



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

Implementación del modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System) a la cuenca del río Apulo para la determinación de la disponibilidad hídrica de la cuenca bajo escenarios de cambios en usos del suelo.

Anderson González González

Magda L Hernández Alonso

Tutor

Darwin Mena Rentería

Ingeniero Ambiental y Sanitario

Magister en Evaluación de Recursos Hídricos

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

ESPECIALIZACIÓN EN ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS

Bogotá, Colombia

2020

1. Resumen

El trabajo de grado consistió en la aplicación del modelo hidrológico WEAP (Water Evaluation and Planning) a la cuenca del río Apulo con el fin de evaluar el desempeño de la herramienta para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca y realizar la representación de diferentes escenarios de cambios de uso del suelo y su afectación en la disponibilidad hídrica de la cuenca. El modelo que se representó estima los caudales generados en cada Unidad de análisis Hidrológico (UH) como el resultado de restar a la precipitación efectiva (porcentaje de la precipitación total) lo consumido por la evapotranspiración (calculada como el coeficiente de cultivo por la evapotranspiración de referencia estimada por la ecuación de Hargreaves) y por las demandas de la cuenca. A partir de información de estaciones hidroclimatológicas de la zona, se realizó la calibración del modelo para estimar el coeficiente de cultivo y el porcentaje de precipitación efectiva para cada tipo de cobertura, obteniendo buenos desempeños del modelo en cuanto a los caudales que simula comparados con los medidos en la estación La Esperanza (PBIAS del 3% y NSE del 0.87).

Se representaron tres escenarios de cambios en las coberturas del suelo, disminuyendo cobertura de pastos y reemplazando en cada escenario por áreas agrícolas heterogéneas, áreas urbanas y bosques plantados, donde se evidenció disminución de los caudales generados por la cuenca, lo cual obedeció a las condiciones de la modelación matemática y pueden no representar la respuesta física e hidrológica de la cuenca.

Palabras Clave: Modelación hidrológica, Gestión del Recurso Hídrico, WEAP, Río Apulo.

2. Contenido

1.	Resumen	2
2.	Contenido	3
2.1	Lista de figuras	4
2.2	Lista de tablas	5
3.	Introducción	6
4.	Objetivos	8
4.1	Objetivo General	8
4.2	Objetivos Específicos	8
5.	Marco Teórico	9
5.1	La Modelación hidrológica para la gestión del recurso hídrico	9
5.1.1	Las herramientas de modelación hidrológica	9
5.1.2	Herramientas de modelación de gestión del recurso hídrico	10
5.2	El modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System)	11
5.2.1	Proceso de aplicación del modelo WEAP	11
5.2.2	Descripción conceptual del modelo	12
5.2.3	Elementos del modelo WEAP	13
5.2.4	Fuentes de información para el modelo WEAP	13
5.3	La cuenca del río Apulo	14
5.3.1	Localización general	16
5.3.2	Hidrografía de la cuenca del río Apulo	16
5.3.3	Caracterización hidroclimatológica	18
5.3.4	Cobertura del suelo	23
5.3.5	Demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Apulo	24
6.	Metodología	26
6.1	Fuentes de información	26
6.1.1	Características físicas e hidroclimatológicas de la cuenca	26
6.1.2	Demandas de recurso hídrico en la cuenca del río Apulo	26
6.2	Planteamiento de escenarios de cambios de uso del suelo	26
6.3	Modelación en WEAP de la cuenca del río Apulo	27
6.3.1	Representación topológica de la cuenca	27
6.3.2	Representación de las características físicas de cada Unidad Hidrológica	27
6.3.3	Representación de las condiciones climáticas	28

6.3.4	Representación de las demandas	28
6.3.5	Calibración del modelo	28
6.3.6	Simulación hidrológica bajo escenarios de cambio de usos del suelo	29
7.	Resultados	30
7.1	Caracterización física e hidroclimatológica de la cuenca del río Apulo	30
7.1.1	Área	30
7.1.2	Coeficiente de cultivo y Precipitación efectiva	30
7.1.3	Caracterización climática	31
7.1.4	Información para la calibración del modelo	33
7.2	Identificación de las demandas de recurso hídrico en la Cuenca del río Apulo	34
7.3	Representación de procesos hidrológicos en la cuenca del río Apulo.....	35
7.3.1	Topología del modelo.....	35
7.3.2	Selección del modelo hidrológico	35
7.3.3	Calibración	35
7.3.4	Validación	37
7.3.5	Simulación de escenarios	38
8.	Conclusiones y Recomendaciones	40
9.	Bibliografía	42

2.1 Lista de figuras

Figura 1	Localización general de la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia.....	16
Figura 2	Red hídrica de la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración Propia	17
Figura 3	Subcuencas del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá ..	18
Figura 4	Localización de las estaciones climatológicas en la cuenca del río Apulo	19
Figura 5	Régimen de Precipitaciones Cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá	20
Figura 6	Régimen de Temperaturas Cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá	21
Figura 7	Distribución del régimen de caudales para la estación La Esperanza - Río Apulo.....	22
Figura 8	Estaciones hidrológicas en la cuenca del río Bogotá	23
Figura 9	Cobertura del suelo cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá	24
Figura 10	Concesiones otorgadas por la CAR en la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá	25
Figura 11	Usos principales del agua en la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia	25
Figura 12	Serie de precipitación para la cuenca del río Curí	31
Figura 13	Serie de precipitación para la cuenca del río Apulo.....	32
Figura 14	Series de valores de Evapotranspiración de referencia para la subcuenca del río Curí	33
Figura 15	Series de valores de Evapotranspiración de referencia para la subcuenca del río Apulo .	33

Figura 16 Series de caudales para la estación La Esperanza.....	34
Figura 17 Representación topológica de la cuenca del río Apulo	35
Figura 18 Delimitación de la subcuenca a partir de la estación La Esperanza.....	36
Figura 19 Serie de caudales simulada en el modelo WEAP tras la calibración del modelo	37
Figura 20 Serie de caudales simulada en el modelo WEAP tras la validación del modelo	37
Figura 21 Alteración en la generación de caudales para el escenario 1	38
Figura 22 Alteración en la generación de caudales para el escenario 2	38
Figura 23 Alteración en la generación de caudales para el escenario 3	39
Figura 24 Comparativo de las alteraciones en caudales para los diferentes escenarios	39

