRM), se ha convertido en una de las iniciativas más discutidas por los gobiernos y cuyos inicios se podrían establecer a finales de los años 70's en la Conferencia de la Naciones Unidas sobre el Agua, en Mar de Plata 1977 (Rahaman & Varis, 2005).

En esta conferencia uno de los principales objetivos fue valorar el estado de los recursos hídricos, y con esto asegurar que existiera un suministro adecuado de agua para satisfacer las necesidades socioeconómicas futuras del planeta. Se logró aprobar el “Plan de Acción Mar de Plata”, el cual fue la primera aproximación internacional de la GIRH.

Quince años después tuvo lugar la conferencia internacional sobre el agua y el ambiente en Dublín, Irlanda. En la cual se establecieron cuatro de las principales recomendaciones para realizar acciones a nivel local, nacional e internacional.

- Se reconoció que el agua dulce es un recurso finito, vulnerable y esencial por lo que se sugirió que el agua es un recurso que debe ser manejado de forma integral.
- Se sugirió que las participaciones involucran usuarios, planeadores y gobernadores en todos los niveles de control y desarrollo.
- Se reconoció el papel central que juegan las mujeres en los temas relacionados con la provisión, manejo y seguridad de abastecimiento del agua en las poblaciones.
- Se sugirió que el agua debe ser tratada como una bien económico(Rahaman & Varis, 2005).

Por lo que, uno de los grandes logros de la conferencia de Dublín fue lograr involucrar a los usuarios del agua, desde los niveles más alto de liderazgo hasta las pequeñas

comunidades para que participen activamente en la gestión de los recursos hídricos de sus regiones.

En el 2000, el segundo foro mundial del agua se llevó a cabo en La Haya, Países Bajos. Participaron no solo expertos y gobernantes sino también toda clase de usuarios del agua de países desarrollados y en vía de desarrollo. En este foro se discutieron los retos para la implementación, lo que conllevó a que la visión transmitida en el foro se convirtiera en planes de acción en los países participantes (The & Rijsberman, 2000).

Este esfuerzo conjunto lideró la creación de lo que hoy se conoce como La Sociedad Global del Agua (Global Water Partnership), y el espacio permanente para la discusión de la GIRH en la agenda política de muchos países (The & Rijsberman, 2000).

En 1992, tuvo lugar La Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible en Rio, Brasil. En esta cumbre el concepto de GIRH fue objeto de largas discusiones sobre lo que significa ponerlo práctica (Abbas & Xuan, 2017). Igualmente, se aceptó la GIRH como un concepto “sombrija” que abarca interacciones complejas entre los sistemas de recursos hídricos, el ambiente y los sistemas sociales. Por lo que, fue categorizado como un paradigma ingenieril basado en “predecir y proveer” (Rahaman & Varis, 2005).

Así pues, al inicio de los años noventa la GIRH empezó a ser reconocida como un proceso multisectorial, multiregional y multidimensional. En el 2012, La Sociedad Global del Agua dio una de las definiciones más aceptadas actualmente por los expertos y científicos en el área. Se definió la GIRH como “un proceso en donde se promueve el desarrollo y control coordinado del agua, tierra y recursos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas y el ambiente” (Global Water Partnership, 2019).

De ahí que, la efectividad de las estrategias para lidiar con los problemas de calidad y cantidad de agua y su variabilidad, tiene un gran impacto en la calidad de vida y supervivencia de todas las especies. Por lo que, lograr la efectiva implementación de un plan de GIRH en los países reforzará la seguridad alimentaria y el acceso al recurso hídrico.

En 2010, en Colombia, se desarrolló la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), en la cual, se planteó un plan de acción para la planeación,

administración, seguimiento y control y manejo de conflictos de los recursos hídricos en el país (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En esta política se realizó un diagnóstico del estado del recurso hídrico, incluyendo la oferta y disponibilidad de agua, la demanda, la calidad y los riesgos asociados al mismo. Con este diagnóstico se crearon las herramientas de planeación como los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA), planes de ordenamiento del recurso hídrico (PORH) y los planes de manejo (PM).

A diciembre del 2016, alrededor de 420 procesos de ordenación de cuencas hidrográficas se habían iniciado, lo que corresponde a un área aproximada de 38.2 millones de hectáreas, equivalentes al 36.2% del territorio Colombiano (IDEAM, INVEMAR, SINCHI, IIAP, & IAvH, 2016).

2.9.1 Planeación y manejo de los recursos hídricos.

Las actividades de planeación y manejo de los recursos hídricos son comúnmente impulsadas por problemas que se deben resolver o por oportunidades en las que se identifican beneficios en el uso del agua y la tierra (Beek, 2017).

Existen dos aproximaciones para planear y manejar los recursos hídricos. La primera es de arriba hacia abajo, comúnmente llamado comando y control "*command and control*". La otra forma es desde abajo hacia arriba comúnmente llamado aproximación pasto-raíces "*grass-roots approach*". En este trabajo de grado se utiliza el segundo método, el cual es explicado a continuación.

2.9.1.1 Método de abajo hacia arriba. "grass-root approach".

Durante la última década, el proceso de planeación de los recursos hídricos ha involucrado la participación activa de los interesados; aquellos que se ven afectados de alguna manera por la gerencia del río.

La planificación ascendente debe esforzarse por lograr una visión común o "compartida" de las metas y prioridades entre todas las partes interesadas. Debe conocer y cumplir con todas las leyes y regulaciones aplicables. Debe esforzarse por identificar y evaluar múltiples alternativas y criterios de desempeño, incluidos los criterios de sostenibilidad. Para poder

hacer esto, los planificadores deben usar tecnología de información moderna, según esté disponible, para mejorar tanto el proceso como el producto. Esta tecnología, sin embargo, no eliminará la necesidad de llegar a conclusiones y tomar decisiones sobre la base de datos incompletos e inciertos y el conocimiento científico (Beek, 2017).

2.10 Desarrollo de los sistemas de apoyo a toma de decisiones.

Como se explicó anteriormente poner en práctica la GIRH es un proceso complejo, no solo por las múltiples interacciones entre los usuarios, sino también por la información que se requiere. Es por esto que la GIRH se apoya fuertemente en las herramientas de modelación computacionales, entre las cuales, los Sistemas de Apoyo a las Decisiones (DSS) han cumplido un papel fundamental en el respaldo tecnológico para tomadores de decisiones.

El uso de los modelos computacionales en la GIRH sigue dos necesidades básicas; conocer cuantitativamente el estado del recurso hídrico en un lugar dado; y asignar este recurso de forma óptima y eficiente bajo ciertas restricciones.

Los DSS nacieron entonces, hace más o menos 20 años con los trabajos de Keen and Scott Morton (1978), Bonezek (1980) y Sprague y Carlson (1982) entre otros (Rajasekaram & Nandalal, 2005). Fundamentalmente los DSS tienen el objetivo de asistir en el desarrollo de la toma de decisiones estructuradas o semiestructuradas en un campo multidisciplinario dentro de la teoría de toma de decisiones (Hess, Rees, & Rakes, 2000). Gracias a múltiples investigaciones en diferentes áreas técnicas y de aplicación en la ingeniería han sido fácilmente adoptados en diferentes áreas como: sistemas de gestión en la generación de diálogos (DGMS); Sistemas de administración de modelos (MBMS) y los sistemas de administración de bases de datos (DBMS) (Rajasekaram & Nandalal, 2005).

Un sistema de apoyo a las decisiones (DSS) en la GIRH es un sistema de computadora interactivo e integrado que consiste en el análisis de información y la capacidad de gestionar la información, diseñado para apoyar a los tomadores de decisiones quienes son los encargados de resolver problemas relacionados con la gestión del agua (Adler, 2013). En este contexto entonces, los tomadores de decisiones son los planeadores, gerentes, operadores y gobernantes de los sistemas de recursos hídricos a cargo de resolver problemas relacionados con el agua.

A su vez, el proceso de toma de decisiones en la GIRH sigue un proceso cíclico el cual tiene 4 fases; recolección y procesamiento de la información; análisis del problema; uso de herramientas de apoyo a la toma de decisiones; implementación de la decisión (Rajasekaram & Nandalal, 2005). De la misma forma, los DSS para la gestión de los recursos hídricos consisten en tres subsistemas principales integrados; una interfaz para el usuario; un conjunto de herramientas de modelación; y almacenamiento masivo de datos y manejo de los mismos (base de datos) (Adler, 2013).

2.11 Herramientas actuales para el análisis y evaluación de la agua en las cuencas.

Como se presentó en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el concepto de GIRH empezó a tomar fuerza a finales de los años 70's, y con esto el desarrollo de las herramientas computacionales que apoyan técnicamente el desarrollo y análisis de los problemas de interacciones entre usuarios del agua.

Actualmente en el mercado existen varias herramientas que apoyan la evaluación y planeación de la asignación del recurso hídrico en las cuencas, entre estas herramientas se pueden destacar los siguientes softwares: RIBASIM, WEAP, Modsim-DSS e HydroBID.

De estas herramientas la primera en ser lanzada al mercado fue RIBASIM en 1965 por la empresa de consultoría holandesa DELTARES. Esta herramienta fue desarrollada como una aproximación integral al sistema hídrico. RIBASIM es un paquete de modelación genérica que analiza el comportamiento de las cuencas hidrográficas en diversas condiciones hidrológicas (Omar, 2014). Este paquete de modelación es flexible e integral que involucra una variedad de medidas relacionadas con la infraestructura, la gestión operativa, y de la demanda adicional a los términos en cantidad y calidad del agua.

Siguiendo el camino trazado por RIBASIM, fue lanzada al mercado herramienta WEAP en 1988, por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo. WEAP fue creado con el objetivo de ser una herramienta de planeación flexible integral y transparente para evaluar la sustentabilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, y explorar escenarios alternativos de largo alcance (Stockholm Environment Institute (SEI), 2015).

En el 1978, fue lanzado al mercado Modsim-DSS por la Universidad Estatal de Colorado en Estados Unidos. MODSIM-DSS es un sistema generalizado de Apoyo a la Decisión de la cuenca fluvial y un modelo de flujo de red, diseñado específicamente para satisfacer las crecientes demandas y presiones de los administradores de cuencas hidrográficas en la actualidad. Así mismo, está estructurado como un sistema de apoyo a la decisión, con una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite a los usuarios crear cualquier topología de sistema de cuenca fluvial. Las estructuras de datos incorporadas en cada objeto modelo se controlan mediante un sistema de administración de bases de datos, que también se consulta mediante la simple activación del mouse (Berhe, Melesse, Hailu, & Sileshi, 2013). Estas tres herramientas fueron las únicas disponibles por un largo tiempo, pues eran las únicas que estaban apoyando computacionalmente los desarrollados de los planes de GIRH.

Y finalmente, la herramienta más actual en salir al mercado fue HydroBID, desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo en el 2016. HydroBID es una herramienta que permite gestionar y planificar los recursos hídricos de manera eficiente a través de modelos de simulación de disponibilidad presente y futura. Este es un software está integrado por dos componentes: un modelo numérico que incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad de volúmenes y caudales de agua dulce a escalas regionales, a nivel de cuencas y de sub-cuencas; y una base de datos con la delimitación, pre-parametrización y conectividad de aproximadamente 250 mil cuencas de América Latina y el Caribe. Adicionalmente, cuenta actualmente con módulos de manejo de embalses y transporte de sedimentos e interacción con aguas subterráneas. Además de las funciones principales, esta herramienta aporta información necesaria para la realización de tareas adicionales como soporte para la toma de decisiones, estimación de costos y beneficios de las medidas de adaptación, ayuda en la decisión de los diseños alternativos de proyectos de infraestructura, así como políticas de gestión de recursos hídricos (Nalesso, n.d.).

Es así que, a medida que la GIRH toma fuerza en la planeación de las cuencas, al mismo tiempo, el desarrollo de las herramientas computacionales se vuelve más importante. Por lo que, en este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta que apoya el desarrollo y la planeación de la GIRH y será comprada y validada con dos de las mencionadas anteriormente, WEAP y RIBASIM.

2.12 Aporte de este trabajo al área de conocimiento

En este trabajo se presenta una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en línea, que tiene la capacidad de recolectar, procesar y analizar la información de oferta y demanda de un sistema de recursos hídricos.

HiWEB es una herramienta de asignación de agua la cual, a partir de la ecuación de balance hídrico logra darles a los usuarios del agua y tomadores de decisiones información del estado de la oferta y demanda hídrica en su cuenca. Por lo que, con esta herramienta se pretende dar apoyo tecnológico y científico a los planes de GIRH que se quieran implementar, especialmente en el plan de acción de Colombia con la PNGIRH.

Como se mencionó anteriormente en Colombia hay un plan de GIRH en acción. Este plan tiene cuatro objetivos importantes; Conocimiento detallado de la oferta; Conocimiento detallado de la demanda; Conocimiento de la calidad actual del recurso hídrico nacional y Riesgo asociado la oferta y disponibilidad del agua (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). De estos cuatro objetivos, HiWEB como herramienta de análisis de la asignación de agua dentro de cada sistema, podrá ayudar de primera mano en los primeros dos objetivos y en segundo plano en el tercer y cuarto objetivo.

Por lo que, se espera que con el desarrollo de esta herramienta se implementen análisis de asignación de agua en los procesos presentes y futuros que se desarrollen en el país.

Capítulo 3

Caso de estudio

3.9 La cuenca del río Coello.

El río Coello nace en el cono del nevado del Tolima en la Cordillera Central. Empieza su recorrido a los 3.600 m.s.n.m recorre 9,8Km aproximadamente hasta los 2.150 m.s.n.m, dicho recorrido lo realiza con una pendiente media de cauce de 18%. Continúa su recorrido aproximadamente 17,9 Km hasta una cota de 1.400 m.s.n.m y con una pendiente media de cauce de 5,4%. En el límite con Ibagué recibe río Bermellón y sigue su recorrido hasta llegar al río Magdalena.

La cuenca del río mayor del río Coello desde su nacimiento hasta su desembocadura, posee una longitud de 124,76 Km y sus aguas corren en sentido Occidente – Oriente drenando una extensión de 184.257 Ha correspondientes aproximadamente al 7,8% del área total del departamento del Tolima, lo que la hace la tercera más grande del departamento. (CORTOLIMA, 2017a).

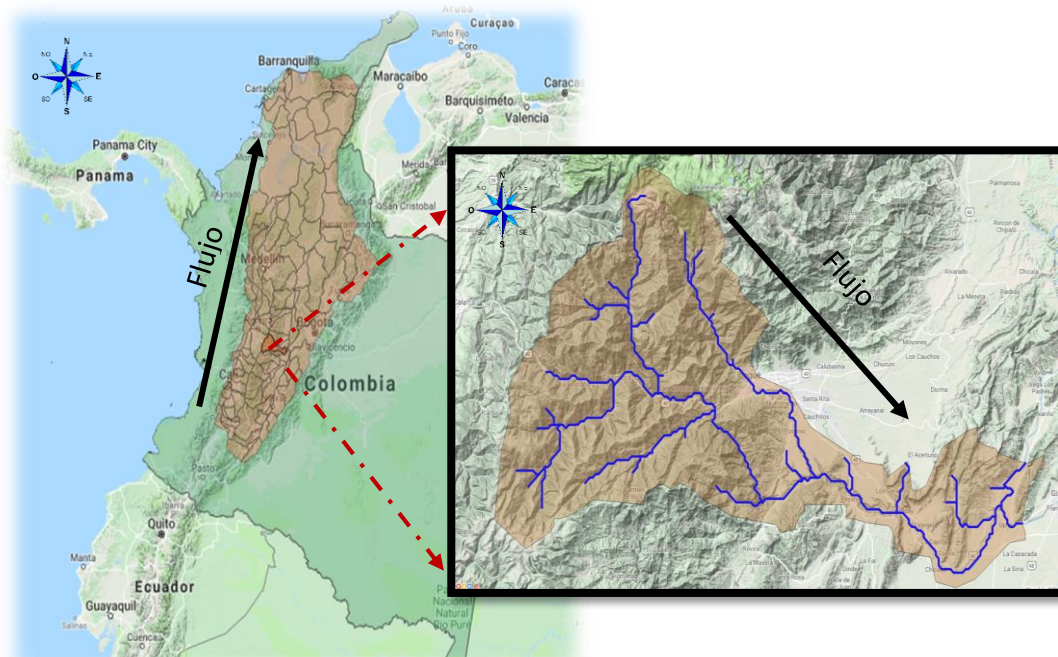


Ilustración 2 Cuenca del río Coello

Fuente: propia

Esta cuenca está localizada al occidente del Departamento del Tolima en el costado Central – Oriental de la cordillera Central, enmarcada en las coordenadas planas:

$$X_{min}: 830.000 \quad Y_{min}: 955.000 \quad X_{max}: 1.015.000 \quad Y_{max}: 915.000$$

Adicionalmente, la temperatura media de la cuenca es de 19,8 °C, con variaciones de temperatura entre los 28.6°C y 9.3°C, lo que genera en la cuenca alrededor de 11 provincias climáticas, de las que se destacan los clima de páramo, templado y cálido (CORTOLIMA, 2017b).

3.10 Caso específico, descripción del problema.

Como se describió anteriormente la cuenca del río Coello tiene una gran relevancia en el departamento del Tolima y a nivel nacional, pues es una de las más grandes aportantes a la Macrocuena del Magdalena-Cauca. A continuación, se describirá la oferta y demanda hídrica que esta cuenca presenta.

La cuenca mayor del río Coello tiene un caudal medio de 31,24 m³/s, con una oferta hídrica neta de 30,90 m³/s, con un caudal ecológico de 0.34 m³/s (CORTOLIMA, 2017c).

Igualmente, en Colombia se maneja el índice de escasez el cual, representa la demanda de agua que ejercen en conjunto las actividades económicas y sociales para su uso y aprovechamiento frente a la oferta hídrica disponible. La cuenca mayor del río Coello posee un índice de escasez de 0,77 lo que se considera alto e indica una demanda alta de agua (CORTOLIMA, 2017c).

A continuación, se describen los principales tipos de demandas hídricas presentes en a la cuenca del río Coello. La primera demanda hídrica importante es la de consumo humano la cual, de acuerdo con el POMCA de la cuenca citada, se calcula mediante el uso de coeficientes estándares de consumo básico diario de agua por habitante, establecidas por el IDEAM: 170 litros/habitante/día (CORTOLIMA, 2017c).

El cultivo de arroz constituye la principal actividad agrícola y económica del Departamento, y por lo tanto es la actividad con mayor demanda hídrica la cual se calcula alrededor de los 500.036 Millones de metros cúbicos al año (0,016m³/s). También se destacan las hortalizas con 1.45 Millones de metros cúbicos al año, las frutas con 40.662 Millones de metros

cúbicos al año y el Sorgo y el Algodón con 20.500 Millones de metros cúbicos al año (CORTOLIMA, 2017c).

Como se explicó anteriormente, aunque la cuenca del río Coello provea abundante agua, las demandas agrícolas y de consumo humano están creando problemas de escasez en la región, por lo que es necesario un estudio de asignación de agua para complementar los esfuerzos e investigaciones adelantadas por la Corporación Autónoma del Tolima, CORTOLIMA. Así mismo, debido al alcance de este trabajo, se utilizarán las demandas hídricas de consumo humano en las ciudades principales como Ibagué, Cajamarca y Espinal, y la del cultivo de arroz por su relevancia económica en la región.

3.11 Relevancia del análisis de la asignación de agua en Coello

El río Coello es un afluente importante del río Magdalena, y con el objetivo de cumplir el plan de acción nacional desarrollado por la PNGIRH, en donde se propone el conocimiento del estado de todos los sistemas hídricos del país. Este trabajo propone una herramienta general de apoyo a la evaluación de la asignación de agua actual y futura, que se probará en la cuenca del río Coello, pues como se mencionó en capítulos anteriores las demandas hídricas en la región están afectando la disponibilidad del recurso.

El departamento del Tolima es catalogado como el centro alimentario del país, por lo que es de gran importancia evaluar y mejorar la asignación de agua actual, para que en todos los puntos de demanda hídrica haya disponibilidad del recurso a lo largo de los periodos climatológicos del año.

3.12 Recolección y procesamiento de datos.

Para la evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Coello, se contactó con la corporación autónoma del Tolima, CORTOLIMA, y se solicitaron las concesiones de agua activas a la fecha (ver anexo 1). Igualmente se reutilizaron los datos utilizados por Harliana, Meiline en su trabajo de grado titulado “Development of a Web-Based Water Allocation Model”.

Dichos datos tienen series de caudal disponible en la cabecera de la cuenca, desde 1980 hasta el 2013 en milímetros al mes. Dichos caudales fueron calculados a partir del modelo hidrológico WFLOW, desarrollado por **Deltares**. Igualmente, dentro del paquete de datos

mencionados también se obtuvieron datos de demanda para irrigación en el mismo periodo de tiempo (ver anexo 1). Los cuales fueron calculados como la evapotranspiración de referencia menos la precipitación medida en la cuenca para el estudio “Adaptation to Climate change in Colombia” realizado igualmente por **Deltares** en compañía de **IHE-Delft**.

Adicionalmente, para los datos de demanda doméstica (población, industria y minería) se tomaron las proyecciones de unidades de consumo y su demanda anual de agua realizadas en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, realizado por **Deltares** en compañía con **IHE-Delft** (Deltares & Institute for Water Education IHE, 2014).

Capítulo 4

Análisis comparativo de las herramientas disponibles en el mercado para realizar modelos de asignación de agua en una cuenca

4.13 WEAP

WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos cuyo propósito es ayudar a los expertos en la planificación.

WEAP funciona usando el principio básico del balance hídrico, puede ser aplicado en sistemas municipales y agrícolas, en una sola cuenca o en complejos sistemas transfronterizos. Por otra parte, WEAP puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de estos sistemas, incluyendo la escorrentía por precipitación, flujo base y recarga de aguas subterráneas por precipitación; análisis de las demandas sectoriales; conservación del agua; derechos de agua y propiedades de asignación (Johnson et al., 1995).

El análisis representa el sistema en términos de sus diversas fuentes de suministro, extracción, transferencia y plantas de tratamiento de agua residual; demandas de agua; generación de contaminación y requisitos de los ecosistemas (Stockholm Environment Institute (SEI), 2015).

4.14 Ecuaciones utilizadas en WEAP

4.14.1 Balance hídrico

En WEAP la relación de las variables hidrológicas que entran y salen del punto de control se realiza a nivel mensual y nodo a nodo en la estructura topológica. Esta relación se calcula a partir de las ecuaciones de balance de masa en el punto de control aplicada de la siguiente manera:

$$Vin_{i,j} - Vout_{i,j} = \Delta S_{i,j} \quad [1]$$

Donde:

- i es el índice para el nodo
- j es el índice para el mes.
- $V_{in_{i,j}}$ es el volumen de agua que entra al punto de control en forma de precipitación o caudal de escorrentía para el nodo i en el mes j .
- $V_{out_{i,j}}$ es el volumen de agua que sale del punto de control en forma de caudal de escorrentía, evaporación o caudal extraído para suplir demandas, en el nodo i y en el tiempo j .
- $\Delta S_{i,j}$ será el almacenamiento generado en embalses o acuíferos, en el nodo i y en el tiempo j .

Cada nodo tiene su ecuación de balance hídrico (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), y adicionalmente ecuaciones que restringen la entrada de agua a los nodos como:

$$V_{in_{i,j}} \leq \text{Requerimientos}_{i,j} \quad [2]$$

Donde:

- $\text{Requerimientos}_{i,j}$ será el volumen de agua que requiera cada nodo i en el mes j para suplir sus demandas. Los cuales nunca podrán ser superior al volumen de agua disponible que entre a cada nodo.

Para la asignación de agua en la cuenca es importante establecer prioridades en cada tipo de nodo, WEAP tiene preestablecido dos prioridades, establecerá la más alta para las demandas domésticas y la más baja para el llenado de embalses. Si todos los nodos tienen la misma demanda, WEAP tratara de satisfacer la demanda hídrica de forma equitativa y simultánea.

Usando la prioridad de las demandas y las preferencias de suministro, WEAP determina el orden de asignación de agua. Todos los enlaces de transmisión de caudal y requerimientos de caudal con la misma priorización son calculados al mismo tiempo. Por ejemplo; el caudal a través de las conexiones de transmisión con prioridad 1 serán calculadas, mientras que las otras conexiones con prioridad 2 o menor serán establecidas temporalmente en cero. Una vez se hayan determinado los caudales para las conexiones de prioridad 1, se

calcularán las conexiones con prioridades 2, mientras que las conexiones con prioridad 3 o menor serán puestas en cero temporalmente, y así sucesivamente.

4.14.2 Demanda de agua potable

La cantidad de agua potable requerida por cada nodo es calculada como:

$$Dom_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [3]$$

Dónde:

- $Actividad_Anual_{i,j}$ Es la cantidad de unidades de consumo que anualmente requieren agua.
- $Uso_{i,j}$ Es la cantidad de agua que cada unidad de consumo requiere en un año.
- $Dom_Demand_{i,j}$ Son los requerimientos de agua potable de un nodo.

4.14.3 Demanda de agua para irrigación

La cantidad de agua requerida para la irrigación de las plantas en cada nodo es calculada como:

$$Irr_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [4]$$

Dónde:

- $Actividad_Anual_i$ Es la cantidad de áreas irrigables que anualmente se cultivan.
- Uso_i Es la cantidad de agua que se requiere por área de irrigación en un año.
- Irr_Demand_i son los requerimientos de agua para irrigación por nodo en un año.

4.14.4 Almacenamiento de agua

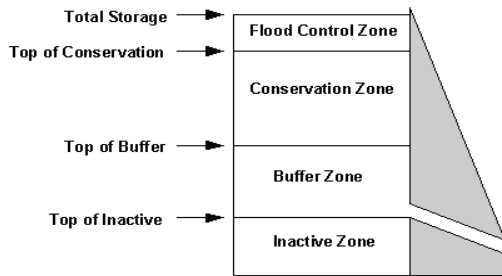


Ilustración 3 Operación de embalses WEAP
Fuente: Manual de usuario WEAP

Los embalses son representados a partir de unas zonas de uso predefinidas. Dichas zonas son: zona de control de crecientes, zona de conservación, zona de amortiguamiento y zona inactiva.

Para definir estas zonas se deben ingresar los volúmenes correspondientes al máximo de cada una. WEAP permite que el embalse suelte agua

de forma libre, si su volumen se encuentra en la zona de conservación.

Cuando el volumen baja de la zona de conservación y llega a la zona de amortiguamiento la cantidad de agua liberada por el embalse estará en función de la siguiente ecuación:

$$Month_Release_{i,j} \leq BC * \forall agua_ZA_{i,j} \quad [5]$$

Donde:

- $Month_Release_{i,j}$, es la cantidad de agua disponible en el embalse i para ser liberada en cada mes j del año.
- $\forall agua_ZA_{i,j}$, es el volumen de agua en la zona de amortiguamiento en cada mes del año.
- BC , es el coeficiente de amortiguación el cual, entre más cercano a 1 este generará un mayor cubrimiento de la demanda y una rápida liberación del volumen de agua almacenado. Si es cercano a cero, mantendrá los niveles del embalse, pero no se suplirán completamente las demandas.

4.15 Estructuración de la topología de la cuenca

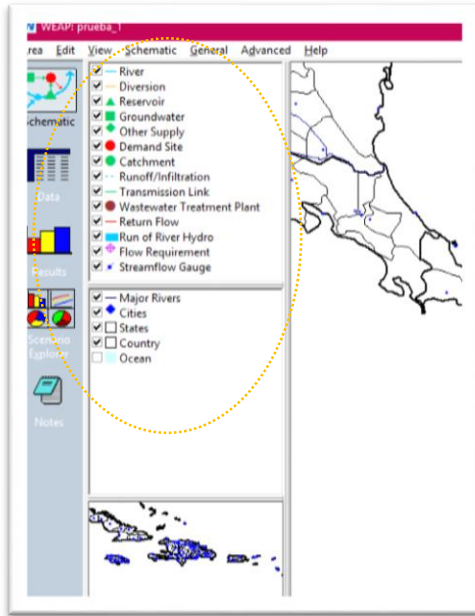


Ilustración 4 Nodos de inicio WEAP
Fuente: Propia

Para iniciar el proceso de configuración del modelo en WEAP, se debe contar con una licencia, la cual se solicita en la página: <https://www.weap21.org/>, donde también se encuentran las instrucciones de descarga e instalación. Igualmente, en la página mencionada está disponible un tutorial para aquellos que trabajan por primera vez a esta herramienta.

Una vez instalado WEAP, en la pantalla principal a la izquierda aparecerán varias herramientas de dibujo según los tipos de nodo que este software puede representar en su proceso de asignación de agua. Para el desarrollo de la cuenca de estudio se necesitarán;

River: el cual representa gráficamente los ríos de forma esquemática.

Demand Site: el cual representa un punto de demanda de caudal, que puede ser para suplir demandas domésticas o para irrigación.

Transmission link: permite extraer el caudal demandando por los nodos ("Demand Site") y asignarlo a cada uno de ellos.

Return Flow: permite devolver el caudal de los puntos de demanda aguas abajo de la extracción.

Reservoir: permite la representación de los embalses dentro del entorno de la herramienta.

Luego de determinar los tipos de nodos requeridos, se prosigue a dibujar la estructura topológica de la cuenca. La configuración topológica se muestra en la Ilustración 5.

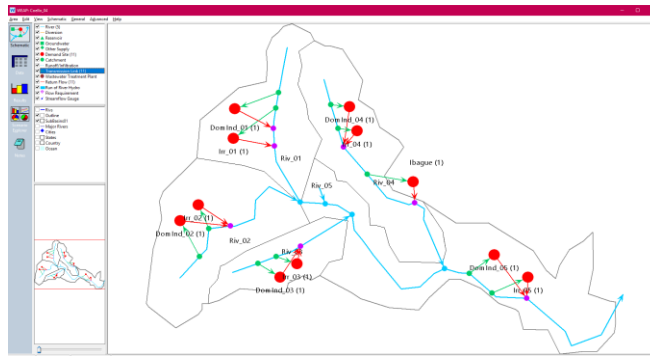


Ilustración 5 Configuración topológica de la cuenca de estudio en WEAP
Fuente: Propia.

4.15.1 Ingreso de datos.

A continuación, se ilustrarán los datos necesarios para la configuración del modelo de la cuenca en estudio.

4.15.1.1 Caudales de entrada.

Una vez estructurada la topología de cuenca, se ingresan los datos de caudal disponible, que para este trabajo fueron calculados a partir de un modelo hidrológico desarrollado en WFLOW. Dichos datos se cargan al modelo a través del ayudante para la lectura de archivos en formato .csv que posee WEAP.

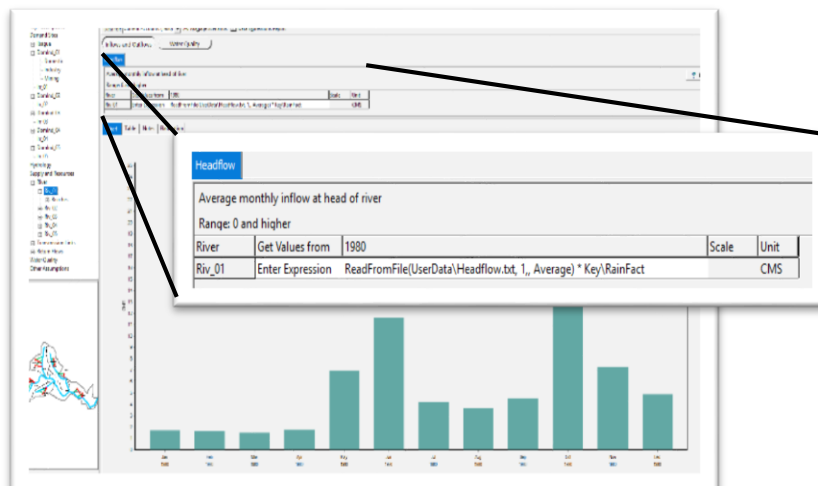


Ilustración 6 Carga de caudales disponibles en WEAP.
Fuente: Propia

4.15.1.2 Demandas de agua

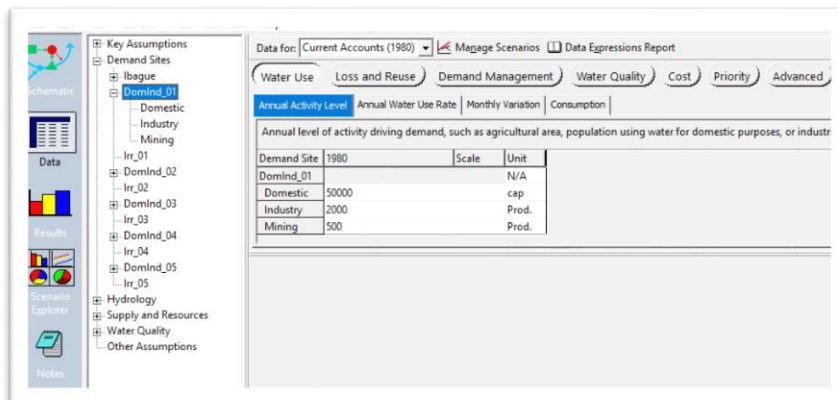


Ilustración 7 Ingreso demandas de agua WEAP

Fuente: Propia

En la ventana de Datos, se encuentra la pestaña Demand Sites, al desplegarla se encuentra la configuración de los nodos de demanda (doméstica y de irrigación). Esta configuración requiere

la siguiente información: Unidades de demanda como número de personas en la ciudad, industrias o puntos de extracción minera, también requiere demanda de agua anual por unidad, variación mensual de la demanda, si la hay, y el consumo que se genera en la unidad. La serie de datos se obtuvieron como se explicó en la sección 3.4. y serán los mismos que se utilizarán para RIBASIM y HiWEB.

4.15.1.3 Asignación de características de los embalses.

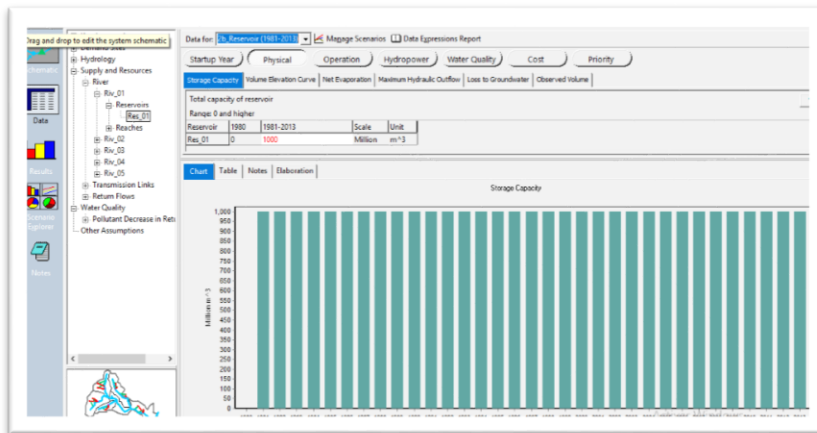


Ilustración 8 Asignación características de los embalses en WEAP.
Fuente: Propia.

En la ventana de datos se encuentra la pestaña Recursos y Suministros. Al desplegarla encontramos la pestaña río y luego Embalses, al desplegar esta última se encuentran los requerimientos de

datos para la modelación de los embalses. Dicha configuración requiere la siguiente información: Capacidad de almacenamiento en volumen anual y la curva de almacenamiento. Los datos ingresados en esta sección son los explicados en la sección 3.4 y será en este caso los mismo que se ingresaran para RIBASIM y para HiWEB

4.16 RIBASIM

Es un paquete de modelación genérico para analizar el comportamiento de los ríos y cuencas bajo diferentes condiciones hidrológicas. Es un paquete de modelación flexible y amigable con el usuario en el cual las entradas hidrológicas al sistema son unidas o relacionadas a varias ubicaciones con requerimientos de agua específicos dentro del sistema.

RIBASIM le permite al usuario evaluar una variedad de manejos y evaluaciones relacionadas con la infraestructura, operación y demanda hídrica. Así mismo, permite evaluar los resultados en términos de calidad y cantidad de agua. RIBASIM provee una herramienta de análisis, dando diferentes puntos de vista en el origen del agua disponible en cualquier lugar de la cuenca (Omar, 2014).

Este software es un instrumento de modelación para la planeación y manejo de las cuencas. Está diseñado para realizar cualquier análisis en donde se requiera la inclusión del balance de agua. El resultado de este balance de agua provee la información básica sobre la cantidad de agua disponible, así como, el comportamiento del flujo en cualquier lugar y

momento dentro de la cuenca. Igualmente, proporciona los medios para evaluar dichos balances con los detalles requeridos, teniendo en cuenta el drenaje de la agricultura, los vertidos de la industria y la reutilización aguas abajo. Se generan varios parámetros de rendimiento de cuenca para la evaluación de las situaciones simuladas (Omar, 2014).

4.17 Ecuaciones utilizadas en RIBASIM

4.17.1 Balance hídrico

En RIBASIM la relación de las variables hidrológicas que entran y salen del punto de control se realiza dependiendo del intervalo de tiempo que se haya configurado en el archivo de datos (día, mes, hora, etc.), y en la red se realiza nodo a nodo. Esta relación se calcula a partir de las ecuaciones de balance de masa aplicada en el punto de control de la siguiente manera:

$$Q_{in_{i,j}} - Q_{out_{i,j}} = \Delta Q_{i,j} \quad [6]$$

Donde:

- $Q_{in_{i,j}}$ es el caudal que entra al punto de control en forma de escorrentía para el nodo i en el tiempo j .
- $Q_{out_{i,j}}$ es el caudal de agua que sale del punto de control en forma de caudal de escorrentía o caudal extraído para suplir demandas, en el nodo i y en el tiempo j .
- $\Delta Q_{i,j}$ será el caudal que siga como caudal disponible para el nodo i aguas abajo en el tiempo j .