2.2 Lista de tablas

Tabla 1 Elementos del modelo WEAP	14
Tabla 2 Resumen de datos para construir un modelo WEAP	15
Tabla 3 Caracterización subcuencas Río Apulo. Fuente: POMCA Río Bogotá, 2019	18
Tabla 4 Estaciones climatológicas de la cuenca del río Apulo	19
Tabla 5 Estaciones limnimétricas en la cuenca del río Apulo.....	22
Tabla 6 Fuentes, formatos y herramientas para la caracterización hidrológica.....	26
Tabla 7 Valores de Ra ($MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$) empleados para la estimación de la evapotranspiración de referencia.....	28
Tabla 8 Ecuaciones para evaluación del desempeño del modelo.....	29
Tabla 9 Estimación área Unidades Hidrológicas modelo WEAP Río Apulo	30
Tabla 10 Áreas por cobertura para cada subcuenca de modelación en WEAP.....	30
Tabla 11 Cantidad de registros mensuales por año de precipitación total en la cuenca del río Apulo	31
Tabla 12 Cantidad de registros mensuales por año de temperatura media en la cuenca del río Apulo	32
Tabla 13 Cantidad de registros mensuales por año de temperatura máxima en la cuenca del río Apulo	32
Tabla 14 Cantidad de registros mensuales por año de temperatura mínima en la cuenca del río Apulo	32
Tabla 15 Cantidad de registros mensuales por año de caudales medios en la cuenca del río Apulo	33
Tabla 16 Demandas estimadas de cada subcuenca en el río Apulo	34
Tabla 17 Área que representa cada cobertura en la subcuenca La Esperanza.....	36
Tabla 18 Resultados de la calibración del modelo.....	37

3. Introducción

La importancia del agua para los seres humanos ha hecho, que a nivel local e internacional se implementen mecanismos de gestión y administración del recurso hídrico, desde la perspectiva de su carácter finito, lo cual se ha venido abordando durante las últimas décadas. Al considerarse por ejemplo los objetivos marcados en el año 2000, en la Declaración de los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas, en que se fijó como meta “Reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de personas sin acceso sostenible a agua potable y a servicios básicos de saneamiento” (ONU, 2013), se pone en manifiesto la necesidad de responder a las demandas de agua potable y saneamiento, con un recurso que es de carácter limitado y vulnerable.

Dentro de este contexto, Colombia no ha sido ajena a las discusiones internacionales, pues cuenta con 4 de las 214 grandes cuencas del mundo (con área mayor a 100.000 km²), correspondientes a la del río Magdalena, el río Guaviare, el río Casanare y el río Meta. Igualmente cuenta con tres cuencas entre 50.000 y 100.000 km², en los ríos Cauca, Inírida y Putumayo y más de 700.000 microcuencas con áreas menores de 10 km². La red hídrica del país se complementa con la riqueza de aguas subterráneas y almacenamientos superficiales, que entre lagos, lagunas, embalses, ciénagas y pantanos alcanzan 17.000 cuerpos de agua (IDEAM, 2002). Esta riqueza hídrica representa para Colombia un bien que requiere de una caracterización profunda para su adecuado manejo.

Según el Estudio Nacional del Agua ENA (IDEAM, 2010), más del 80% de las cabeceras municipales se abastece de fuentes pequeñas (i.e. arroyos, quebradas, riachuelos, con bajas condiciones de regulación y alta vulnerabilidad) que no garantizan una disponibilidad adecuada, por lo cual es imprescindible conocer en profundidad el estado y la dinámica de estos sistemas para ordenar su uso y realizar un manejo sostenible del recurso. Según las proyecciones realizadas por el ENA sobre la situación de escasez y vulnerabilidad para el 2015 y el 2025, se muestra que “de no tomarse medidas importantes de conservación, ordenamiento y manejo de los recursos naturales, así como de disminución de la contaminación, Colombia tendría en algunas de sus regiones serias dificultades para el abastecimiento de agua a la población y para otras actividades”.

Es por esto, que se tiene la urgente necesidad de generar el conocimiento y la información para apoyar la toma de decisiones, la planificación, la gestión y el uso sostenible del recurso agua, lo que también es esencial para la evaluación de la calidad del agua y el ordenamiento de los recursos hidroecológicos (Sauquet, Gottschalk, & Krasovskaia, 2008).

Ha sido entonces el enfoque de las Corporaciones Autónomas como entidades encargadas de administrar, dentro del área de su jurisdicción el medio ambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio de Ambiente. En este sentido, las Corporaciones buscan contar con herramientas que le permitan gestionar los recursos hídricos con una visión general de Cuenca, de forma que pueda entender la respuesta del recurso natural ante diferentes condiciones de presión y propender así una gestión integral que permita el cumplimiento de su misión administrativa del recurso. Para evaluar el desempeño de una herramienta busca implementar un modelo en un caso piloto para definir así su aplicabilidad a la jurisdicción completa.

Mediante este trabajo de grado de la Especialización en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas se busca ilustrar el uso de la herramienta de modelación hidrológica WEAP (Water Evaluation and Planning System) como una herramienta que permite representar de forma particular el recurso hídrico a partir de su interfaz gráfica, con sus nodos de demandas y suministros, y los

vínculos entre ellos que permiten una visualización tanto gráfica como numérica del comportamiento hidrológico de la cuenca, al realizar balances hídrico distribuidos por cada subcuenca o unidades de análisis hidrológico que se definan para el modelo.

Para ello se seleccionó una cuenca ubicada en el Departamento de Cundinamarca correspondiente a la cuenca del río Apulo que se caracteriza por presentar una limitada disponibilidad del recurso hídrico dadas las condiciones climáticas (altas temperaturas) e hidrológicas (bajos caudales) de la zona. Adicionalmente, su cuerpo de agua principal presenta malas condiciones de calidad debido a las descargas de aguas residuales a lo largo de toda la cuenca (CAR - Planeación Ecológica Ltda. - Ecoforest Ltda., 2006). Esto, asociado al alto atractivo turístico que presentan los municipios de la región ha hecho que se presenten condiciones de desabastecimiento a las diferentes poblaciones lo cual resulta en un conflicto entre la disponibilidad del recurso y su demanda.

De esta forma, en el presente trabajo de grado, se presenta inicialmente un marco teórico donde se realiza una descripción de la modelación hidrológica destinada a la Gestión del Recurso Hídrico, y una descripción más detallada sobre el modelo WEAP. El capítulo siguiente consiste en la metodología implementada para realizar la representación de la cuenca del río Apulo en el modelo WEAP, para en el siguiente capítulo mostrar los resultados correspondientes de la modelación, detallando las diferentes fuentes de información empleadas para realizar el modelo topológico de la cuenca en WEAP. El capítulo final detalla las conclusiones y recomendaciones obtenidas de adelantar el presente trabajo.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Implementar el modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System) a la cuenca del río Apulo, para determinar la disponibilidad hídrica de la cuenca, bajo escenarios de cambios en usos del suelo.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar hidrológicamente la cuenca del río Apulo mediante la recopilación de información de diferentes entidades para conformar la línea base de la cuenca.
- Identificar las demandas principales del recurso hídrico en la cuenca del río Apulo para la determinación de la presión ejercida sobre el mismo.
- Establecer posibles escenarios de cambios de usos del suelo para la cuenca del río Apulo de acuerdo con las políticas establecidas en la zona.
- Representar los procesos hidrológicos de la cuenca del río Apulo mediante la implementación del modelo WEAP bajo las condiciones de línea base como de escenarios de cambios de uso del suelo.

5. Marco Teórico

A continuación, se describe teóricamente la modelación hidrológica en la gestión del recurso hídrico, el modelo implementado en el presente trabajo y las principales características de la cuenca hidrográfica del río Apulo.