En los enlaces categorizados como “Diversion” irá el caudal requerido por el nodo en su totalidad, se suplirá la demanda y se devolverá el porcentaje de caudal que se haya establecido como caudal de retorno en la configuración.

Para RIBASIM es indiferente si hay o no agua disponible en el enlace directamente aguas arriba del nodo, en el caso no de haber suficiente agua para suplir los requerimientos, este pondrá el caudal faltante como negativo, y seguirá haciendo los cálculos del balance de masas con los caudales faltantes hasta llegar al nodo final de la cuenca “outflow”.

4.17.2 Demanda de agua potable

Para la demanda de agua potable se utilizaron los mismos valores de la sección 3.4 para uso y número de habitantes. A continuación, se muestra el cálculo para la demanda del nodo de consumo 1, vinculado con el río 1 de la cuenca.

En el estudio, “Adaptation to Climate Change in Colombia”, se determinó que el consumo diario de una persona son 0.125 metros cúbicos. Adicionalmente, se determinó que para el nodo de consumo 1 la población era de 50.000 mil personas. Por lo que:

$$Q_{consumo} = \text{numero de personas} * \frac{\text{caudal} \left[\frac{m^3}{\text{persona} - \text{dia}} \right]}{\text{segundos de un dia}} \quad [7]$$

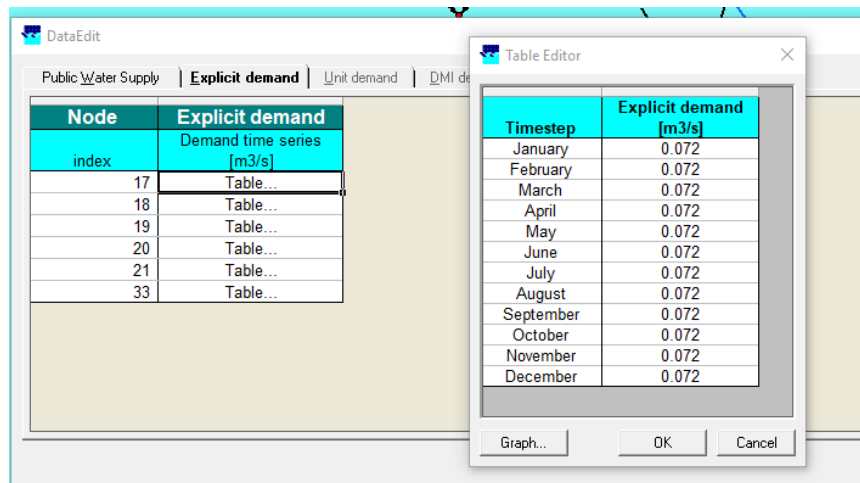


Ilustración 9 Demanda de consumo RIBASIM
Fuente: Propia

4.17.3 Demanda de agua para irrigación

Para la demanda de irrigación se utilizó la serie de datos proporcionada en el estudio “Adaptation to Climate Change in Colombia”, y se ingresó de forma explícita.

4.18 Configuración del modelo de la cuenca en RIBASIM

4.18.1 Estructuración de la topología de la cuenca

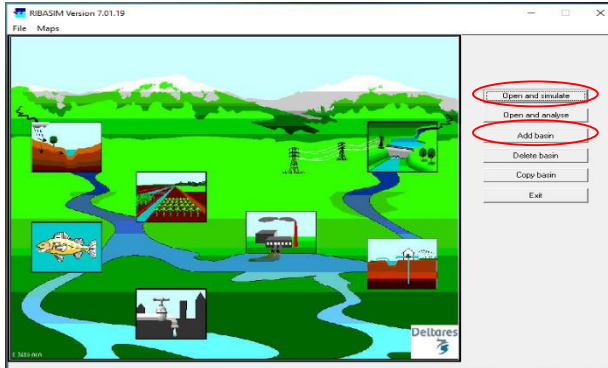


Ilustración 12 Ventana inicial RIBASIM.
Configuración modelo.

Fuente: Propia

Para iniciar la configuración del modelo en RIBASIM se debe contar con una licencia educacional. La misma se puede solicitar al correo Wil.vanderKrogt@deltares.nl. Con la licencia se provee una guía rápida de instalación. La misma contiene videos tutoriales y ejemplos de aplicación.

Una vez instalado el RIBASIM, se abrirá y se seleccionará el botón nombrado

“Add Basin” en donde se deberá asignar el nombre de la cuenca de estudio, para este trabajo Coello.

Inmediatamente después, se ingresará al botón “Open and Simulate”, se selecciona la cuenca creada y se abrirá la venta principal de RIBASIM.

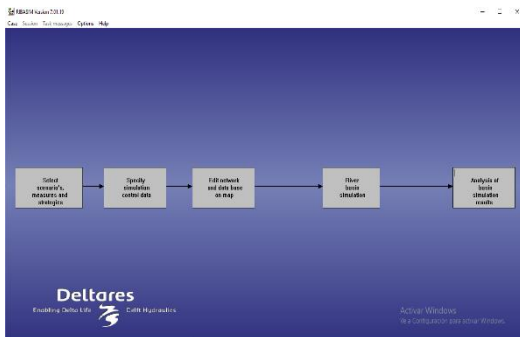
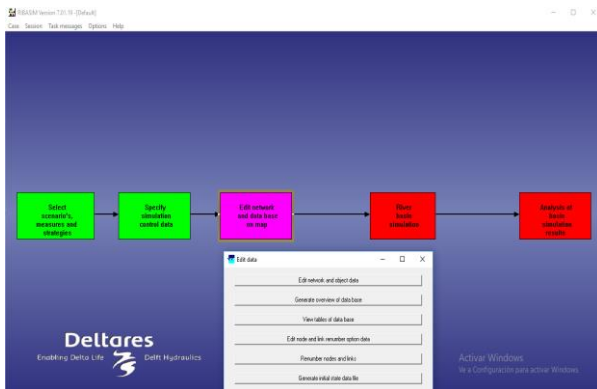


Ilustración 13 ventana principal
configuración modelo en RIBASIM

Fuente: Propia

A continuación, se configurará el escenario seleccionando en la barra de herramientas, Caso, nuevo caso y asignándole un nombre. En seguida, se selecciona Select Scenario's measurement and strategies, para establecer los archivos de donde serán leídos los datos para la modelación. Los archivos deberán estar previamente configurados.

A continuación, se selecciona “Specify simulation control data” para configurar el tiempo de modelación que deberá estar dentro del rango de fechas de los datos ingresados.



*Ilustración 14 Ventana configuración modelo, edición de la red en RIBASIM
Fuente: Propia*

El siguiente paso es seleccionar “Edit network and data base on map” en donde se encontrará la ventana mostrada en la Ilustración 14. En ella se selecciona “Edit network”. En este espacio se dibuja la topología de la cuenca siguiendo el flujo del agua al conectar los nodos.

RIBASIM tiene diferentes tipos de nodos y de enlaces para conectar dichos nodos. Dentro del espacio de edición de la topología se encontrarán los siguientes

tipos de nodos:

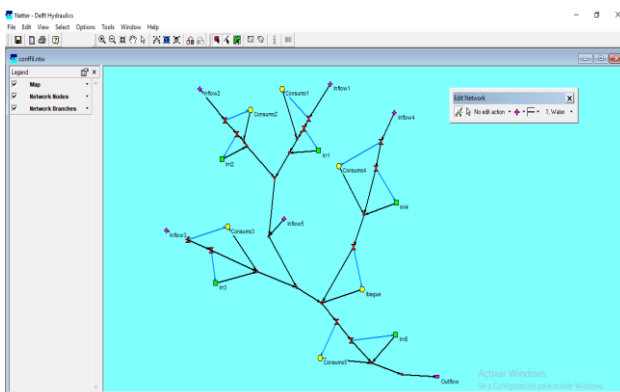
“**Inflow**”, en donde se asignan los caudales de entrada.

“**Public Water Supply**”, el cual representa la demanda de agua potable.

“**Fix Irrigation**”, el cual representa la demanda de agua para irrigación.

“**SW reservoir**”, el cual representa el almacenamiento de agua en los embalses.

“**Diversión**” el cual representa la extracción de caudal para suplir las demandas. “**OutFlow**” el cual representa la salida de la cuenca.



*Ilustración 15 Edición de la red en RIBASIM
Fuete: Propia*

Así mismo, los diferentes tipos de uniones entre nodos también debe ser seleccionadas. Se deberá utilizar:

“**SW Flow**” el cual representa el flujo de caudal en el río de un nodo a otro.

“**Diverted Flow**” el cual representa la conducción del caudal demandado a los puntos de demanda.

4.18.2 Ingreso de datos.

A continuación se ilustra el proceso necesario para el ingreso de datos en RIBASIM.

4.18.2.1 Configuración archivos

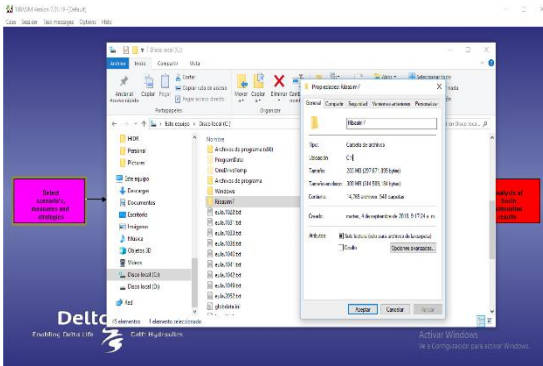


Ilustración 16 Ruta del programa RIBASIM

Fuente: Propia

Se recomienda instalar los archivos en la raíz de alguno de los discos duros como se muestra en la Ilustración 16.

Una vez ubicado el programa se accede a la cuenta creada. Dentro de esta carpeta principal se encontrarán otras carpetas secundarias en donde se configuran los archivos de texto para el modelo. Primero se ingresa a la carpeta "Hydrolog", en la cual se encontrarán varios

escenarios por defecto de RIBASIM. El escenario que se vaya a modificar debe coincidir con el que se haya establecido en el paso anterior, como se ve en la Ilustración 17

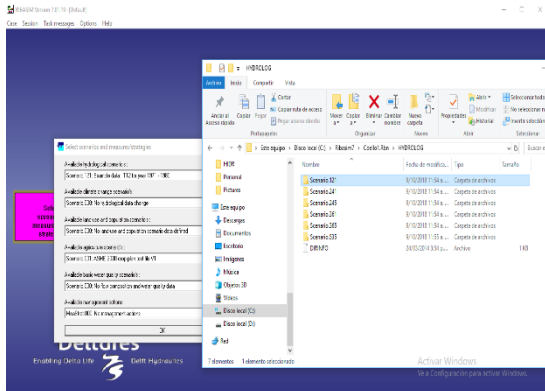


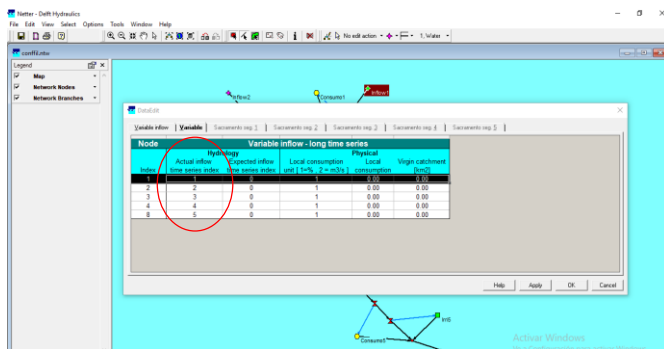
Ilustración 17 Modificación de series de datos para caudal

Fuente: Propia

Una vez en la carpeta del escenario correspondiente se abre el archivo "ACTINFLW.TMS". Dentro de este archivo están las instrucciones para editarlo con los datos correspondientes a la cuenta de estudio, como Número de estaciones, unidad de la serie de datos, nombre de la estación, Identificación de la estación (ID), y los datos típicos de las series de datos (año, intervalo de tiempo, y el valor de la serie). La serie de datos utilizada en este trabajo es la misma de la sección 4.3.1.1.

4.18.2.2 Asignación de caudales

Una vez configurados los archivos con los datos del modelo, se regresa a la sección de edición de la red de RIBASIM.



En el nodo “inflow” se selecciona, datos del modelo, Modelo de simulación con el botón derecho. En la pestaña variable de la ventana de edición de datos, se asigna la identificación de cada nodo de la serie de tiempo correspondiente del archivo ACTINFLW.TMS. (Ver

Ilustración 18 Asignación de caudales de entrada al modelo

Fuente: Propia

Ilustración 18)

4.18.2.3 Asignación de demandas hídricas

- Consumo.

La demanda por consumo se asigna en la ventana de edición de red, seleccionando con el botón derecho el nodo de consumo, datos del modelo, modelo de simulación.

Aunque la demanda de consumo se puede calcular de varias formas, en este trabajo de grado se utilizó la forma explícita, y se ingresó el caudal demandado mensualmente en cada nodo en metros cúbicos por segundo. Esta demanda se calculó de la misma forma que en la sección 3.4

- Irrigación.

De manera similar, la demanda por irrigación se asigna seleccionando el nodo de irrigación, datos del modelo, modelo de simulación en la ventana de edición de la red.

En la sección “Physical” de la ventana de edición de datos se ingresará una tabla con los valores de área irrigada y demanda neta mensual por nodo. Estos datos son los mismos que se mencionaron en la sección 3.4.

Igualmente, se pedirán datos de operación como la eficiencia de riego superficial y subsuperficial y el porcentaje de flujo devuelto como escorrentía superficial y como flujo subterráneo. De tener los valores se deberán ingresar. Para este trabajo se utilizaron los valores por defecto.

- Asignación de características de los embalses.

Las características de los embalses se asignan en la ventana de edición de red, seleccionando con el botón derecho el nodo de consumo, datos del modelo, modelo de simulación.

Utilizando las diferentes pestañas de la ventana de edición de datos se introducen la superficie de agua en el embalse, las características de almacenamiento, en donde deberá ingresar la curva de regulación del embalse (nivel en metros, área superficial en hectáreas y volumen en metro cubico al mes) y las reglas de operación, en donde se ingresan los niveles mensuales para control de flujo, almacenamiento constante y altura deseada del embalse.

Capítulo 5

Desarrollo de la plataforma HiWEB

5.1 Ecuaciones utilizadas en HiWEB

5.1.1 Balance hídrico

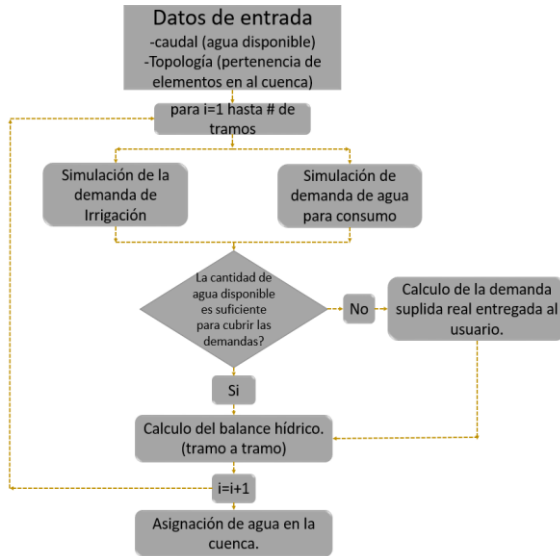


Ilustración 19 Diagrama de flujo Balance hídrico HiWEB

Fuente: Propia

En HIWEB la relación de las variables hidrológicas que entran y salen del punto de control se realiza dependiendo del intervalo de tiempo que se haya configurado en la serie de datos de caudales disponibles ingresados al modelo (día, mes, hora, etc.), y en la cuenca se realiza en cada río, pues como se dijo anteriormente HIWEB no tiene la capacidad de determinar el orden de las interacciones hídricas de los usuarios, pero si tiene la capacidad de determinar la pertenencia y orden de descarga de los ríos secundarios al río principal. Esta relación se calcula a partir de las ecuaciones de balance

de masa aplicada justo antes de la entrega del afluente al principal de la siguiente manera:

$$Vin_{i,j} - Vout_{i,j} = \Delta V_{i,j} \quad [8]$$

Donde,

- $Vin_{i,j}$: es el volumen que entra al punto de control en forma de escorrentía para el nodo i en el tiempo j.
- $Vout_{i,j}$ es el volumen de agua que sale del río al nodo i de demanda en forma de volumen de escorrentía o caudal extraído para suplir demandas, en el tiempo j.
- $\Delta V_{i,j}$ será el volumen disponible que será entregado al río principal en el tiempo j, como se ve en el diagrama de flujo mostrado en la Ilustración 19

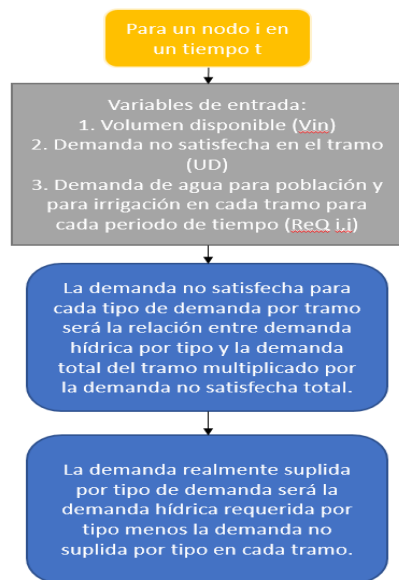


Ilustración 20 Diagrama de flujo demanda real suplida, HIWEB
Fuente: Propia

Para la asignación de agua en la cuenca es importante resaltar que HIWEB tratará de suplir todas las demandas de forma simultánea y equitativa. Al no tener prioridades en la asignación HIWEB, tratará de asignar la mayor cantidad de agua posible a cada nodo para cada periodo de tiempo, por lo que nunca tendrá caudales faltantes. Para determinar la demanda no suplida de cada tramo se utiliza el volumen disponible almacenado en los embalses, cuando es necesario. Gracias a esto se determina la cantidad de agua realmente suplida en cada tramo para cada periodo de tiempo, este proceso se muestra en la Ilustración 20 y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La priorización de demandas se deja para desarrollos posteriores.

```

'validacion de volúmenes disponibles'

UD=np.empty((12,Num_Rivers))
UD=UnmetDemand(Num_Rivers, Vin, Total_demand, Hydropower,Vol_Res,UD)

# 1. Unmet demand for agriculture
UDIrr=np.empty((12,Num_Rivers))
for i in range(Num_Rivers):
    for j in range(12):
        UDIrr[j][i]=(Monthly_Irrdemand[j][i]/Total_demand[j][i])*UD[j][i]

# 2.Unmet Demand for BigCity
UDD=np.empty((12,Num_Rivers))
for i in range(Num_Rivers):
    for j in range(12):
        UDD[j][i]=(Domestic_demand[j][i]/Total_demand[j][i])*UD[j][i]

#1. Supply Requiremnts delivered for each node
SupplyReqD=np.empty((12,Num_Rivers))
SupplyReqIrr=np.empty((12,Num_Rivers))

SupplyReqD=Domestic_demand-UDD
SupplyReqIrr=Monthly_Irrdemand-UDIrr
  
```

Ilustración 21 Código para cálculo de disponibilidad de volúmenes para abastecer las demandas en HIWEB
Fuente: Propia

5.1.2 Demanda de agua potable

La cantidad de agua potable requerida por cada nodo se calcula como:

$$Dom_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [8]$$

Dónde:

- $Actividad_Anual_i$ es la cantidad de unidades de consumo en el nodo i que anualmente requieren agua.
- Uso_i es la cantidad de agua que cada unidad de consumo requiere en un año.
- Dom_Demand_i son los requerimientos de agua potable del nodo i en el tiempo j .