5.1 La Modelación hidrológica para la gestión del recurso hídrico

Cuando se busca entender la disponibilidad hídrica de una región para poder administrar estos recursos de manera adecuada entre los diferentes actores que demandan el recurso requiere de modelos que representen la interacción de diferentes procesos físicos y químicos que operan a diferentes escalas tanto espaciales como temporales.

Estas interacciones son representadas por el balance de agua en el ambiente, el cual es afectado por condiciones climáticas, por cambios en el uso del suelo, que influyen en la infiltración y la percolación, procesos que determinan los caudales máximos de una fuente de agua, la retención de la humedad del suelo y la regulación hídrica (Bruinjeel, 2004)

Los modelos que permiten la predicción de flujos de agua en una cuenca hidrográfica deben ser evaluados para diferentes condiciones ambientales (climáticas, topográficas, suelos, cobertura vegetal) y buscarán capturar los mecanismos físicos de generación de escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos subterráneos a partir de la interacción de las diferentes condiciones ambientales.

Según Ocampo y Vélez (2013) la selección objetiva del modelo es un paso crucial en la modelación para predecir con exactitud caudales y otras variables y entender las respuestas de las cuencas hidrográficas. Para un análisis de caso en particular, el propósito del estudio, el modelo y la disponibilidad de datos son los factores que determinan la selección.

5.1.1 Las herramientas de modelación hidrológica

Cuando se usa la palabra “herramienta” en el contexto de la detección y evaluación del riesgo climático, se refiere a un dispositivo tangible como un programa de computador o un documento de cualquier tipo (como un manual o una lista de verificación). La herramienta con fines hidrológicos se entenderá como cualquier documento, programa de computador o sitio web que usa un conjunto de principios y técnicas que permiten apoyar la evaluación, estimación y/o construcción de parámetros que buscan entender la ocurrencia, movimiento y escurrimiento del agua en una cuenca hidrográfica.

Existe un amplio número de herramientas que se ajustan a la definición empleada para fines de este trabajo, las cuales se pueden clasificar como:

- Herramientas que suministran datos e información: Constituida por todos aquellos documentos y sitios web que suministran datos e información que permiten la construcción de los productos exigidos por el POMCA para el componente agua.
- Herramientas de procesamiento de datos: Herramientas que permiten procesar y analizar los datos típicamente empleados en aplicaciones hidrológicas.
- Herramientas de caracterización climática: Herramientas que permiten realizar la caracterización de las diferentes variables climatológicas exigidas en la Guía Técnica para la formulación de POMCA.

- Herramientas de estimación de índices: Conjunto de herramientas que permiten estimar índices típicamente empleados para caracterizar el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica.
- Herramientas de modelos de balance hídrico: Herramientas que permiten realizar balances hídricos en cuencas con diferentes niveles de agregación y cantidad de información.
- Herramientas de modelación matemática: Herramientas que permiten la implementación de modelos matemáticos para la simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca.
- Herramientas de calibración – validación de modelos: Herramientas empleadas para realizar la calibración y validación de modelos dentro del marco de modelación matemática en hidrología.
- Herramientas de hidrografía: Conjunto de herramientas que permiten realizar caracterizaciones de la red hidrográfica de una cuenca.
- Herramientas de gestión del recurso hídrico: Herramientas que incluyen componentes de oferta, demanda y gestión del recurso hídrico, para la evaluación de escenarios y respuestas hidrológicas.

5.1.2 Herramientas de modelación de gestión del recurso hídrico

Las herramientas de gestión del recurso hídrico son las ideales para poder establecer la relación entre la oferta, demanda y gestión del recurso. Entre las herramientas que permiten integrar la gestión del recurso hídrico se encuentran:

- Basin: Basins facilita la examinación de la información ambiental, brinda soporte de análisis del sistema medioambiental, provee una estructura para el manejo de las alternativas. BASINS fue también creado para brindar soporte al desarrollo de TMDLs (Total Maximum Daily Loads: Cargas Totales Máximas Diarias).
- Cropwat: Permite a los usuarios calcular las necesidades de agua de los cultivos y las necesidades de riego en base a datos del suelo, el clima y las cosechas.
- Hec-ResSim: Este software simula operaciones de los embalses para la gestión de inundaciones y el suministro de agua para los estudios de planificación y el apoyo de decisiones en tiempo real.
- WaterWorld: WaterWorld es un banco de pruebas para el desarrollo e implementación de políticas relacionadas con el manejo del agua y la tierra en regiones a nivel mundial.
- WRAM: El propósito de WRAM es determinar la asignación óptima del agua y la reasignación en términos de decisiones de siembra de los cultivos y las necesidades de agua de riego.
- WEAP: La herramienta WEAP, se basa en el principio elemental de balance hídrico de una cuenca: las entradas totales de agua deben ser iguales a las salidas y al cambio en el almacenamiento neto disponible (en embalses, acuíferos o el suelo). WEAP representa de forma particular el recurso hídrico a partir de la interfaz gráfica, con sus nodos de demandas y suministros, y los vínculos entre ellos que permiten una visualización tanto gráfica como numérica del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Como se describió anteriormente, la selección de una herramienta y en particular de un tipo de modelo hidrológico deberá basarse en entender el propósito de la modelación y la disponibilidad de la información que requiere el modelo para su uso. A continuación se detalla el uso de la herramienta WEAP como herramienta de gestión del recurso hídrico.

5.2 El modelo WEAP (Water Evaluation and Planning System)

La herramienta WEAP, se basa en el principio elemental de balance hídrico de una cuenca: las entradas totales de agua deben ser iguales a las salidas y al cambio en el almacenamiento neto disponible (en embalses, acuíferos o el suelo). Como expresan Yates et al., (2005), WEAP representa de forma particular el recurso hídrico a partir de la interfaz gráfica, con sus nodos de demandas y suministros, y los vínculos entre ellos que permiten una visualización tanto gráfica como numérica del comportamiento hidrológico de la cuenca.

WEAP es usado por un gran número de usuarios, desde aquellos encargados de la planificación hidrológica, hidrólogos, agrónomos, economistas, hasta funcionarios públicos encargados del recurso hídrico, y comunidades locales. Usando la esquemática de WEAP, entidades públicas de planeación de agua y comunidades locales pueden colaborar en la descripción física de la zona de interés. Una vez el sistema está construido, se pueden implementar las demandas y suministros de agua y observar el balance del recurso en la región (CCG - SEI, 2009)

WEAP se consolida además como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico. Emplea la caracterización de una línea base, creada a partir de los suministros, demandas, y el estado de contaminación que se identifique como condiciones actuales de la cuenca, y los emplea para la evaluación de escenarios de alteración climática, demográfica o de cambio en las políticas de uso, de forma que se identifiquen las respuestas hidrológicas ante estos escenarios.

Las principales características que representa WEAP se resumen en el siguiente listado (Tomado del sitio oficial del software www.weap21.org):

- Conformar un sistema integrado de planeación del recurso hídrico.
- Incorpora modelos para: precipitación, escorrentía e infiltración, evapotranspiración, requerimientos de cultivo y rendimientos, interacción agua superficial / agua subterránea y calidad del agua dentro de la corriente.
- Interfaz gráfica “arrastrar y soltar” basada en SIG.
- Capacidad para construir modelos con un número de funciones predefinidas.
- Ecuaciones y variables definidas por el usuario.
- Enlaces dinámicos a hojas de cálculo y otros modelos.
- Un programa lineal embebido resuelve ecuaciones de asignación
- Estructuras de datos flexibles y expandible.
- Sistema de reporte de gran alcance que incluye gráficos, tablas y mapas.
- Ayuda Contextualizada y Guía del Usuario.
- Requerimientos computacionales mínimos: Usar con Windows XP, Vista, 7, 8 u 10 con 256 MB de RAM.