5.1.2.1 Código en Python.

```
##Calculando la demanda domestica mensual.
gasto_diario=Domdemand_UseRate/365
demanda_diaria=Domdemand_ActLevel*gasto_diario

i=1
j=1
for j in range(Num_Rivers):
    for i in range (12):
        Monthly_Domdemand[i][j]=demanda_diaria[0][j]*DM[i]
        Monthly_Inddemand[i][j]=demanda_diaria[1][j]*DM[i]
        Monthly_Mindemand[i][j]=demanda_diaria[2][j]*DM[i]
```

Ilustración 22 Código para cálculo de la demanda doméstica en HIWEB
Fuente: Propia

5.1.3 Demanda de agua para irrigación

La cantidad de agua requerida para la irrigación de las plantas en cada nodo es calculada como:

$$Irr_Demand_i = Actividad_anual_i * Uso_i \quad [9]$$

Dónde;

- *Actividad_Anual_i*: Es la cantidad de áreas irrigables que anualmente se cultivan.
- *Uso_i*: Es la cantidad de agua que se requiere por área de irrigación en un año.
- *Irr_Demnd_i*: Son los requerimientos de agua para irrigación por nodo en un año.

5.1.3.1 Código en Python.

```
##Llamando la funcion de input data la demandas para irrigacion.
Irrdemand=_input_Irrdata(Num_Rivers)*10/0.6#serie de datos leida
IrrArea,Eficiencia_riego=_input_IrrAreadata(Num_Rivers)#valores extraidos del WEAP

for j in range(Num_Rivers):
    for i in range (12):
        Monthly_Irrdemand[i][j]=IrrArea[0][j]*Irrdemand[i][j]
```

*Ilustración 23 Código para cálculo de demanda por irrigación en HIWEB
Fuente: Propia*

5.1.4 Almacenamiento hídrico

Los embalses son representados a partir de unas zonas de uso predefinidas. Dichas zonas son: zona de control de crecientes, zona de conservación, zona de amortiguamiento y zona inactiva (Ilustración 3).

Para definir estas zonas se deben ingresar los volúmenes correspondientes al máximo de cada una como se muestra en la tabla de la Ilustración 36. La cantidad de agua liberada por cada embalse dependerá de la cantidad de agua que sea requerida, la cual dependerá de los niveles disponibles y los requerimientos de agua solicitados en cada río. El proceso de validación se describe en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con sus respectivas ecuaciones en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

En la ilustración 26 se puede observar que el proceso empieza por validar si la cantidad de agua disponible es suficiente para suplir las demandas. Luego, verifica si en el tramo de río que se está analizando hay un embalse. En seguida, verifica en qué zona está el nivel del embalse. Las zonas se han establecido de la siguiente manera:

La zona inactiva cuando el nivel del embalse está por debajo al correspondiente al 20% del volumen medio, En esta zona, el embalse no será utilizado.

La zona de control de crecientes cuando el nivel supera el 80% de la capacidad del embalse. Los embalses nunca podrán pasar este valor, pues se reserva este espacio para control de crecientes.

Si el nivel del embalse está dentro de las zonas de conservación o de amortiguamiento embalse, se verifica si el 60% del embalse, que es que efectivamente se puede utilizar, más el volumen disponible inicial, es suficiente para suplir los requerimientos de agua del sistema. De ser así, se calcula el volumen final del embalse para el periodo de tiempo y nodo del río analizados. De lo contrario se suplirá proporcionalmente la demanda de agua con los volúmenes iniciales disponibles y el volumen utilizable del embalse.

$$Si \ Qin_{i,j} \geq \sum Demands_{i,j} \rightarrow \quad [10]$$

$$WB_{i,j} = Qin_{i,j} - \sum Demands_{i,j} \quad [11]$$

Entonces:

$$Si \ reservoir_{branchj} = 1 \text{ "There is a reservoir"} \quad [12]$$

$$Si \ ResLev_j \geq 0.4 \text{ and } ResLev_j \leq 0.8 \rightarrow \quad [13]$$

$$Qin_{i,j} = Qin_{i,j} + \forall res_{i,j} \quad [14]$$

$$Si \ Qin_{i,j} \geq \sum demands_{i,j} \quad [15]$$

$$WB_{i,j} = Qin_{i,j} - \sum demands_{i,j} \quad [16]$$

Entonces:

$$UD_{i,j} = \sum Demnds_{i,j} - Qin_{i,j} \quad [17]$$

$$Requirements_{i,j} = \sum demands_{i,j} - UD_{i,j} \quad [18]$$

$$WB_{i,j} = Qin_{i,j} - requirements_{i,j} \quad [19]$$

Donde:

- Q_{in} : Volumen de agua disponible en el nodo i en el tiempo j
- UD : demanda no suplida en el nodo i en el tiempo j
- $ResLev$: relación entre la altura del embalse en periodo i y la altura del embalse en el periodo $i-1$
- WB : asignación del agua disponible en el nodo i en el tiempo j
- V_{res} : Volumen del embalse
- $Index\ j$: representa el intervalo de tiempo
- $Index\ i$: representa el tramo de río dentro de la cuenca.

5.2 Desarrollo del software HiWEB

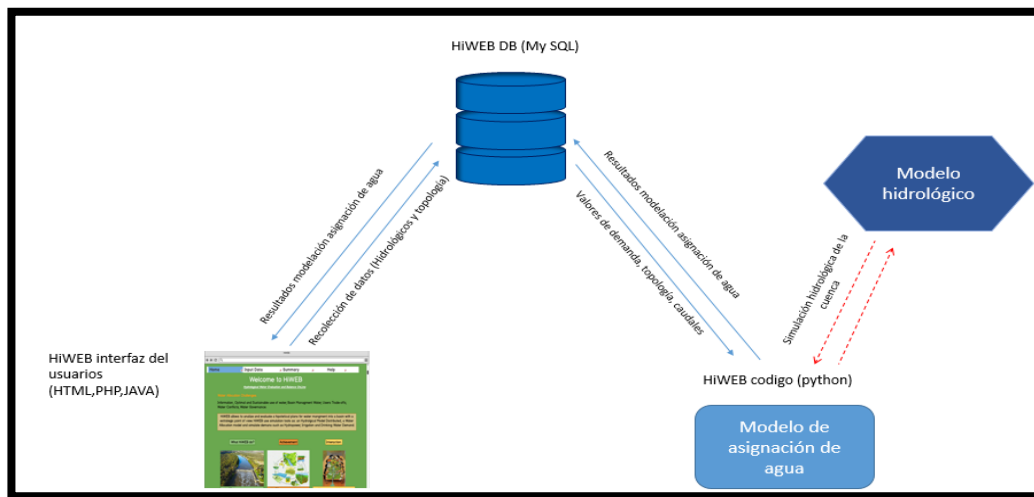


Ilustración 24 diagrama de flujo interconexión HiWEB

Fuente: Propia

HiWEB consta de tres componentes de computadora, que se explican a continuación. Los códigos completos están disponibles en el repositorio de GitHub (<https://github.com/XimenaLemaitreR/HiWEB>). La relación entre estos tres componentes se muestra en la Ilustración 24. La base de datos HiWEB DB (MySQL) es el centro de control principal, donde el usuario inserta los datos a través de la interfaz de usuario de HiWEB (Html, Php y Java). Los datos se utilizarán en el modelo de asignación de agua, código HiWEB, desarrollado en Python. Una vez que finalizan los cálculos del modelo, los

resultados se envían a la base de datos, a la base de datos de HiWEB y luego a la interfaz de usuario de HiWEB donde se publican y el usuario puede acceder a ellos.

El modelo permite una interacción bidireccional con modelos hidrológicos distribuidos existentes o diseñados específicamente.

5.2.1 Interfaz del usuario

La interfaz de usuario se desarrolló en dos lenguajes computacionales .html y .php. Para la ejecución de la interfaz se necesita tener instalado el controlador de plataformas de apache XAMP.

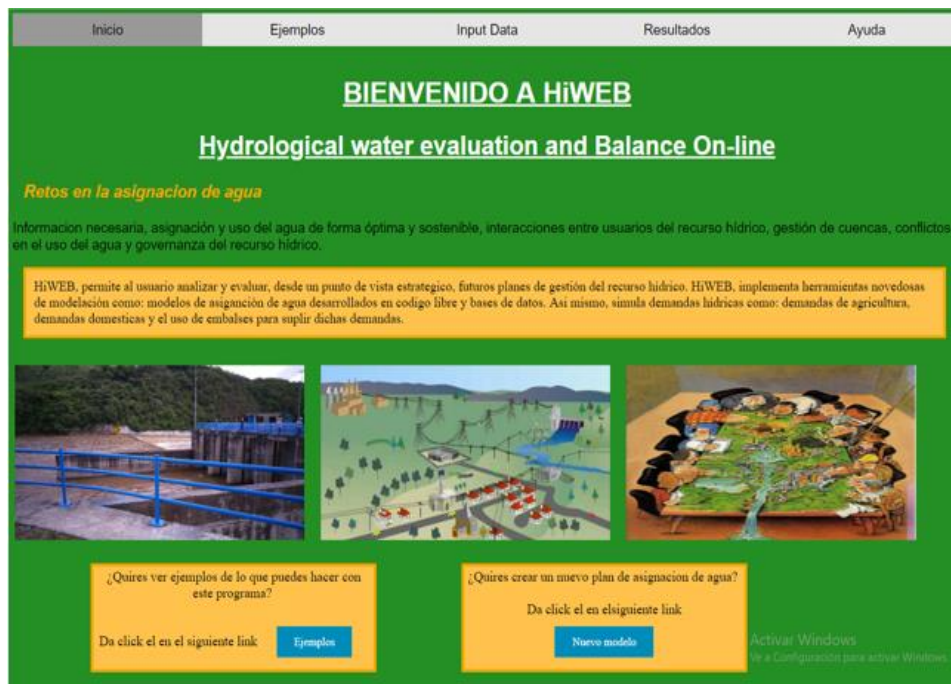


Ilustración 25 Pestaña de inicio de HiWEB
Fuente: Propia

La interfaz de HiWEB está compuesta por 5 pestañas principales: inicio, ejemplos, ingreso de datos, resultados y ayuda.

En la pestaña de inicio se encuentra la página de bienvenida a HiWEB (Ilustración 25), en donde el usuario podrá encontrar la explicación del funcionamiento de la herramienta, el porqué de su creación, su funcionamiento y usabilidad. También se encuentran dos enlaces

los cuales guían al usuario hacia un ejemplo del caso de estudio de la asignación de agua la cuenca de Coello, y hacia la creación de un plan asignación de agua.

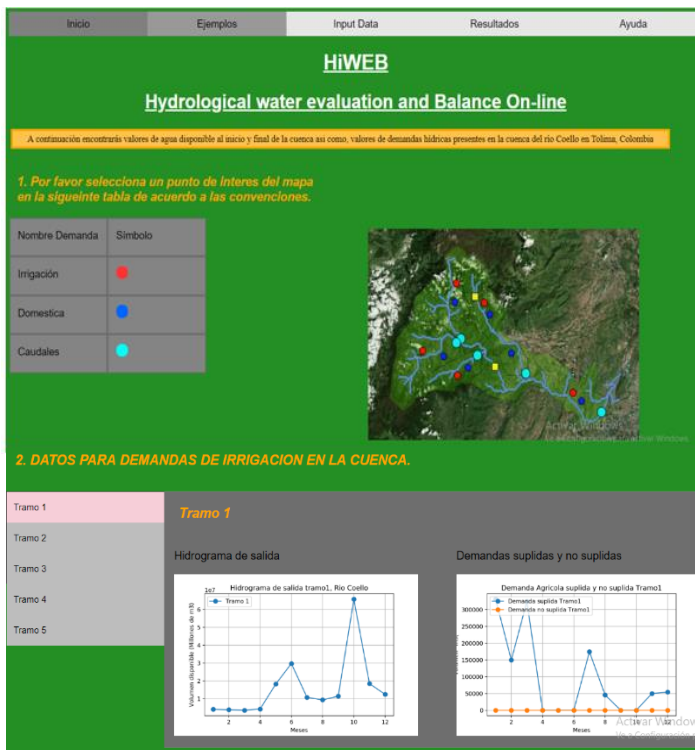


Ilustración 26 Pestaña de ejemplo y pestaña de resultados de asignación de agua en HiWEB
Fuente: Propia

Las pestañas ejemplos y resultados (Ilustración 26) tiene la misma distribución y organización. En estas pestañas el usuario podrá tener acceso a los resultados de asignación de agua en la cuenca que se esté estudiando.

En estas pestañas el usuario encontrará una tabla con las convenciones y un mapa con cada una de las demandas hídricas y los puntos geográficos en donde se está disponible el caudal.

Una vez se selecciona el tipo de demanda que se quiere evaluar, en la parte inferior de la página se selecciona el tramo para

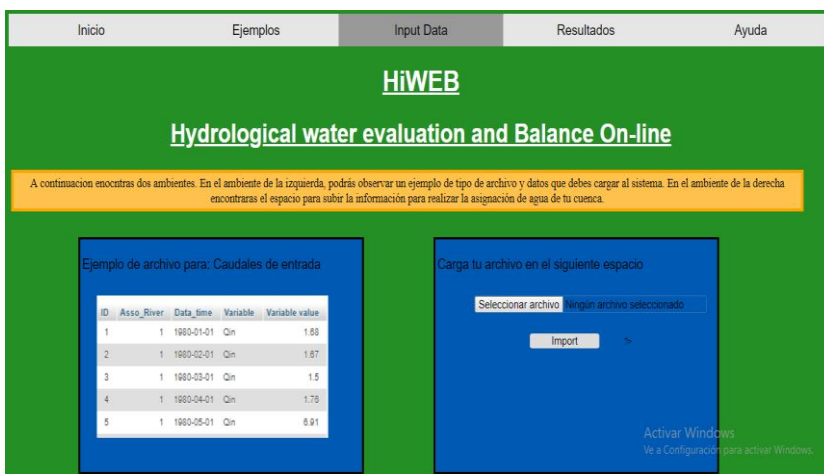


Ilustración 27 Pestaña de ingreso de datos en HiWEB
Fuente: Propia

visualizar los hidrogramas de las demandas suplidas, las no suplidas y el caudal disponible después de la asignación.

La siguiente pestaña es la de ingreso de datos (Ilustración 27), en esta sección el usuario encontrará dos

ventanas, la izquierda muestra un ejemplo del de las tablas para la lectura de la información en la base de datos. En la ventana de la derecha se encuentra el buscador de archivos en el cual facilita la carga de la información en la base de datos.

La ultima pestaña es la de ayuda (Ilustración 28), en donde el usuario encontrará el soporte técnico de la página HiWEB. Inicialmente, encontrará el enlace al repositorio del código en GitHub, luego encontrará un enlace que lo lleva directamente a un asistente para enviar un correo al equipo de desarrollo. Finalmente, el equipo de desarrollo se presenta en la parte final de esta página.

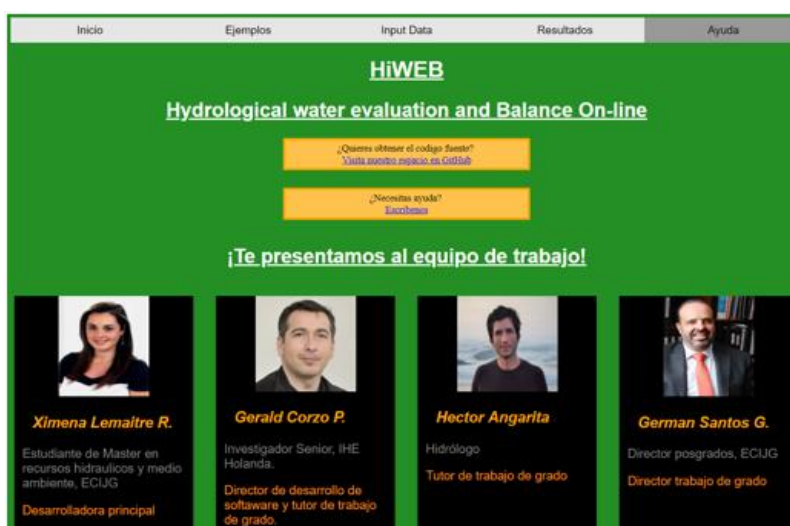


Ilustración 28 Pestaña de ayuda y soporte técnico de HiWEB
Fuente: Propia

5.2.2 Base de datos

La base de datos se desarrolló en MySQL. Para poder controlar y organizar la base de datos se necesita tener instalado el controlador de plataformas de MySQL, XAMP.

Como se puede observar, por medio de relaciones uno a muchos se logra establecer de una forma simple la pertenecía de cada cuenca, río y nodo de demanda. En donde, por ejemplo, cada río puede tener infinitos nodos de demanda de agua potable, para irrigación o embalses asociados, pero, solo puede pertenecer a una única cuenca.

Adicionalmente y, para facilidad, la base de datos lee los datos hidrológicos de demanda y caudales disponibles desde un archivo de texto o .csv.

Como se puede observar HiWEB, tiene la capacidad de descifrar la pertenencia de cada elemento de la cuenca, pero no tiene la capacidad de predecir el orden de la relación entre los usuarios del agua asociados a un río. Esto se deja para un posterior desarrollo.