5.2.1 Proceso de aplicación del modelo WEAP

De acuerdo con la Guía Metodológica para el uso del modelo WEAP (CCG - SEI, 2009), el desarrollo del modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

1. Definición del estudio: En esta etapa se establece el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.
2. Búsqueda de información: En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales y una etapa de recolección de datos

específicos una vez se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.

3. Desarrollo del modelo: En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se realizan corridas iniciales de modelos para observar su comportamiento preliminar y para eliminar posibles inconsistencias y errores.
4. Calibración: Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
5. Uso del modelo, generación de escenarios: Una vez el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación.

5.2.2 Descripción conceptual del modelo

El modelo WEAP cuenta con diferentes modelos conceptuales para representar la interacción de la oferta y la demanda del agua dentro de una cuenca hidrográfica, las cuales se agrupan en las siguientes características:

5.2.2.1 Demandas

Las demandas en WEAP pueden representar diferentes sectores que hagan presión sobre el recurso hídrico, los cuales pueden representarse de dos opciones:

- Demanda mensual: opción que permite incluir valores de demanda del recurso mes a mesa.
- Demanda anual con variación mensual: permite expresar las demandas a un nivel anual cuya variación mensual puede obedecer a una expresión matemática o a porcentajes dados por el usuario.

5.2.2.2 Hidrología de la cuenca

Existen cinco opciones en WEAP para representar procesos hidrológicos de la cuenca como la evapotranspiración, la escorrentía, la infiltración y las demandas de irrigación: los métodos son:

5.2.2.2.1 Método de coeficiente simplificado para demandas por irrigación

Es el modelo más sencillo de WEAP, el cual usa el coeficiente de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca, y luego determina la demanda para irrigación como una porción de la evapotranspiración que la lluvia no puede suplir. El método no simula la escorrentía ni procesos de irrigación, ni cambios en la humedad del suelo.

5.2.2.2.2 Modelo de coeficiente simplificado para representar el proceso lluvia – escorrentía

El método también determina la evapotranspiración usando el coeficiente de cultivo. El remanente de la lluvia que no es consumida por la evapotranspiración se representa como escorrentía en la cuenca, o una proporción de ésta puede considerarse como aporte a aguas subterráneas.

5.2.2.2.3 Modelo de humedad del suelo para representar el proceso lluvia – escorrentía

El método es un modelo de dos tanques para representar la hidrología de la cuenca. El tanque superior tiene un balance entre la evapotranspiración, la escorrentía, el flujo al tanque inferior y los cambios en la humedad del suelo. El flujo base, y los cambios en la humedad del suelo se representan en el tanque inferior. Es un modelo que requiere de una parametrización mayor de la cuenca.

5.2.2.2.4 Método MABIA (FAO 56, Kc dual, Diario)

El método MABIA es una representación diaria de la transpiración, evaporación, requerimientos de irrigación, crecimiento del cultivo e incluye módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Se deriva del software MABIA desarrollado por el Instituto Nacional de Agronomía de Túnez, del Dr. Alu Sahli y Mohamed Jabloun.

5.2.2.2.5 Modelo de crecimiento de plantas

El modelo representa el crecimiento de plantas, el uso del agua y la capacidad de almacenamiento a una escala temporal diaria. Se desarrolló para estudiar los impactos de alteraciones en las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, cambios de temperatura, variabilidad por estaciones, y las demandas de agua.

5.2.2.3 Demanda para generación hidroeléctrica.

Para representar situaciones en las que un reservorio se quiere priorizar para generación de energía eléctrica, hay dos métodos en WEAP para representar las demandas de generación hidroeléctrica: como demandas individuales para un reservorio o como un agregado de las demandas de energía al nivel del sistema.

5.2.2.4 Calidad del agua

La sección de calidad de agua permite representar aportes contaminantes y su tratamiento sobre un cuerpo de agua superficial. La modelación de calidad de agua en el cuerpo de agua puede hacerse desde WEAP o vincularse a QUAL2K.

5.2.2.5 Análisis financiero

El módulo de planeación financiera en WEAP permite calcular costos y beneficios asociados a escenarios. En WEAP pueden representarse costos fijos o variables y beneficios fijos o variables asociados a cada elemento de WEAP, los cuales pueden dividirse en costos operativos y operacionales.

5.2.3 Elementos del modelo WEAP

La representación de los procesos hidrológicos está en términos de fuentes de suministro (agua superficial, agua subterránea, trasvases, y elementos de re-utilización del agua), de extracción, transmisión, instalaciones de tratamiento de aguas residuales, demandas de agua, y la contaminación generada por dichas actividades. Los objetos correspondientes que representan cada uno de los elementos del modelo se presentan en la Tabla 1.

5.2.4 Fuentes de información para el modelo WEAP

Para construir el modelo, se requiere de una fase de recopilación de información que dé soporte al modelo. Esta fase busca recopilar la información existente en agencias de gobierno, bases de datos internacionales, información de satélite e información publicada en estudios previos. Según la guía metodológica para la implementación del modelo WEAP (CCG - SEI, 2009), los datos que se deben recopilar para una aplicación de WEAP se resumen en la Tabla 2, donde se especifican algunos formatos esperados para la entrada de la información.

Una descripción más detallada del modelo puede encontrarse en el manual de WEAP, el cual se puede descargar gratuitamente del sitio web de WEAP (<http://www.weap21.org/>).

Tabla 1 Elementos del modelo WEAP

Categoría	Símbolo	Nombre	Descripción
Elementos de suministro		Catchment	Área en la que se especifican procesos como precipitación, evapotranspiración, escorrentía, irrigación y los desempeños de los suelos agrícolas y no agrícolas.
		Groundwater	Elementos de aguas subterráneas que pueden tener infiltración de origen natural o a través de transmisiones, infiltración de las cuencas, interacción con los ríos y capacidad de almacenamiento.
		Other supply	Corresponde a cantidades de agua disponibles, y son elementos que no tienen capacidad de almacenamiento.
Elementos de demanda		Demand Site	Corresponden a usuarios del recurso, como ciudades, industrias o distritos de riego.
		Reservoir	Representan embalses presentes en el río.
		Flow requirement	Definen los caudales ecológicos necesarios en cierta posición del río.
		Run of river hydropower	Se usan para representar las estaciones de generación hidroeléctrica basadas diferentes caudales pero una carga hidráulica constante.
Elementos de transmisión		River	Representación principal de los cuerpos de agua como ríos o quebradas.
		Diversión	Derivaciones de los ríos a canales o tuberías.
		Runoff/infiltration Links	Representan la escorrentía o infiltración de las cuencas a los ríos, embalses o elementos de aguas subterráneas.
		Transmission Links	Se usan para representar la transmisión de caudales de aguas superficiales (embalses, o ríos), aguas subterráneas u otros suministros, para satisfacer las demandas.
		Return flow links	Representan caudales de retorno luego de ser empleados por los sitios de demanda.
Tratamiento de aguas		Wastewater treatment plants	Representan las plantas de tratamiento que reciben aguas de sitios de demanda, y remueven los contaminantes en las proporciones definidas para devolver el agua a los ríos, a los sitios de demanda o a cualquier otra fuente de suministro.
Elementos de calibración		Stream flow gauges	Representan sitios de medición de caudales.

5.3 La cuenca del río Apulo

La descripción que a continuación se presenta se basa en la caracterización adelantada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR y otras entidades elaborada para la conformación del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Bogotá cuya última versión fue aprobada mediante la Resolución 957 de 2019 “Por la cual se aprueba el ajuste y actualización del POMCA Río Bogotá” de las Corporaciones Autónomas Regionales de Cundinamarca, del Guavio y de la Orinoquía.

La cuenca del río Apulo se localiza al sur de la Sabana de Bogotá y forma parte de la cuenca media baja del río Bogotá; presenta un rango altitudinal muy pronunciado que varía de 3200 msnm a 425 msnm, permitiendo topográficamente relieves montañosos, planos, bajo condiciones climáticas variables entre frío húmedo, seco, medio húmedo y cálido seco.

Tabla 2 Resumen de datos para construir un modelo WEAP

Datos Requeridos	Formato preferido	Notas
Datos de entrada – Demandas		
- Uso de suelo		Estos datos son necesarios para caracterizar la cuenca
o DEM	GIS	
o Cobertura de vegetación	GIS	
o Tipo de suelo	GIS	
o Geología	GIS	
o Áreas de agricultura irrigada	GIS, Excel, texto o csv	
o Tecnologías de irrigación	GIS, Excel, texto o csv	
- Clima		Estos datos son necesarios para alimentar el modelo con condiciones climáticas. Precipitación y temperatura deben ser un promedio aproximado.
o Precipitación	Excel, texto o csv	
o Temperatura	Excel, texto o csv	
o Humedad relativa	Excel, texto o csv	
o Viento	Excel, texto o csv	
o Cobertura de nubes	Excel, texto o csv	
o Latitud	Excel, texto, csv o capas de SIG	
- Sitios de demanda (Ciudades, industrias, zonas agrícolas)		Aunque las demandas agrícolas se pueden estimar dentro del modelo hidrológico, también se pueden agrupar en un sitio de demanda.
o Número de usuarios	-	
o Consumo per cápita	-	
o Variación mensual	-	
o Porcentaje de retorno	-	
Datos de Entrada – Suministro y recursos		
- Reservorios/represas		Si existen reservorios, es importante tener información sobre su localización y sus características físicas y de operación.
Datos físicos:		
o Capacidad de almacenamiento	-	
o Volumen inicial	-	
o Curva de volumen/elevación	-	
o Evaporación	-	
o Pérdidas a agua subterránea	-	
Datos de operación		
o Máximo nivel de conservación	-	
o Máximo nivel de seguridad	-	
o Máximo nivel inactivo	-	
- Capacidad hidroeléctrica		El modelo requiere estos datos para poder calcular producción hidroeléctrica
o Mínimo caudal de turbina	-	
o Máximo caudal de turbina	-	
o Cabeza hidráulica	-	
o Factor de planta	-	
o Eficiencia	-	
- Requerimientos de caudales mínimos		
- Canales para extracción de agua (i.e. canales de irrigación)		Es importante saber la localización de los canales y acuíferos
- Agua subterránea		
Datos para calibración del modelo		
- Ríos		Estos datos son importantes para chequear el comportamiento del modelo. y realizar la calibración.
o Series de tiempo de caudales	Excel, texto, o csv	

La importancia ambiental de la subcuenca se evidencia con la presencia de ecosistemas de gran importancia debido a la diversidad existente como la Laguna Verde en el municipio de Zipacón, el río Curí en el municipio de Anolaima, el Bosque Andino de Peña Negra, río Bajamón en el municipio de Cachipay, el río Apulo en la desembocadura al río Bogotá y la laguna Puerto Rico en el municipio de Zipacón.

La economía de la subcuenca gira alrededor de la producción agrícola con cultivos de mango, guayaba, mora, plátano, cítricos y café, actividades industriales con la producción de flores de exportación tradicionales de la región y la avicultura; la actividad pecuaria con la crianza de ganado vacuno, porcino, caprino, aves de corral, conejos y actividades extractivas de piedra, arena, ladrilleras.

El potencial turístico de la zona se destaca con la cercanía a la ciudad de Bogotá, su agradable clima y paisaje que atrae a miles de turistas hacia los centros vacacionales que hacen parte de la subcuenca.

5.3.1 Localización general

Se enmarca en los municipios de Anapoima, Apulo, Anolaima, Bojacá, Cachipay, Zipacón, La Mesa y en menor proporción Quipile, Albán, Bituima, Facatativá, Jerusalén, Tena y Tocaima, los seis últimos en conjunto ocupan menos del 1% del área total de la cuenca. La localización general se muestra en la Figura 1.

5.3.2 Hidrografía de la cuenca del río Apulo

El río Apulo nace en el Distrito de Manejo Integrado Cerro Manjui en el municipio de Facatativá y desemboca en la margen derecha del río Bogotá a la altura del municipio de Apulo; tiene como afluentes principales los ríos Curí, Cachipay, Doña Juana y las quebradas Agua Fría, San Miguel, Las Micas, Salada, La Carbonera, El Limonal y Seca. En la Figura 2 se muestra la distribución de la red hídrica de la cuenca del río Apulo.

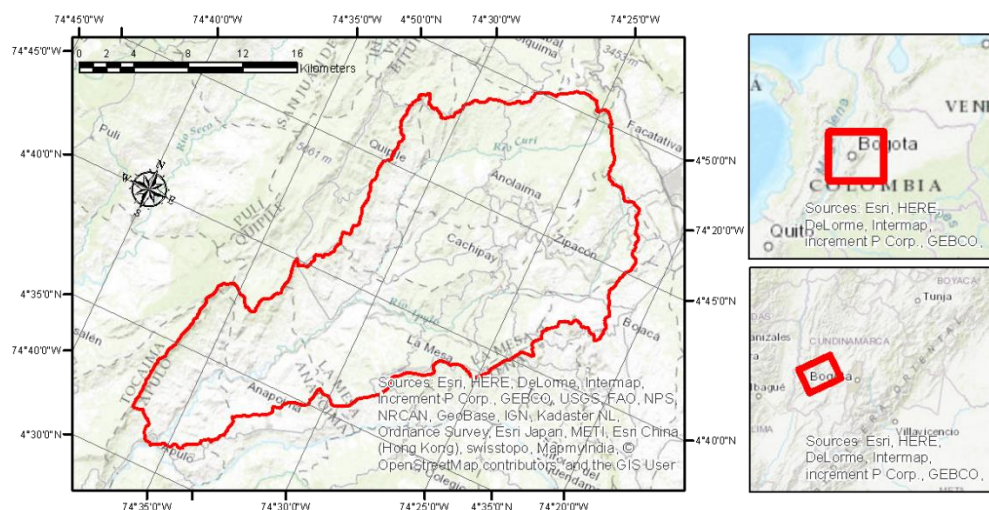


Figura 1 Localización general de la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia