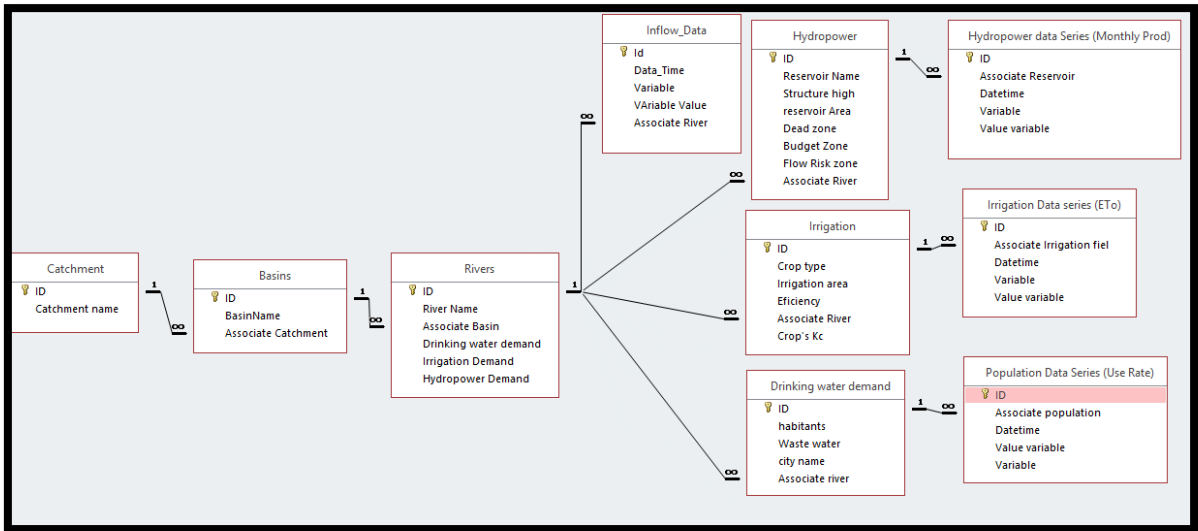


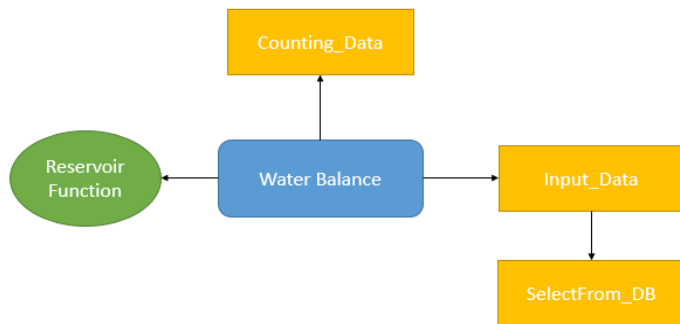
Ilustración 29 Estructura de base de datos de HIWEB
Fuente: Propia

5.2.3 Modelo de asignación hídrica

El modelo de asignación hídrica está desarrollado en código de Python, versión 2.7. Se debe tener instalado el emulador Spyder y las siguientes librerías:

- Mathplotlib
- Numpy
- Pandas
- Calendar
- Pymysql

El código en Python se compone de cinco módulos, WaterBalance, Counting_Data, Input_Data, SelectFromDB y Reservoir functions.



*Ilustración 30 Diagrama de flujo modelo Python de HIWEB
Fuente: Propia*

El módulo de Counting_data, cuenta la cantidad de cuencas, subcuencas y ríos que tiene la cuenca de estudio y determina también la escala de las series de datos que se ingresaron a la base de datos y, de acuerdo a estos dos parámetros, determina el tamaño de los matrices que utiliza el modulo central, WaterBalance,

para hacer los cálculos de la asignación hídrica.

En el módulo SelectFromDB, se realiza la conexión con la base de datos alojada en la plataforma de control y organización de MySQL para extraer los datos de cada una de las tablas explicadas en la sección 6.2. Estos datos son extraídos de la base de datos como un archivo de texto al cual, se le debe realizar un procesamiento para poder utilizar los valores ingresados en los cálculos del módulo central, WaterBalance.

En el módulo input_data, se hace la lectura de los archivos de texto extraídos de las bases de datos y se convierten en variables numéricas para Python. Dichas variables se guardan en las matrices previamente definidas en el módulo de Counting_Data.

En el módulo de Reservoir_Functions, se realizan los cálculos para la utilización o reserva de agua en los embalses. El uso de los embalses presentes en la cuenca, se determina a partir de unas reglas de uso, las cuales son explicadas en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Finalmente en el módulo central, WaterBalance, se realiza el balance de masas de la cuenca evaluada, como se explicó en la sección 5.1.1 y se conecta con los demás módulos como se muestra en la Ilustración 30.

Capítulo 6

Implementación del caso de estudio en HiWEB

6.1 Estructuración de la topología de la cuenca

Para poder ejecutar HiWEB en cualquier computadora, se deben tener instalados los siguientes programas:

- Spyder 2.7 (emulador de Python)
- XAMP (Panel de control para las plataformas de Apache y MySQL)

Los pasos y recomendaciones para la instalación se encuentran en el anexo 2.

Una vez instalados estos programas, se debe ir al repositorio del código de HiWEB, el mismo se encuentra en GitHub en el siguiente enlace, <https://github.com/XimenaLemaitreR/HiWEB>. Cuando se cuente con el código y los programas necesarios para ejecutar el mismo, se podrá iniciar con la configuración del modelo.

La estructura topológica en HiWEB se ingresa a través de una base de datos que tiene la configuración que se presenta en la Ilustración 29

Id	nombre	ID	Basin name	Associate Catchment
1	Coello	1	Basin_Riv1	1
		2	Basin_Riv2	1
		3	Basin_Riv3	1

Ilustración 31 Ejemplo tabla para características de cuenca y subcuenca

a: ejemplo de tabla para cuenca

b: Ejemplo de tabla para subcuenca

Fuente: Propia

Para poder establecer la topología de la cuenca se crean tres tablas en formato .csv, La primera es Catchment (cuenca) con dos propiedades, identificación y nombre de la cuenca (Ilustración 31a). La segunda es Basin (Sub cuenca) con tres propiedades,

identificación, nombre y la cuenca asociada (Ilustración 31b). Finalmente se crea la tabla Rivers (ríos) con seis propiedades, identificación, nombre, subcuenca asociada, demanda

de agua potable, demanda para irrigación y demanda para almacenamiento de agua (Ilustración 32).

Como se observa en la Ilustración 32, los campos de la tabla Ríos se llena con unos (1) y ceros (0) para representar la interacción entre los nodos de demanda y el río al cual pertenecen, y no las características de la demanda hídrica. Por ejemplo, el río 1 tiene demandas hídricas para agua potable e irrigación y no para almacenamiento.

Luego las tablas se cargan a la base de datos desde la web, como se observa en la Ilustración 33.

ID	River name	Associate basin	Drinking water demand	Irrigation demnad	Hydropower demand
1	Riv1	1	1	1	0
2	Riv2	2	1	1	0
3	Riv3	3	1	1	0
4	Riv4	4	1	1	1
5	Riv5	5	1	1	1

*Ilustración 32 Ejemplo tabla Ríos y la interacción de las demandas
Fuente: Propia*

6.2 Ingreso de datos.

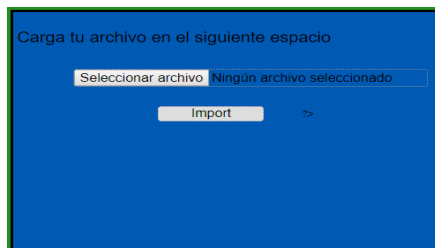
El ingreso de datos en HiWEB es relativamente sencillo. Para cada uno de los recuadros que se observan en la Ilustración 29 se llena una tabla con los mismos campos. Dicha tabla se debe realizar en formato .CSV para poder ser leída y agregada desde la interfaz WEB.

6.2.1 Asignación de Caudales Disponibles.

Las series de datos de caudales se ingresa de la siguiente forma:

Se genera una tabla con los campos que se observan en la Ilustración 33a, se guarda en el formato .CSV y desde la interfaz web se carga a la base de datos como se observa en la Ilustración 33b.

ID	Asso_River	Data_time	Variable	Variable value
1	1	1980-01-01	Qin	1.68
2	1	1980-02-01	Qin	1.67
3	1	1980-03-01	Qin	1.5
4	1	1980-04-01	Qin	1.76
5	1	1980-05-01	Qin	6.91



*Ilustración 33 Ingreso de caudales disponibles en HiWEB. A: Ejemplo Tabla de datos. B: lectura de datos desde la web
Fuente: Propia*

6.2.2 Asignación de demandas hídricas

De forma similar a los caudales disponibles, se asignan las demandas hídricas al modelo.

- Demanda de agua potable.

ID	Associate river	Demand name	Demand type	Activity_level	use_rate	consumption
1	1	Riv1	Domestic	50000	45.625	0.4
2	1	Riv1	Industry	2000	1000	0.4
3	1	Riv1	Mining	500	10000	0.4
4	1	Riv1	Industry	0	0	0
5	1	Riv1	Mining	0	0	0
6	2	Riv2	Domestic	100000	45.625	0.4
7	2	Riv2	Industry	4000	1000	0.4
8	2	Riv2	Mining	1000	10000	0.4

*Ilustración 34 Características de demanda de agua potable en HiWEB
Fuente: Propia*

HiWEB puede diferenciar varios tipos de demanda de agua potable. Para el caso de estudio se trabajaron 3 de los más comunes en la cuenca del río Coello, agua potable, agua para las industrias y agua para la minería (la recolección de datos se explicó en la sección 3.12). Para la asignación de esta demanda se crea la tabla con

los campos que se observan en la Ilustración 34 y se carga en la base de datos como se muestra en la Ilustración 33.

- Demanda de agua para irrigación.

Para la demanda para irrigación HiWEB requiere la cantidad de agua que necesitan las plantas sembradas en una hectárea, para crecer. Adicionalmente, se necesita el área irrigable y la eficiencia de riego (estos datos fueron obtenidos y procesados como se explica en la sección 3.123.12).

ID	Crop type	Irrigation area	Efficiency	Associate river
1	dom_1	78	0.6	1
2	dom_2	3100	0.6	2
3	dom_3	1500	0.6	3

ID	Aso_IrrFiel	Data_time	Variable	Variable value
1	1	1980-01-01	Irr_Dem	254.5
2	1	1980-02-01	Irr_Dem	115
3	1	1980-03-01	Irr_Dem	249.6
4	1	1980-04-01	Irr_Dem	0

Ilustración 35 Ejemplo de tablas asignación demanda para irrigación en HiWEB.

Fuente: Propia

del embalse, zona inactiva, zona utilizable, zona de control de inundaciones, río asociado, como se observa en la Ilustración 36. De forma similar a las anteriores demandas, una vez se tenga la tabla se carga en la base de datos desde la web como se mostró en la Ilustración 33.

Para la asignación de esta demanda se crea la tabla con los campos que se observan en la Ilustración 35 y se carga en la base de datos como se muestra en la Ilustración 33.

- Almacenamiento hídrico

Para establecer el almacenamiento se crea una tabla con las características de operación de los embalses: Altura, área

ID	Reservoir name	Structure high	Reservoir area	Dead zone	Budget zone	Flow risk zone	Associate river
1	Riv1	0	0	0	0	0	1
2	Riv2	0	0	0	0	0	2
3	Riv3	0	0	0	0	0	3
4	Cuenca alta	80	12.5	8	70	79	4
5	Cuenca media	50	10	5	45	49	5

Ilustración 36 Ejemplo tabla asignación de característica de embalses

Fuente: Propia

Capítulo 7

Análisis y Comparación de resultados

7.1 Resultados del modelo en WEAP

El esquema de la cuenca en WEAP se muestra en la Ilustración 37. Como se puede

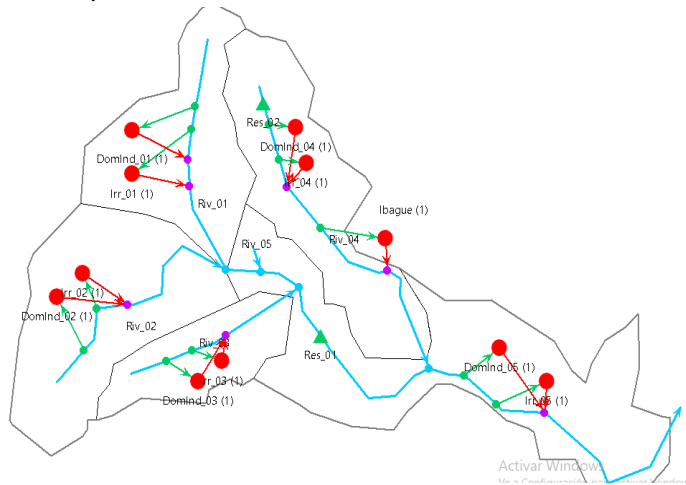


Ilustración 37 Esquema de la cuenca en WEAP

Fuente: Propia

observar, se utilizaron nodos de demanda, embalses y la representación esquemática de los ríos.

Los caudales disponibles mensualmente en todos los tramos, después de suplir las demandas de cada río se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1 Caudales disponibles después de suplir demanda en cada tramo, en millones de metros cúbicos en WEAP.

Fuente: Propia

Tramo de río	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Riv_01	14.03	11.93	14.58	22.00	32.83	29.82	24.81	19.46	22.30	27.50	22.05	18.65
Riv_02	10.76	8.66	9.77	17.13	27.42	23.16	18.15	14.81	13.93	17.60	15.62	13.37
Riv_03	4.86	4.08	4.82	9.19	13.64	11.36	8.93	7.13	7.36	9.42	7.95	6.28
Riv_04	16.37	14.97	19.25	34.82	45.86	34.12	29.55	23.90	29.27	39.66	32.40	20.92
Riv_05	19.60	17.79	22.57	40.00	50.34	35.66	28.48	23.18	26.09	37.58	31.88	25.63

De manera similar, para las demandas domésticas y de irrigación suplidas mensualmente se presentan en la Tabla 4 y la Ilustración 38 junto con la Ilustración 40 y las no suplidas en la Tabla 5 y la Ilustración 39 junto con Ilustración 41

Tabla 3 Demandas suplidas en cada nodo, en millones de metros cúbicos en WEAP

Fuente: Propia

Nodo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
DomInd_01	0.23	0.29	0.54	0.76	0.79	0.63	0.37	0.29	0.70	0.79	0.76	0.52
DomInd_02	0.46	0.58	1.08	1.53	1.58	1.26	0.73	0.58	1.39	1.58	1.51	1.03
DomInd_03	0.23	0.29	0.54	0.76	0.79	0.63	0.37	0.29	0.70	0.79	0.76	0.52
DomInd_04	0.46	0.58	1.08	1.53	1.58	1.26	0.73	0.58	1.39	1.58	1.51	1.03
DomInd_05	0.24	0.30	0.56	0.79	0.81	0.65	0.38	0.30	0.72	0.81	0.78	0.53
lbage	1.41	1.77	3.32	4.68	4.84	3.85	2.24	1.78	4.26	4.84	4.64	3.16
Irr_01	0.05	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.05
Irr_02	2.81	2.60	2.04	0.00	0.00	1.79	1.69	2.08	2.03	1.37	2.25	3.46
Irr_03	1.20	1.02	0.70	0.00	0.00	0.71	0.81	0.87	0.66	0.37	0.37	1.37
Irr_04	8.92	6.47	5.16	0.00	0.00	6.47	6.50	6.35	2.48	1.42	2.80	11.03
Irr_05	65.39	55.96	63.42	0.00	14.13	99.34	97.94	86.58	62.61	28.27	41.89	76.14

Tabla 2 Demanda no suplida en millones de metros cubicos en WEAP

Fuente: Propia

Nodo	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
DomInd_01	0.56	0.42	0.25	0.00	0.00	0.13	0.42	0.50	0.07	0.00	0.01	0.27
DomInd_02	1.12	0.85	0.50	0.00	0.00	0.27	0.85	0.99	0.14	0.00	0.01	0.55
DomInd_03	0.56	0.42	0.25	0.00	0.00	0.13	0.42	0.50	0.07	0.00	0.01	0.27
DomInd_04	1.12	0.85	0.50	0.00	0.00	0.27	0.85	0.99	0.14	0.00	0.01	0.55
DomInd_05	0.58	0.44	0.26	0.00	0.00	0.14	0.44	0.51	0.07	0.00	0.01	0.28
lbage	3.43	2.60	1.52	0.00	0.00	0.83	2.60	3.05	0.42	0.00	0.04	1.67
Irr_01	0.15	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04
Irr_02	8.14	4.70	1.15	0.00	0.00	0.49	2.41	4.31	0.25	0.00	0.03	2.47
Irr_03	3.64	1.96	0.42	0.00	0.00	0.22	1.24	1.92	0.09	0.00	0.01	1.05
Irr_04	29.51	13.45	3.38	0.00	0.00	2.07	10.58	14.99	0.37	0.00	0.05	8.89
Irr_05	189.01	99.50	35.51	0.00	0.00	27.86	142.32	181.96	8.06	0.00	0.51	51.06

Tabla 4 Porcentaje de cubrimiento de las demandas en WEAP

Fuente: Propia

Nodo	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
DomInd_01	29.2	40.6	68.7	100.0	100.0	82.4	46.4	37.0	91.1	100.0	99.2	65.5
DomInd_02	29.2	40.6	68.6	100.0	100.0	82.4	46.4	36.9	91.1	100.0	99.2	65.4
DomInd_03	29.2	40.6	68.7	100.0	100.0	82.4	46.4	37.0	91.1	100.0	99.2	65.5
DomInd_04	29.2	40.6	68.6	100.0	100.0	82.4	46.4	36.9	91.1	100.0	99.2	65.4
DomInd_05	29.2	40.6	68.6	100.0	100.0	82.4	46.3	36.9	91.1	100.0	99.2	65.4
lbage	29.1	40.5	68.6	100.0	100.0	82.4	46.3	36.9	91.1	100.0	99.2	65.4
Irr_01	29.3	40.8	68.9	100.0	100.0	82.7	46.9	37.2	91.6	100.0	99.3	65.6
Irr_02	29.1	40.5	68.6	100.0	100.0	82.4	46.3	36.9	91.1	100.0	99.2	65.4
Irr_03	29.1	40.5	68.6	100.0	100.0	82.4	46.3	36.9	91.1	100.0	99.2	65.4
Irr_04	29.0	40.4	68.6	100.0	100.0	82.4	46.3	36.9	91.1	100.0	99.2	65.3
Irr_05	29.0	40.4	68.5	100.0	100.0	82.3	46.1	36.8	91.0	100.0	99.2	65.3

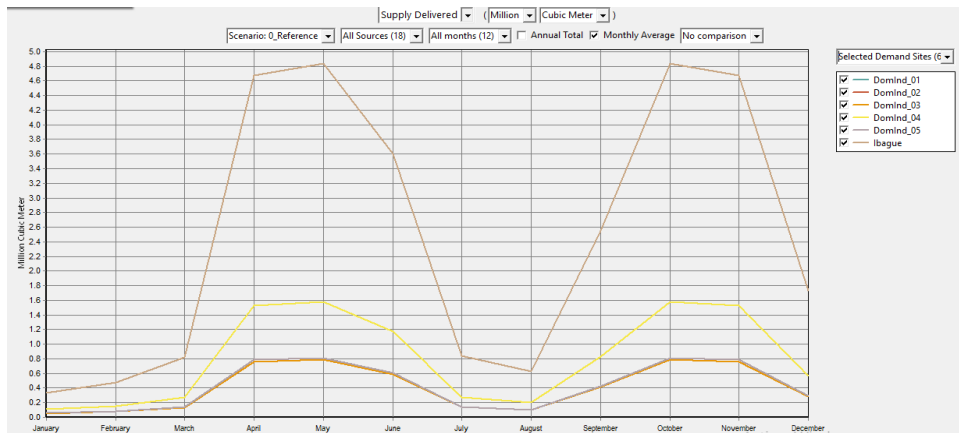


Ilustración 38 Demanda suplida Agua potable en WEAP
Fuente: Propia

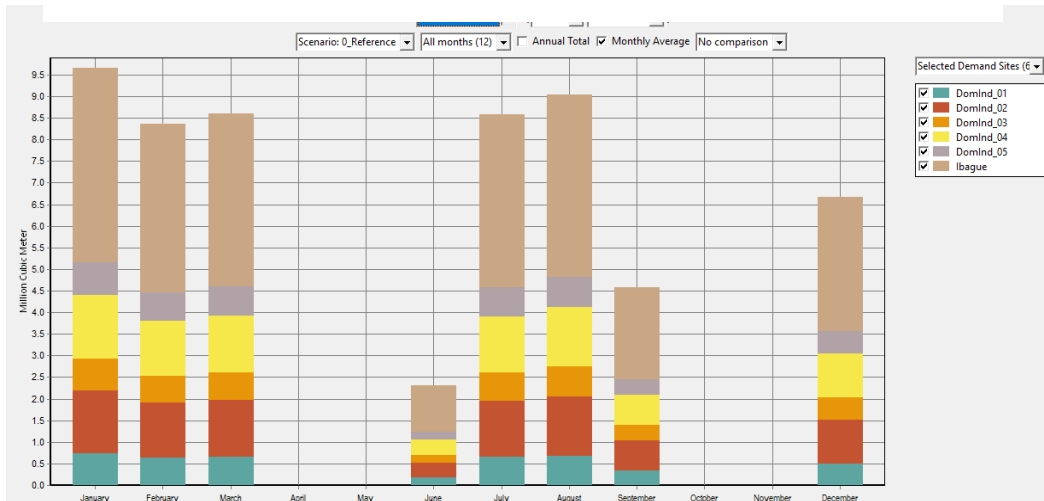


Ilustración 39 Demanda no suplida Agua potable en WEAP
Fuente: Propia

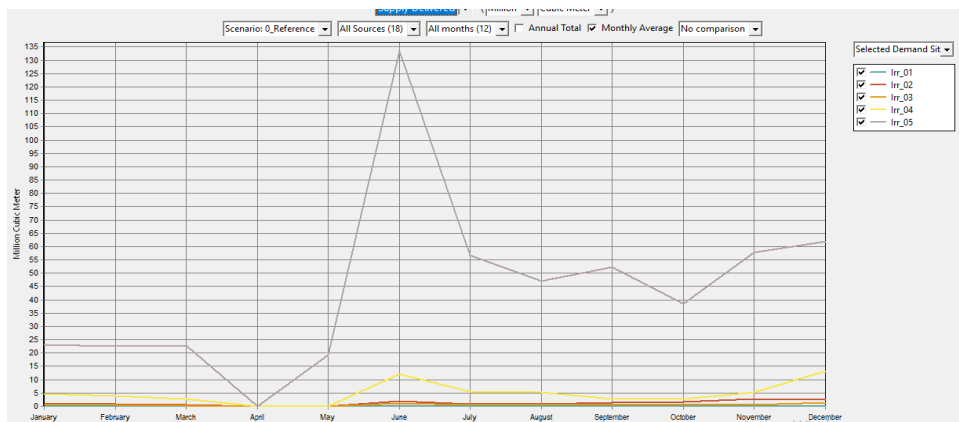


Ilustración 40 Demanda suplida irrigación en WEAP
Fuente: Propia

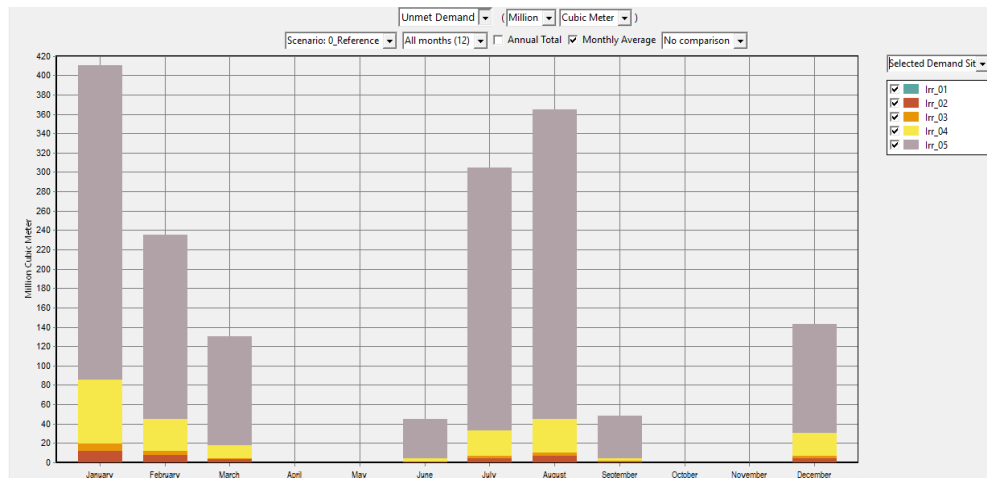


Ilustración 41 Demanda no suplida para irrigacion en WEAP
Fuente: Propia

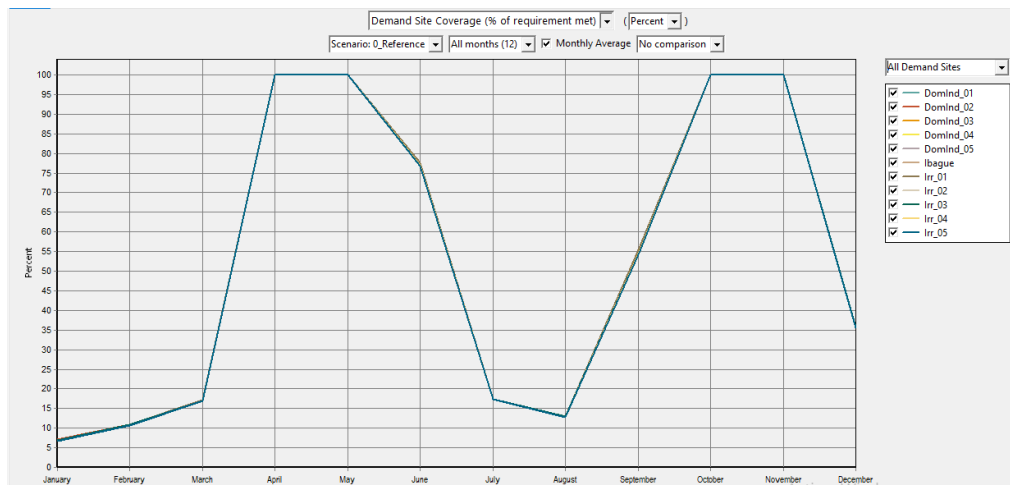


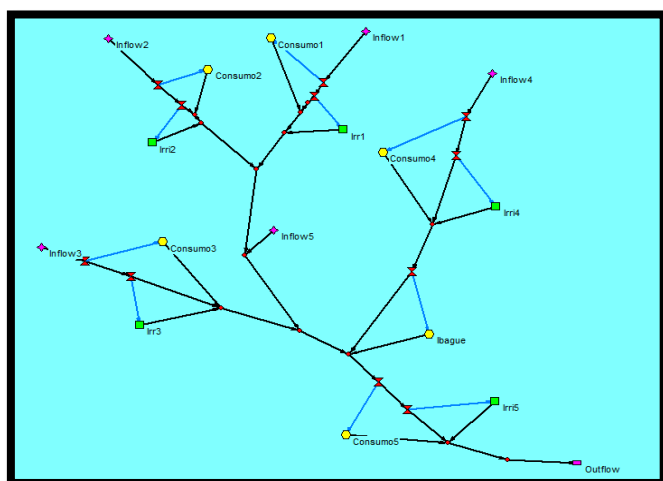
Ilustración 42 Porcentaje de cobertura de demanda en WEAP
Fuente: Propia

De acuerdo a los resultados obtenidos y como se muestra en la Ilustración 42, el porcentaje de cobertura de la demanda en la cuenca del río Coello es del 100% en los meses de abril, mayo y octubre, lo que quiere decir que, en estos tres meses con el caudal disponible es suficiente para suplir todas las demandas en el sistema. Ahora bien, en los meses de junio, septiembre y noviembre el porcentaje de cobertura está entre el 90% y el 80%, lo que significa que en estos tres meses el caudal disponible no es suficiente para suplir la totalidad de la demanda, pero se tiene la cantidad necesaria para cubrir los porcentajes mencionados de forma equitativa en la cuenca. Así mismo, el porcentaje de cobertura más bajo, el cual

es de menos del 15%, se encuentra en los meses de enero y agosto, lo que significa que en estos dos meses la cantidad de agua disponible es apenas la suficiente para suplir un 15% de la totalidad de la demanda de una forma equitativa.

Igualmente, se observa que los meses en donde se sule menos demanda tanto en los sectores de irrigación como en el sector de agua potable son enero y agosto, como se observa en la Ilustración 39 e Ilustración 41. Y así mismo y de acuerdo a este modelo, los caudales más bajos disponibles para medio ambiente y futuras concesiones es en la subcuenca 3, como se observa en la Tabla 2, en al cual el caudal más bajo disponible se registró en el mes de febrero con 4.08 millones de metros cúbicos al año, lo que son 0.13 metros cúbicos por segundo. Y el caudal más alto se registró en el mes de mayo con 13.64 millones de metros cúbicos al año, lo que son 0.43 metros cúbicos por segundo.

7.2 Resultados del modelo en RIBASIM



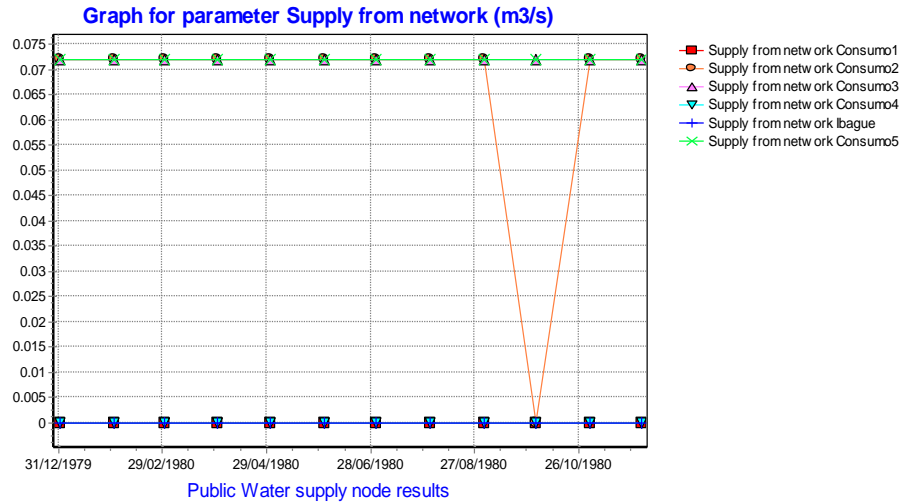
*Ilustración 43 Representación gráfica de la cuenca Coello, RIBASIM
Fuente: Propia*

En la Ilustración 43 se presenta la representación gráfica de la cuenca del río Coello en RIBASIM. Como se explicó en la sección 4.18.1, se utilizaron demandas explícitas de irrigación y de consumo de agua potable. Así mismo, para los valores de los caudales iniciales se leyeron de un archivo de texto en la carpeta “Hydrolog”, Escenario 121.

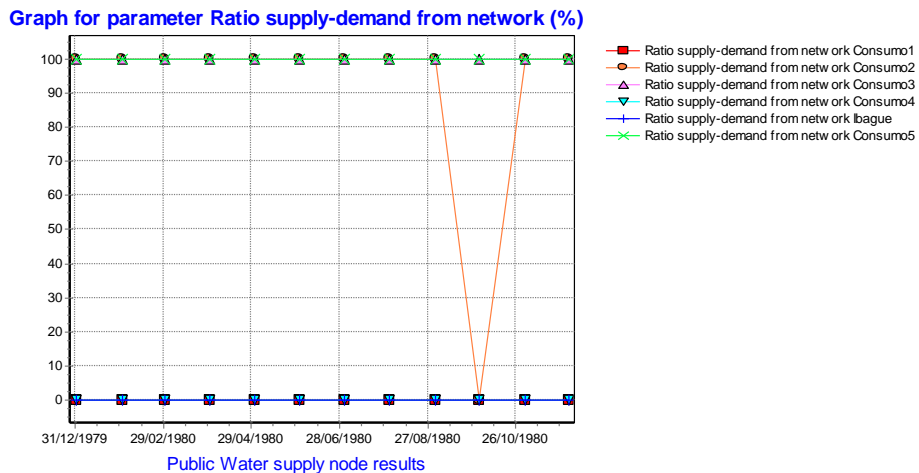
A continuación, se presentan los resultados de demanda suplida, no suplida y porcentaje de cobertura de la demanda, así como, los caudales disponibles después de suplir las demandas en cada tramo.

Se observa en la Ilustración 44, que para las demandas del tramo 4 la disponibilidad del agua no es suficiente para suplir la totalidad de las demandas, y al estar el nodo que

representa el distrito de riego aguas arriba del nodo que representa la captación para la población, y teniendo en cuenta la hipótesis para la solución de la ecuación de balances de masas que tiene RIBASIM, se puede analizar que el agua se está extrayendo en su totalidad para suplir los requerimientos hídricos de los distritos de riego, como se observa en la Ilustración 47.



*Ilustración 44 Demanda suplida agua potable, RIBASIM
Fuente: Propia*



*Ilustración 45 Porcentaje de cobertura de demanda de agua potable, RIBASIM
Fuente: Propia*

Como se observa en la Ilustración 46, el cubrimiento de la demanda, en el sistema hídrico que representa la cuenca de Coello, modelado a partir de la herramienta RIBASIM, tiene varios porcentajes, el más preocupante es el porcentaje de cubrimiento para el tramo 5, pues al ser este el tramo más aguas debajo de toda cuenca y al tener uno de los nodos con mayor requerimiento de agua, solo en el mes de Octubre se logra suplir la totalidad de la demanda, y en el resto del año solo en el mes de mayo se logra tener disponibilidad para cubrir el 10% de los requerimientos de ese tramo del sistema hídrico.

Esto muestra que para la cuenca del rio Coello es de vital importancia implementar un plan de gestión hídrica, pues con las disponibilidades normales y naturales de caudal no se logra suplir toda la demanda del sistema.

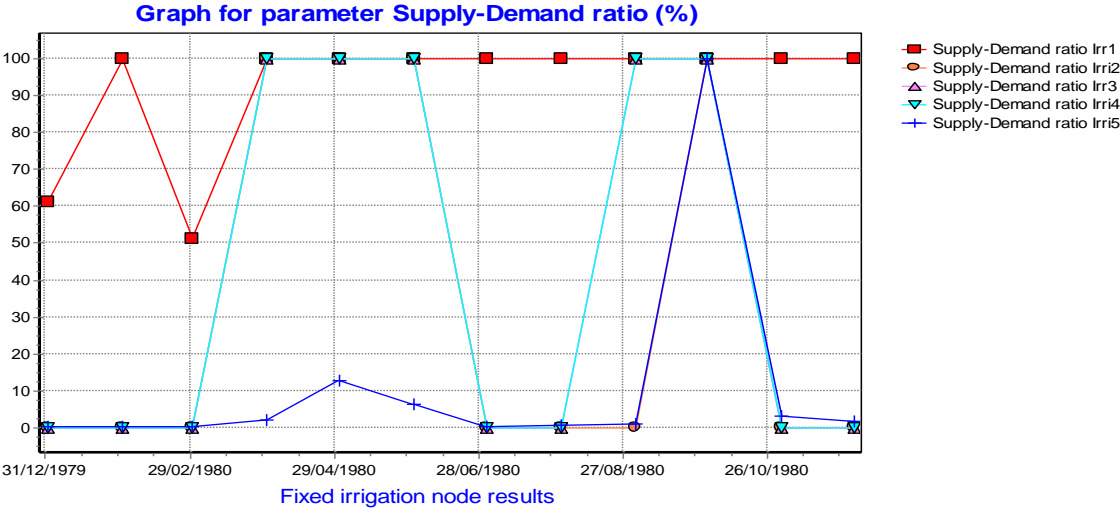
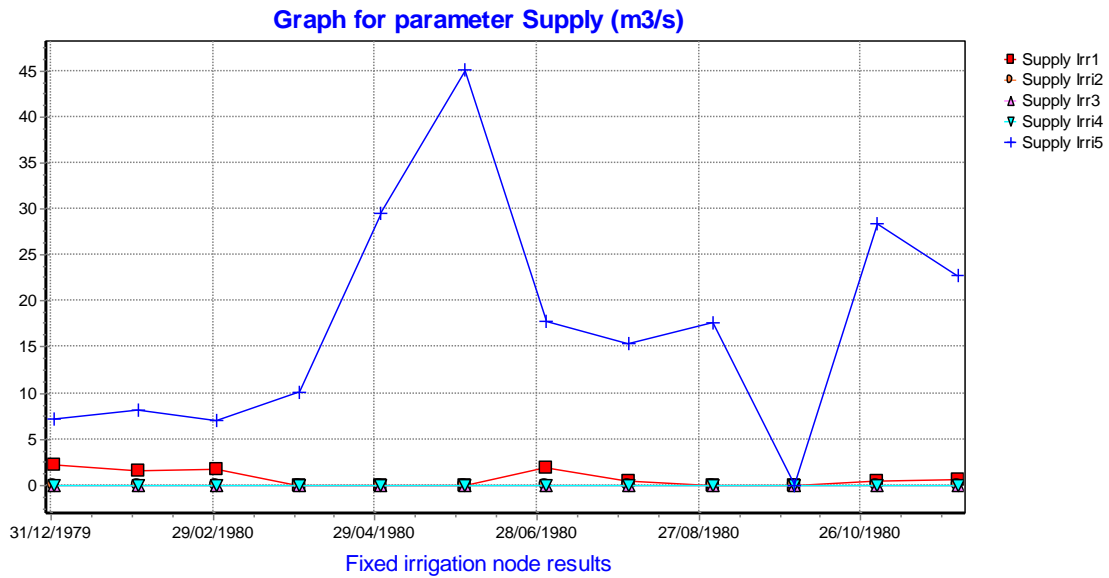


Ilustración 46 Porcentaje de cubrimiento de la demanda, RIBASIM
Fuente: Propia



*Ilustración 47 Resultados demanda suplida para irrigación, RIBASIM
Fuente: Propia*

Table 7. Public water supply nodes summary

Shortage may occur due to limited water availability and due to limited plant capacity.