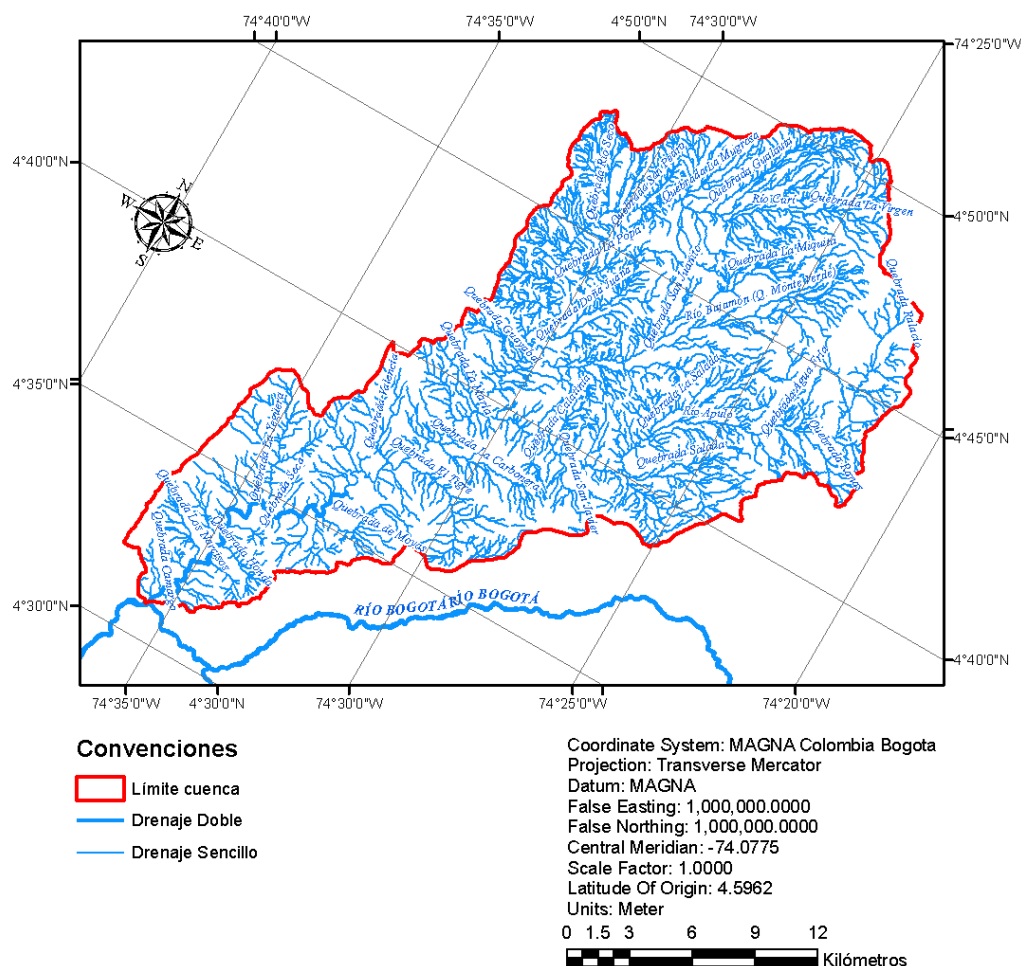


Figura 2 Red hídrica de la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración Propia

5.3.2.1 Zonificación de la cuenca del río Apulo

A partir de la red hidrográfica, para la cuenca del río Apulo, el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Bogotá, la subdivide en siete (7) subcuencas, de acuerdo con los principales aportes de agua al río. En la Figura 3 se muestra la localización de cada una de las subcuencas del río Apulo las cuales se describen en la Tabla 3 se muestra la caracterización morfométrica de cada una de las subcuencas de acuerdo a la información recopilada del POMCA del Río Bogotá (MinAmbiente - MinHacienda - Corporinoquía - CAR - Corpoguavio - Fondo de Adaptación - Consorcio Huitaca, 2019).