Water allocation Node index and name	Yearly average					Success ts.		Success yrs		Successive failure years	Maximum shortage (% of demand)	Due to plant cap.	
	Demand (Mcm)	Shortage (Mcm)	Demand (m3/s)	Shortage (m3/s)	Shr. (%)	numbr (#)	rate (%)	numbr (#)	rate (%)			Shortage (Mcm)	Shortage (m3/s)
17 Consumo1	2.288	2.288	0.072	0.072	100.0	0	0.0	0	0.0	0	100.0	0.000	0.000
18 Consumo2	2.277	0.193	0.072	0.006	8.5	11	91.7	0	0.0	0	100.0	0.000	0.000
19 Consumo3	2.277	0.000	0.072	0.000	0.0	12	100.0	1	100.0	0	0.0	0.000	0.000
20 Consumo4	2.277	2.277	0.072	0.072	100.0	0	0.0	0	0.0	0	100.0	0.000	0.000
21 Consumo5	2.277	0.000	0.072	0.000	0.0	12	100.0	1	100.0	0	0.0	0.000	0.000
33 Ibaque	2.277	2.277	0.072	0.072	100.0	0	0.0	0	0.0	0	100.0	0.000	0.000
Total	13.672	7.034	0.432	0.222								0.000	0.000

*Ilustración 48 Tabla resumen demanda de agua potable en RIBASIM
Fuente: Propia*

Water allocation Node index and name	Yearly average				Success time steps		Success years		Number of successive failure years
	Demand (Mcm)	Shortage (Mcm)	Demand (m3/s)	Shortage (m3/s)	number (-)	rate (%)	number (-)	rate (%)	
12 Irr1	31.968	8.173	1.011	0.258	10	83.3	0	0.0	0
13 Irr2	1504.707	1504.707	47.584	47.584	4	33.3	0	0.0	0
14 Irr3	801.489	801.489	25.346	25.346	5	41.7	0	0.0	0
15 Irr4	7518.776	7518.776	237.767	237.767	5	41.7	0	0.0	0
16 Irr5	54498.109	53948.656	1723.402	1706.027	1	8.3	0	0.0	0
Total	64355.047	63781.801	2035.110	2016.982					

*Ilustración 49 Tabla resumen demanda para irrigación en RIBASIM
Fuente: Propia*

Como se ha explicado antes, los resultados de RIBASIM muestran que el máximo porcentaje de cubrimiento de la demanda para irrigación es de 83.3% para el sector de irrigación 1 y el mínimo es de 8.3% de cobertura para el sector de irrigación número 5. Así mismo, el porcentaje de cobertura de la demanda de agua potable es de 100% en los sectores de demanda de agua potable 3 y 5, del 91.7% en el sector de demanda 2. En los otros sectores de demanda de agua potable no tienen cobertura.

Igualmente, como se observa en la Ilustración 49, el sector de demanda más crítico para el abastecimiento es el sector de irrigación 5, pues el porcentaje de cobertura máximo fue de 10%, sin tener en cuenta el mes de septiembre en el cual no hay demanda hídrica y por lo mismo el porcentaje de cubrimiento es del 100% para este mes.

7.3 Resultado modelo en HIWEB

A continuación se presentan una imagen con la ubicación de los nodos de demanda así como, la ubicación de los hidrogramas de salida.

Como se puede observar en la imagen, los círculos de color rojo representan los nodos de demandas para irrigación. Los puntos de color azul oscuro, representan los nodos de demanda doméstica. Los puntos de color azul celeste, representan la ubicación de los

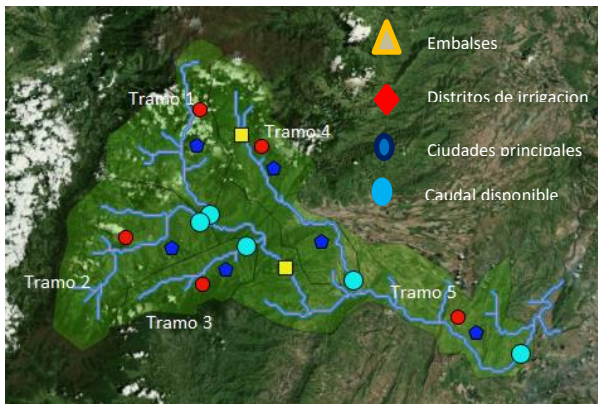


Ilustración 50 Ubicación de resultados cuenca ríos Coello, HiWEB
Fuente: Propia

resultados de caudales disponibles. Y finalmente, los cuadrados amarillos representan la ubicación de los embalses.

En las ilustraciones 52 a las 56, se presentan los hidrogramas de caudales disponibles en la cuenca y las demandas totales, satisfechas y no satisfechas en el sistema.

Como se observa en los resultados de HiWEB, los tres primeros meses son los más desfavorables para el

abastecimiento de los sectores de irrigación y agua potable, teniendo porcentajes de cobertura por debajo del 50%.

Adicionalmente, y en concordancia con los resultados de los otros modelos, el sector que requiere de mayor atención en términos de abastecimiento es el sector de irrigación 5, pues se tiene un porcentaje de cobertura menor al 10% en las épocas secas, como se observa en la Ilustración 56. Igualmente, el sector de agua potable más desfavorable es el sector 5, pues también presenta una cobertura en épocas secas por debajo del 10%, como se observa en la Tabla 10.

Adicionalmente, como se observa en la Ilustración 51, la demanda doméstica para el tramo 1 es suplida en su totalidad todos los meses del año y así mismo es suplida la demanda para irrigación como se ve en la Ilustración 54.

Igualmente, como se observa en la Ilustración 52, la demanda doméstica de los tramos 2 y 3 es suplida en su totalidad desde el mes de abril, mientras que en los tres primeros meses del año es suplida alrededor del 50% de la demanda como se observa en la Tabla 9. Así mismo, la demanda para irrigación en los tres primeros meses para los tramos 2 y 3 es suplida en alrededor un 40% y para el resto del año un 100% como se observa en la Tabla 10.

Para el tramo 4 y tramo 5, la demanda doméstica es suplida en promedio un 60% del año, como se observa en la Ilustración 53 Demandas domésticas tramos 4 y 5 Ilustración 53 y en la Tabla 9. Esto es debido a que sobre el tramo 4 se ubica una de las ciudades más importantes del sistema hídrico, Ibagué, y para el tramo 5 es porque al estar al final del sistema la cantidad de agua que llegue a este nodo como agua disponible, es la sobrante de los demás tramos y por lo tanto suficiente para suplir los requerimientos doméstico solo el 60% del tiempo. Así mismo, las demandas por irrigación de estos dos tramos como se observa en la Tabla 10, por ejemplo para el tramo 4 se tiene una totalidad de cubrimiento en los meses de abril, mayo, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Para el resto del año, en este tramo se tiene un suministro del 32% en promedio. Para el tramo 5 y sus requerimientos de irrigación se tiene que en promedio con la cantidad de agua que le llega a este tramo, se puede suplir únicamente alrededor del 20% con dos excepciones en el mes de mayo y en el mes de octubre en donde se logra suplir el 100% de los requerimientos en este tramo como se observa en la Tabla 10.

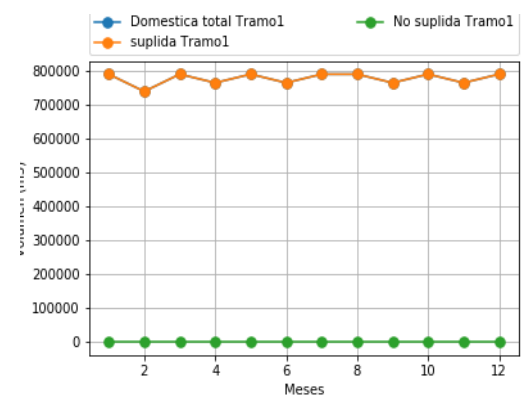
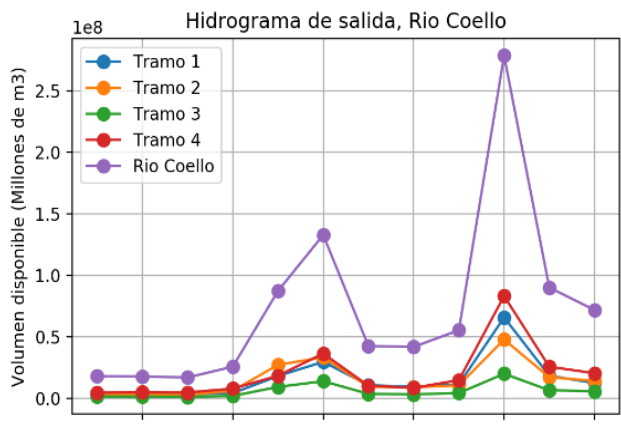


Ilustración 51 Hidrogramas de salida y demanda doméstica en el tramo 1 HiWEB
Fuente: Propia

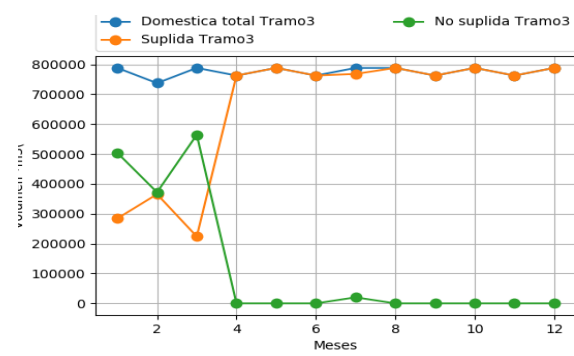
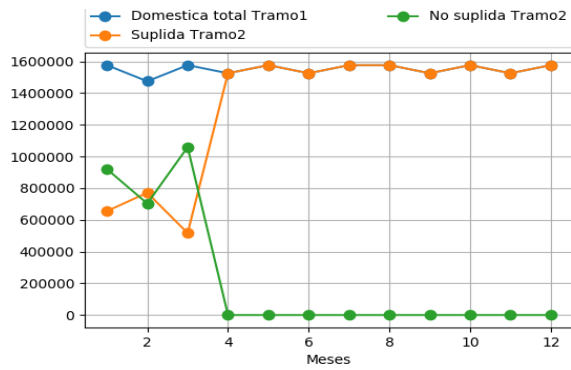


Ilustración 52 Demandas doméstica tramos 2 y 3

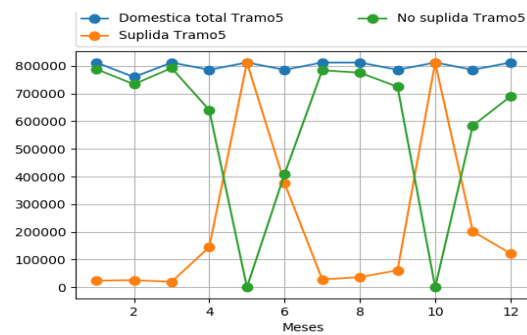
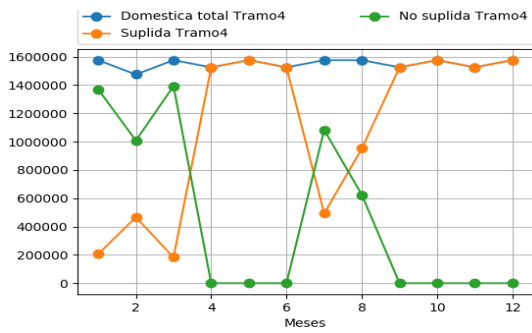


Ilustración 53 Demandas domésticas tramos 4 y 5

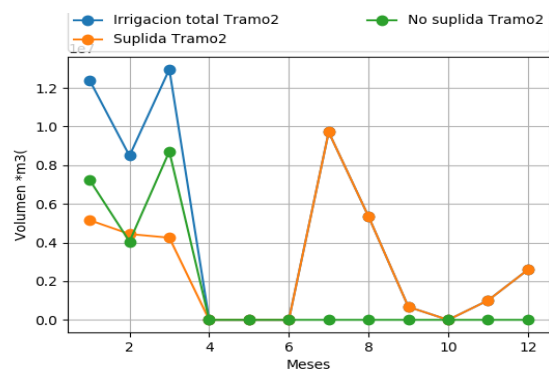
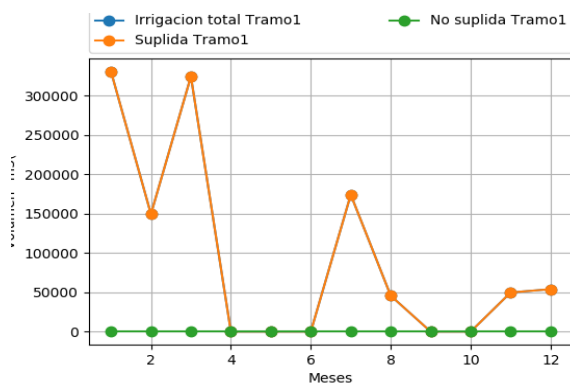


Ilustración 54 Demandas por irrigación tramos 1 y 2

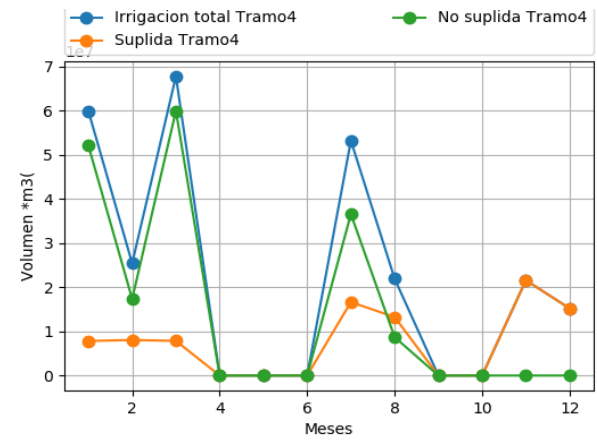
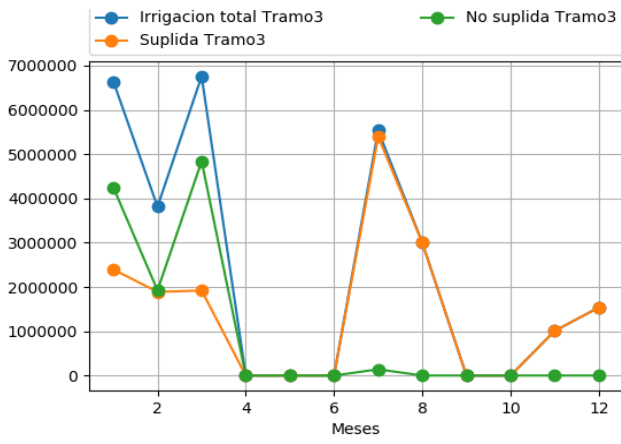


Ilustración 55 Demandas por irrigación tramos 3 y 4

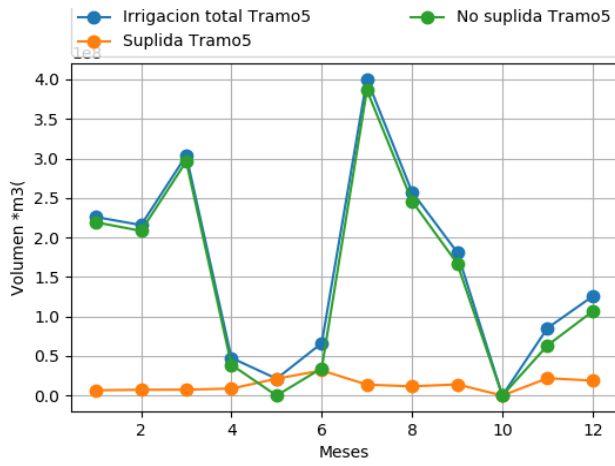


Ilustración 56 Demanda por irrigación en tramo 5 HiWEB

Fuente: Propia

Tabla 5 Resultados demanda no suplida Irrigación en m³, HiWEB
Fuente: Propia

Nodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Irr1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Irr2	7,238,551	4,048,617	8,712,561	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Irr3	4,245,825	1,922,939	4,838,620	-	-	-	140,441	-	-	-	-	-
Irr4	52,067,537	17,381,220	59,954,044	-	-	-	36,574,726	8,689,746	-	-	-	-
Irr5	219,196,324	208,369,391	296,263,908	38,877,057	-	34,548,254	386,507,374	245,938,881	167,117,165	-	63,484,473	106,600,666

Tabla 6 Resultados caudales disponibles después de suplir demandas en m³, HiWEB
Fuente: Propia

Rio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Rio 1	4,052,060	3,829,590	3,572,500	4,256,780	18,192,400	29,710,200	10,757,200	9,362,250	11,410,700	65,734,000	18,415,100	12,466,800
Rio 2	3,487,280	3,126,990	2,860,530	6,154,850	27,251,500	33,319,000	9,490,020	8,988,560	10,629,500	47,768,100	17,260,400	14,166,400
Rio 3	1,607,040	1,353,020	1,285,630	2,027,660	9,326,930	13,950,900	3,696,190	3,305,810	4,360,460	19,993,100	6,647,330	5,797,540
Rio 4	4,821,120	5,111,420	4,821,120	7,943,330	18,386,000	36,455,300	10,285,100	8,517,310	14,849,900	83,108,400	25,736,300	20,433,800
Rio 5	17,985,100	17,840,900	17,007,400	25,763,600	87,270,600	132,735,000	42,536,800	41,822,400	55,405,700	278,334,000	90,033,300	71,809,900

Tabla 7 Tabla resultados demanda no suplida Agua potable en m³
Fuente: Propia

Nodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Dom1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dom2	920,696	703,397	1,059,595	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dom3	504,045	371,935	564,431	-	-	-	20,010	-	-	-	-	-
Dom4	1,370,470	1,007,903	1,393,963	-	-	-	1,083,389	624,608	-	-	-	-
Dom5	788,167	733,906	792,298	640,582	-	409,319	784,122	775,453	724,634	-	584,139	689,734

Tabla 8 Porcentaje de cubrimiento demanda agua potable, HiWEB
Fuente: Propia

Nodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Dom1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Dom2	42%	52%	33%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Dom3	36%	50%	28%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	100%
Dom4	13%	32%	12%	100%	100%	100%	31%	60%	100%	100%	100%	100%
Dom5	3%	3%	2%	18%	100%	48%	3%	5%	8%	100%	26%	15%

Tabla 9 Porcentaje de cobertura demanda de irrigación, HiWEB
Fuente: Propia

Nodo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Irr1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Irr2	42%	52%	33%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Irr3	36%	50%	28%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	100%
Irr4	13%	32%	12%	100%	100%	100%	31%	60%	100%	100%	100%	100%
Irr5	3%	3%	2%	18%	100%	48%	3%	5%	8%	100%	26%	15%

7.4 Comparación resultados.

Primero que todo, es necesario tener en cuenta que las hipótesis de la distribución del agua entre usuarios de la cuenca, en cada uno de los modelos, son diferentes como se explica en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de este documento.

En la Tabla 11 se presentan los máximos y los mínimos caudales disponibles en cada río después de hacer el abastecimiento.

Tabla 10 Caudales disponibles según cada modelo en millones de metros cúbicos

Río	WEAP		RIBASIM		HiWEB	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Río 1	32.8	11.93	46.6	2.3	65.7	3.5
Río 2	27.42	8.66	19.4	1.8	47.7	2.8
Río 3	13.64	4.08	80.3	7.02	19.9	1.2
Río 4	45.86	14.97	62.2	7.5	83.1	4.8
Río 5	50.34	17.79	272	12.9	278	17

Como se observa, en WEAP los valores de los caudales disponibles por tramo son mayores, debido a que en esta herramienta, las demandas se abastecen abastecer equitativamente. Si no se tiene suficiente agua, el software hace el balance con toda el agua disponible en sistema. Esto no ocurre en RIBASIM ni en HiWEB, donde el agua asignada por tramo se mantiene, y gracias a esto se presentan las notables diferencias entre los caudales mínimos y los caudales máximos disponibles en cada río.

En la Tabla 2 y la Tabla 7, se puede observar que los meses de caudales máximos y mínimos disponibles coinciden en las tres herramientas, siendo el mes de febrero el más desfavorable y el mes de octubre el más favorable para el abastecimiento de las demandas en la cuenca.

Así mismo, en la Tabla 5, se puede observar el porcentaje de cubrimiento para WEAP es igual para todos los sectores de demanda en cada mes, pues como se explicó anteriormente al momento de no tener suficiente agua, WEAP acumula toda el agua disponible y hace el balance. Este resultado es muy diferente en RIBASIM y en HiWEB, pues ninguna de estas dos hace el proceso descrito.

En RIBASIM el porcentaje de cubrimiento más alto, para el sector de irrigación, es de 83.3% y el más bajo es de 8.3. Así mismo, para el sector de agua potable solo tres sectores tienen cubrimiento del 100% y los otros dos sectores no disponen de cubrimiento. Esto es debido a que en RIBASIM el agua asignada en cada subcuenca se queda en esa subcuenca y adicionalmente no hace ninguna asignación equitativa del recurso. Este software recorre el sistema de aguas arriba hacia agua abajo del río, asignando agua en el tiempo y las condiciones solicitadas, sin tener en cuenta dejar un caudal ambiental o realizar una asignación equitativa.

En HiWEB, el porcentaje de cubrimiento si bien es igual nodo a nodo, varía entre los meses, pues este software trata de hacer una asignación del agua de forma equitativa sin hacer transvases de agua entre las cuencas, lo que significa que el agua asignada en cada subcuenca se queda en ella y no es acumulada como un recurso total en el sistema.

Dicho esto, y sabiendo que cada software tiene resultados diferentes en términos de caudales disponibles y porcentajes de cobertura de la demanda, los tres concuerdan en que en la cuenca del río Coello, sobre todo en épocas secas, la cantidad de agua disponible no es suficiente para abastecer las demandas hídricas del sistema, por lo que es recomendable establecer los planes de desarrollo y ordenamiento de esta cuenca a partir de este concepto.

7.5 Ventajas y desventajas de cada software

	Ventajas	Desventajas
<i>WEAP</i>	<ul style="list-style-type: none"> i. Lectura de datos .csv ii. La definición de las relaciones entre usuarios en un sistema hídrico es sencilla de realizar. iii. Tiene el modelo hidrológico integrado iv. Permite la manipulación de archivos tipo shape v. La licencia es gratis para países en desarrollo e investigaciones vi. El uso y aplicación está controlado 	<ul style="list-style-type: none"> I. El modelo hidrológico está integrado y es agregado. II. En la hipótesis de solución del balance hídrico, cuando no tiene suficiente agua, acumula toda el agua en un único tramo, y desde allí hace el balance. III. Requiere la compra de una licencia comercial.
<i>RIBASIM</i>	<ul style="list-style-type: none"> i. La definición de la relación entre usuarios del sistema hídrico es sencilla de realizar ii. Diferencia los diferentes tipos de conexión que pueden existir en el sistema iii. Tiene el modelo hidrológico integrado iv. La licencia es gratis para el desarrollo de investigaciones v. El uso y aplicación está controlado. 	<ul style="list-style-type: none"> i. Lee archivos de texto, los cuales se podrían desarrollar en Excel o en algún editor de texto. ii. El modelo hidrológico está integrado y es semi-agregado. iii. No tiene la funcionalidad para lectura de archivos georreferenciados. iv. Requiere una licencia comercial para uso empresarial. v. Las utilidades desarrolladas por Delatares en Python deben ser pedidas individualmente. vi. Varias funcionalidades extras están desarrolladas en la versión completa del programa, por lo

	<ul style="list-style-type: none"> vi. Se planea integrar el modelo hidrológico de Sacramento vii. Al no tener lectura de archivos georreferenciados, tiene la funcionalidad siempre activa pues no depende de otros tipos de archivos. viii. Delatares ha realizado varios utilidades en Python. 	<p>que se debe pagar la licencia para obtenerlas. (visualización en mapas, módulos de análisis desarrollados en Python para los proyectos)</p>
<p><i>HiWEB</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> i. Lectura de datos .csv ii. Puede asociarse a diferentes tipos modelos hidrológicos, dependiendo de las características del caso de estudio. iii. La interfaz es online iv. Todo el código está desarrollado en plataformas de software libre v. No requiere licencia comercial vi. Se le puede agregar y actualizar funciones de caculo, y modelos externos como el hidrológico. vii. Está programado de forma modular. 	<ul style="list-style-type: none"> i. No tiene definición de relaciones entre usuarios. ii. No tiene modelo hidrológico integrado iii. No tiene aún la funcionalidad de leer y trabajar archivos georreferenciados. iv. Al no tener licencia, el desarrollo de aplicaciones y obtención del código es masivo y sin control, por lo que se puede llegar a utilizar en situaciones que el programa no podría manejar.

Capítulo 8

Conclusiones y Recomendaciones.

8.1 Cumplimiento de objetivos

- I. *Realizar un análisis comparativo de las herramientas disponibles en el mercado para realizar modelos de asignación de agua en una cuenca.*

Se estudiaron WEAP, Ribasim y Modsim-DSS y se realizaron modelaciones en del río Coello en las dos primeras herramientas.

Se compararon los resultados obtenidos por dichas herramientas y los de HiWEb. Cada herramienta tiene hipótesis válidas y una forma diferente de resolver el problema de la asignación de agua, por lo que los resultados de cobertura de la demanda y de los caudales disponibles en sistema hídrico varían. Las tres coinciden en el caso de estudio, la cuenca del río Coello, en insuficiencia de la cantidad de agua disponible para suplir las demandas hídricas que se han incrementado debido al desarrollo y crecimiento económico de la región.

- II. *Desarrollar un sistema de modelación en una plataforma de software libre que represente de forma simple las posibles demandas hídricas en una cuenca y sus interacciones físicas.*

Como se mostró en la sección 5.2, en este trabajo se desarrolló una herramienta de acceso libre, que trata de solucionar el problema de la asignación de agua en una cuenca de la mejor manera. Así mismo, gracias a que se desarrolló de forma modular la actualización de los procesos de cálculo es muy sencilla y permite la inclusión de otras rutinas de cálculo fácilmente.

HiWEB está disponible en el siguiente repositorio en internet, <https://github.com/XimenaLemaitreR/HiWEB> y adicionalmente estará colgado en el dominio del laboratorio de hidroinformática de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

- III. *Desarrollar un sistema de almacenamiento de datos que permita acceder a ellos desde un ambiente en línea.*

Como se mostró en la sección 5.2.2, HiWEB cuenta con una base de datos desarrollada en MySQL, a la cual se puede acceder desde cualquier computadora con conexión a internet.

Igualmente, todo el desarrollo, creación y orden de la base de datos se explicó en la sección anteriormente mencionada.

- IV. *Desarrollar una interfaz en línea para que los usuarios del agua tengan acceso al sistema de almacenamiento y a la herramienta de modelación de forma sencilla y sin restricciones de uso.*

Como se explicó en la sección 5.2.1, HiWEB cuenta con una interfaz en línea que les permite a los usuarios dialogar con la base de datos y con el modelo en Python desde la web. Dicha interfaz cuenta con cinco módulos, entre los cuales se puede encontrar el módulo de ingreso de datos a la base de datos, el de resultados y el de soporte técnico.

- V. *Hacer un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de las herramientas actuales del mercado y la propuesta en este trabajo.*

Como se desarrolló en la sección 7.5, las ventajas y desventajas de cada software depende del sistema hídrico que se desee analizar, pues hay que tener muy claro las hipótesis de cada herramienta y de acuerdo a esto analizar y evaluar los resultados que se obtengan en disponibilidad de caudal y abastecimiento de la demanda propia del sistema.

8.2 Innovación

HiWEB es la primera herramienta en línea para la evaluación y análisis de la asignación de agua en una cuenca. Adicionalmente es la primera en estar desarrollada totalmente en plataformas de software libre y que permite que la comunidad internacional involucrarse en el desarrollo de esta herramienta o modificarla de acuerdo a las necesidades de cada región.

Dicho esto, es claro que con HiWEB no es necesario hacer suposiciones de similitud en regiones hídricas alrededor del mundo, pues es muy sencillo actualizar o modificar características del sistema para que este se ajuste a las nuevas características hidrológicas de la cuenca que se esté analizando.

Adicionalmente, se desarrolló uno de los primeros modelos en línea para la asignación de agua que tiene en cuenta a la capital del departamento del Tolima, Ibagué.

8.3 Valor practico

HiWEB se presenta como una herramienta innovadora, en línea, con resultados sencillos. Fue diseñada para soportar la planeación y la gestión de una cuenca. Los resultados podrán ser utilizados dentro de los planes de ordenamiento de cuencas, e inicialmente en las reuniones de los consejeros de cuenca.

Adicionalmente HiWEB, siendo la primera en su clase en estar totalmente en línea y en plataformas de acceso libre, permite que cualquier persona analizar el estado actual de abastecimiento del sistema hídrico en donde vive y estar informado sobre los meses críticos de abastecimiento y así tomar acciones preventivas.

HiWEB posee un valor practico muy grande, pues puede ser implementado en cualquier país, región, ciudad y cualquier persona al tener el acceso desde la WEB. Al estar ya disponible empieza a ser una ayuda formidable para técnicos y gobernantes que antes no existía en el país.

Adicionalmente, es importante recalcar que este trabajo está enmarcado dentro de las necesidades de la institución The Nature Conservancy. Esta institución ha desarrollado una plataforma para apoyar la toma de decisiones en la macro cuenca del Magdalena, llamada SIMA, la misma está basada en software con licencia para desarrollar la modelación de asignación de agua. Con el desarrollo de HiWEB se pretende darles alternativas para dicha modelación y futuro desarrollo tanto de SIMA como de HiWEB.

También es importante recalcar que HiWEB no es, actualmente, una herramienta lo suficientemente robusta como para tomar decisiones de gestión hídrica basada únicamente

en ella, necesita del apoyo de otras herramientas que provean información adicional que complemente la de HiWEB.

8.4 Recomendaciones y trabajo por hacer

Es claro que HiWEB es una herramienta en desarrollo y se esperan mejoras en el futuro. Es más nuevos aspectos serán implementados en el futuro cercano. A continuación se enumeran algunos de ellos

- Generación de un código para leer la interacción entre los usuarios en el sistema.
- Consideración de un modelo de la operación de los embalses más preciso.
- Implementación de la representación de la demanda para irrigación.
- Incorporación de varios modelos hidrológicos tanto agregados como distribuidos.
- Ajuste de la ecuación de demanda de agua para tener en cuenta la demanda industrial y los requerimientos de flujos ambientales.
- Implementación de un modelo de inundaciones para identificar áreas en riesgo.
- Modificación del código para alojar a la herramienta en un servidor público de manera que los usuarios puedan acceder remotamente.
- Acoplar los modelos hidrológicos realizados por los estudiantes Nicolás López y Mostafa Farag, ambos desarrollados en la cuenca del Coello.

Capítulo 9

Referencias.

- Abbas, S., & Xuan, Y. (2017). A Review on Computer Modelling Support for Integrated Water Resources Management. *Jornl of Water and Climate*, 31.
- Adler, M. (2013). Detailed Proposal to Adopt Decision Support Systems (DSS) for Integrated Water Management in Romania, (97).
- Agencia, O. M. S., Agencias, P., Agencias, U., Agencias, F. A. O., Agencias, O., Regionales, C., & Mundial, B. (2010). La situación La crisis mundial del agua. *Water*, 3(1), 36.
- Beek, P. E. Van. (2017). *River Basin Modelling* (1st ed.). The netherlands.
- Berhe, F. T., Melesse, A. M., Hailu, D., & Sileshi, Y. (2013). Catena MODSIM-based water allocation modeling of Awash River Basin , Ethiopia. *Catena*, 109, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.04.007>
- CORTOLIMA. (2017a). *Fase II- DIAGNOSTICO, Caracteristicas del area de estudio, Cuenca mayor del río Coello*. Ibague, Tolima Colombia.
- CORTOLIMA. (2017b). *Fase II, DIAGNOSTICO, climatologia cuenca mayor río Coello*. Ibague, Tolima Colombia.
- CORTOLIMA. (2017c). *Fase II, DIAGNOSTICO, Hidrologia superficial*. Ibague, Tolima Colombia.
- Craven, J., Angarita, H., Corzo Perez, G. A., & Vasquez, D. (2017). Development and testing of a river basin management simulation game for integrated management of the Magdalena-Cauca river basin. *Environmental Modelling & Software*, 90(January), 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.002>
- Deltares, & Institute for Water Education IHE. (2014). *Adaptation to Climate Change in Colombia : a tipping point analysis Final summary*, 1–20.
- Dominguez Calle, E., Gonzalo Rivera, H., Vanegas Sarmiento, R., & Moreno, P. (2008). *Relaciones Demanda-Oferta de Agua y el Indice de Escacez de Agua Como*

Herramienta de Evaluación del Recurso Hídrico Colombiano. *Revista Académica Científica Colombiana*, XXXII(June 2008), 19.

Figueroa, C., & Escobar, M. (2015). Modelación hidrológica del recurso hídrico en la subcuenca del Río Aipe en Colombia “Ríos del páramo al valle, por urbes y campiñas.” *Sei*, (Figura 1), 1–4.

Global Water Partnership. (2019). Global Water Partnership Blog.

Hess, T. J., Rees, L. P., & Rakes, T. R. (2000). Using Autonomous Software Agents to Create the Next Generation of Decision Support Systems *. *Decision Sciences*, 31(1), 31. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2000.tb00922.x>

IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2010. Estudio Nacional del Agua 2010*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>

IDEAM, INVEMAR, SINCHI, IIAP, & IAvH. (2016). *Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales 2015. Documento Síntesis*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023641/IEARN2015.pdf>

Johnson, W., Williams, Q., & Kirshen, P. (1995). WEAP: A Comprehensive and Integrated Model of Supply and Demand. *Georgia Water Resources Conference*, 291–293. Retrieved from <http://smartech.gatech.edu/handle/1853/44000>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, C. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. (M. D. A. V. Y. D. T. Colombia, Ed.) (1st ed.). Bogotá D.C: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.

Nalesso, M. (n.d.). Hydro-BID.

Omar, M. (2014). Evaluation of actions for better water supply and demand management in Fayoum , Egypt using RIBASIM. *Water Science*, 27(54), 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2013.12.008>

Pallottino, S., Sechi, G. M., & Zuddas, P. (2005). A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. *Environmental Modelling and Software*, 20(8),

1031–1042. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.09.012>

Rahaman, M. M., & Varis, O. (2005). Integrated water resources management: Evolution, prospects and future challenges. *Sustainability: Science, Practice & Policy*, 1(1), 15–21. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00099-5)

Rajasekaram, V., & Nandalal, K. D. (2005). Decision Support System for Reservoir Water Management Conflict Resolution. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(6), 410–419. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:6\(410\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:6(410))

Savenije, H. H. G., & Van der Zaag, P. (2008). Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.003>

Siahaan, M. H. (2016). Development of a Web-based Water Allocation Model: Case Study of Coello Basin, Colombia, (April).

Speed, R., Yuanyuan, L., Tom, L. Q., Pegram, G., & Zhiewi, Z. (2013). *Basin Water Allocation Planning*. Retrieved from <http://www.adb.org/publications/basin-water-allocation-planning>

Stockholm Environment Institute (SEI), U. S. C. (2015). Water Evaluation And Planning System. *Weap*, (August), 1–202.

The, H. R. H., & Rijsberman, F. R. (2000). Summary report of the 2nd World Water Forum : from vision to action, 2, 387–395.

**Anexo 1: Concesiones de agua activas en la cuenca del Coello, Magdalena,
Colombia.**

Anexo 2: Pasos y recomendaciones para instalar HiWEB

A continuación se presenta el tutorial de instalación y uso de HiWEB.

Paso 1. Descargar e instalar los programas necesarios para la ejecución de HiWEB.

- a. Primero necesita descargar e instalar Anaconda Navigator 2.7 en el siguiente enlace.
 - <https://www.anaconda.com/distribution/#download-section>
 - Debe tener cuidado en descargar e instalar la versión que su computador requiera, debe fijarse en el sistema operativo y su capacidad.
 - Debe fijarse también que tenga las siguientes librerías instaladas: Matplotlib, numpy, calendar, pandas y pymysql.cursors
- b. Segundo, necesita descargar e instalar XAMP, el cual es un controlador para las plataformas de SQL y apache.
 - <https://www.apachefriends.org/es/download.html>.
- c. Tercero, descargar el código madre de HiWEB.
 - <https://github.com/XimenaLemaitreR/HiWEB>
 - Al descargar el código madre encontrará dos carpetas y un archivo, una carpeta está titulada Python y la otra está titulada HTML. Así mismo, el archivo se llama HiWEB_DB.sql
 - La carpeta Python contiene todos los códigos de Python, los mismos deben ser abiertos desde el emulador Spider.
 - La carpeta html debe ser situada en la siguiente ruta:
C:\xampp\htdocs\HiWEB
 - Y el archivo es la base de datos que más adelante se explicará cómo se importa.

Paso 2: Importar la base de datos.

- Para esto desde el controlador XAMP se debe abrir la base de datos desde el administrador.
- Una vez se esté en la página principal de SQL (<http://localhost/phpmyadmin/>) se debe crear una nueva base de datos que se llame hiweb_db.

- Dentro de esta nueva base de dato se debe dirigir a la pestaña titulada importar. Allí debe Buscar y cargar el archivo llamado hiweb_db.sql, y aceptar el proceso que se va a desarrollar.
- Una vez terminado el proceso la base de datos debe estar llena y con las tablas de datos descritas en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Paso 3 Apertura del modelo en Python.

- Abra el anaconda navigator y ejecute el spyder en la versión 2.7
- Una vez abierto el spyder busque y cargué todos los archivos de la carpeta llamada Python.
- Ejecute el modulo llamado Water allocation.

Paso 4: Cargue de la interfaz en HTML.

- Diríjase a la siguiente ruta, y cree una carpeta llamada HiWEB: C:\xampp\htdocs
- El contenido de la carpeta titulada HTML, debe ser copiado y pegado dentro de la carpeta que se acaba de crear.
- Para acceder a la interfaz desarrollada en internet, debe abrir su explorador y poner el siguiente dominio: <http://localhost/HiWEB/>.
- Para hacer el cargue de los datos se debe seguir el proceso que se explicó en la sección 6.2.

Los demás pasos y desarrollo del modelo son explicados en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Anexo 3: Códigos de Python de HiWEB

Para obtener los códigos de HiWEB, debe dirigirse al repositorio en GitHub en el siguiente link: <https://github.com/XimenaLemaitreR/HiWEB>