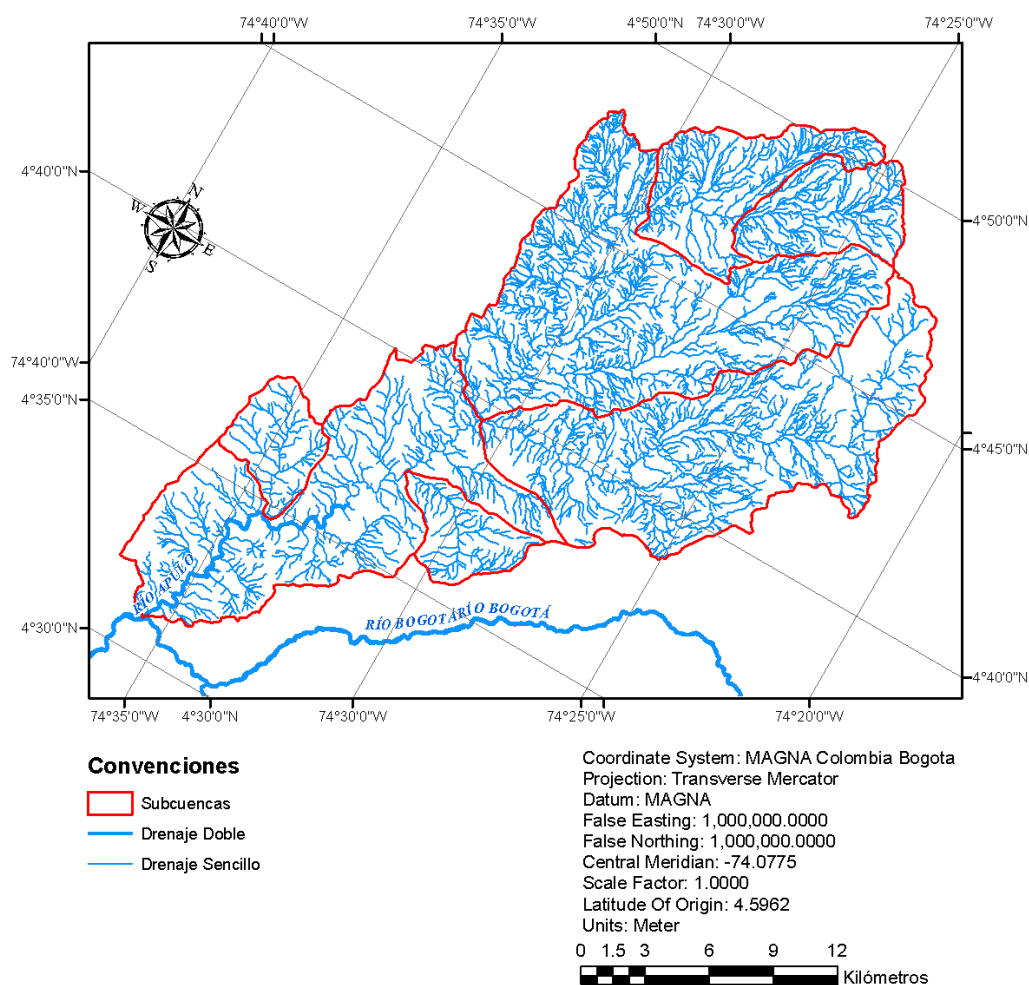


Figura 3 Subcuencas del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá

Tabla 3 Caracterización subcuencas Río Apulo. Fuente: POMCA Río Bogotá, 2019

Nombre Microcuenca	Cauce Principal	Orden Cuenca	Patrón de Drenaje	Longitud Caudes km	Área km ²	Dd (km/km ²)
Directos Cuenca baja Río Apulo	Río Ápulo	8	Dendrítico	321.2	114.6	2.80
Quebrada El Tigre	Quebrada El Tigre	6	Dendrítico	57.0	17.9	3.19
Directos Cuenca alta Río Apulo	Río Ápulo	5	Dendrítico	446.6	127.7	3.50
Directos Cuenca baja Río Curí	Río Curí	5	Dendrítico	583.1	138.2	4.22
Directos Cuenca media Río Curí	Río Curí	4	Dendrítico	166.6	38.4	4.34
Directos Cuenca alta Río Curí	Río Curí	3	Dendrítico	124.7	29.2	4.27
Quebrada La Yegüera	Quebrada La Yegüera	4	Dendrítico	53.4	18.7	2.85

5.3.3 Caracterización hidroclimatológica

Entre la documentación consultada la más reciente clasificación climática de la cuenca del río Apulo se elaboró para la elaboración del POMCA del río Bogotá, la cual se elaboró a partir de la información

de mediciones de variables climáticas en la red de estaciones hidroclimatológicas tanto de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR como del IDEAM las cuales se muestran en la Tabla 4, y cuya localización se muestra en la Figura 4.

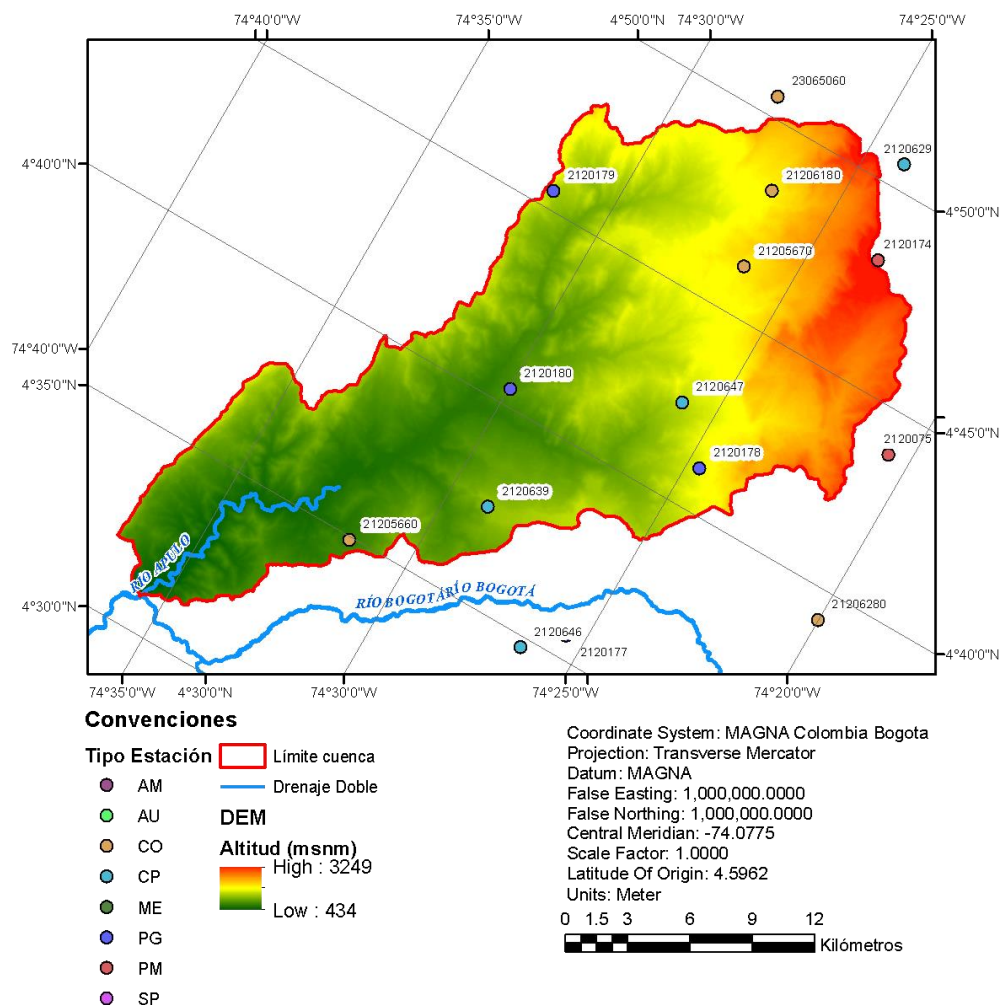


Figura 4 Localización de las estaciones climatológicas en la cuenca del río Apulo

Tabla 4 Estaciones climatológicas de la cuenca del río Apulo

CODIGO	NOMBRE	CAT	ENT OP	ELEVACION (msnm)	COORD NORTE	COORD ESTE
2120639	MESA LA	CP	CAR	1194	955142	1003154
2120178	PEDRO PALO	PG	CAR	2050	963048	1009838
2120179	ARGENTINA	PG	CAR	1150	950294	1017884
2120180	SAN GREGORIO	PG	CAR	854	953250	1008599
21205660	MERCEDES LAS	CO	IDEAM	810	950164	998433
21205670	FLORIDA LA	CO	IDEAM	1915	960048	1019328
21206180	PRIMAVERA D MATIMA	CO	IDEAM	1850	959403	1023156
2120647	ESPERANZA LA	CP	CAR	1240	960750	1012164

CP: Climatológica Principal, PG: Pluviográfica, CO: Climatológica Ordinaria

De acuerdo con el análisis de la información de las estaciones hidroclimatológicas el principal comportamiento de las variables climáticas se presenta a continuación:

5.3.3.1 Precipitación

Los máximos valores de precipitación se presentan en la cuenca media entre la parte norte del municipio de La Mesa, en Cachipay y Quipile con valores cercanos a los 1100mm anuales, mientras que los menores registros se ubican en la parte alta de la cuenca en inmediaciones de Bojacá y Zipacón con valores que oscilan los 800mm anuales como se muestra en la Figura 5.

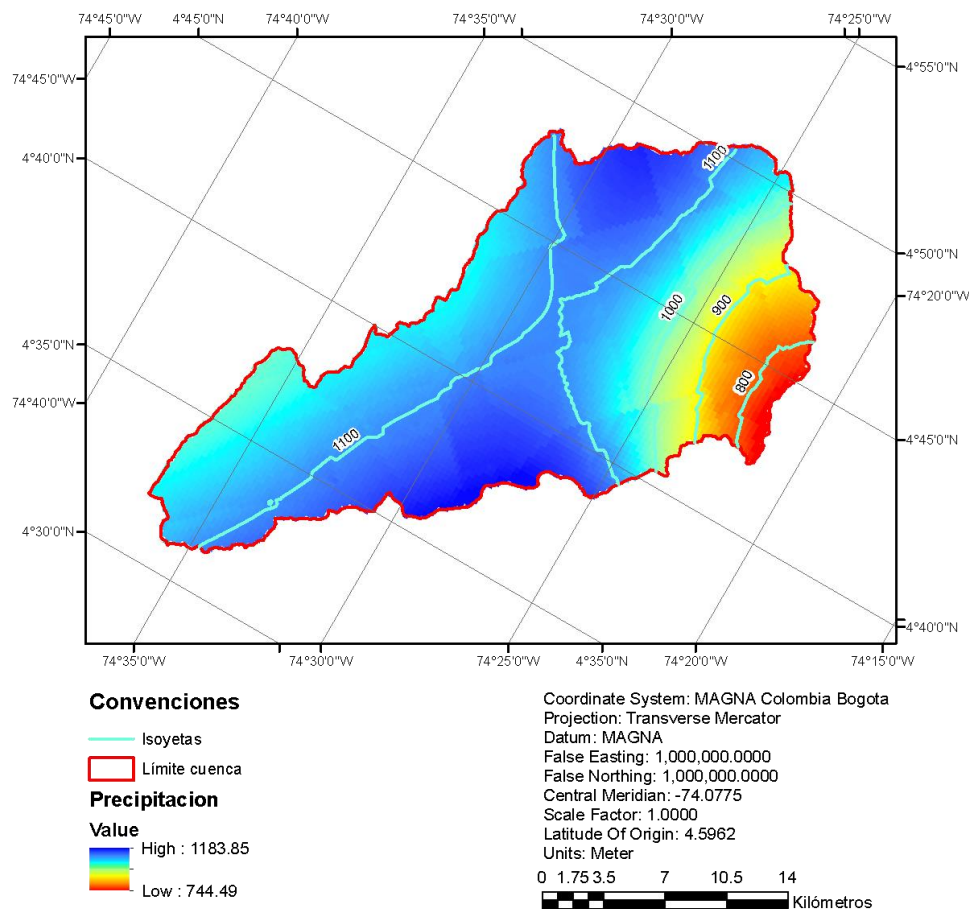


Figura 5 Régimen de Precipitaciones Cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Rio Bogotá

El comportamiento temporal de la precipitación es bimodal, con un comportamiento típico de la zona central del país por el paso de la Zona de Confluencia Intertropical tanto en el primer semestre del año como en el segundo. El primer periodo húmedo se presenta entre los meses de marzo, abril y mayo y el segundo entre octubre y noviembre. El periodo de estiaje se observa de diciembre a febrero, presentando en enero los meses más secos.

5.3.3.2 Temperatura

La distribución de la temperatura en la cuenca obedece a la orografía del terreno de acuerdo a los valores promedio registrados en las estaciones climatológicas. La distribución espacial de la temperatura promedio anual se presenta en la Figura 6 donde pueden evidenciarse valores cercanos a los 11°C en las zonas altas de la cuenca y de cerca de 23°C en la cuenca baja.

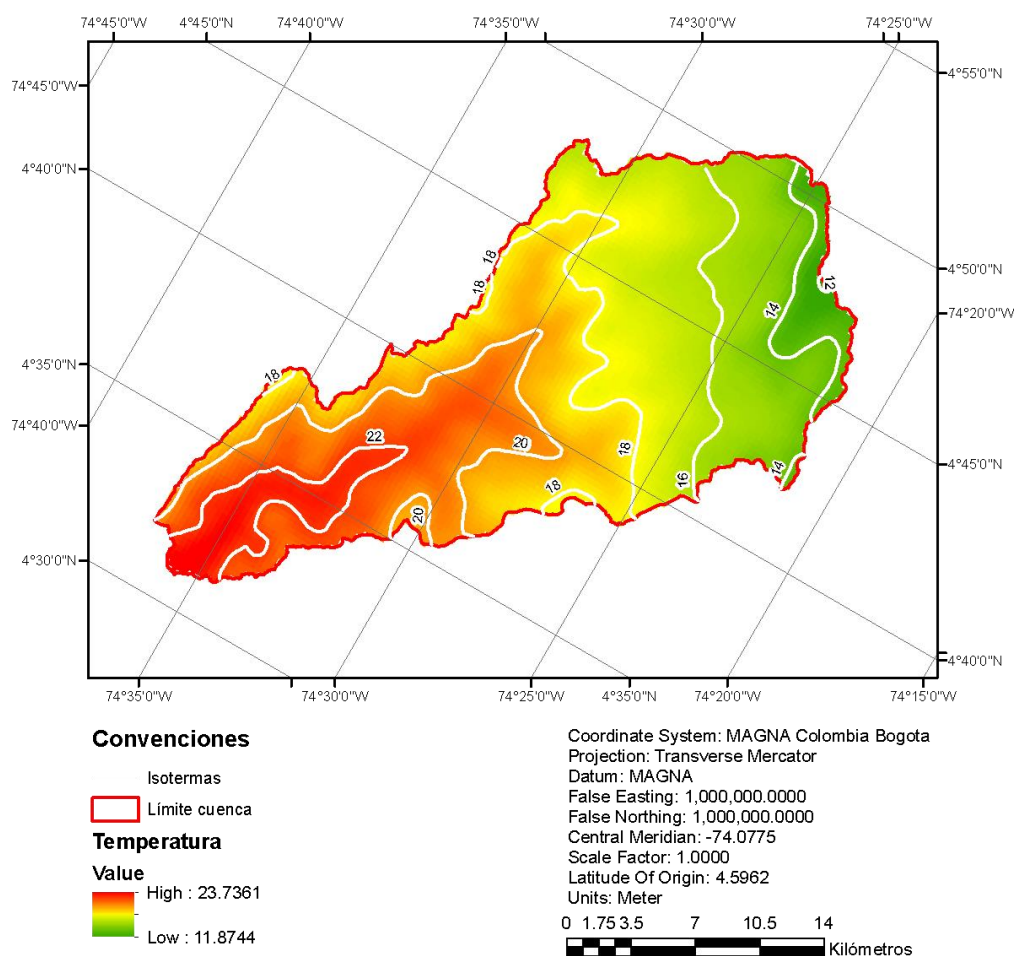


Figura 6 Régimen de Temperaturas Cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Rio Bogotá

Los valores medios mensuales de temperatura presentan una distribución de tipo bimodal, observándose los valores más altos en el primer trimestre del año con valores que fluctúan alrededor de los 26°C, y entre agosto y septiembre con registros de alrededor de 25°C. Los valores más bajos de temperatura se presentan entre abril y junio con valores cercanos a los 24°C y en noviembre con valores promedio igualmente de 24°C.

5.3.3.3 Humedad relativa

La humedad relativa media mensual presenta una distribución de tipo bimodal, siguiendo los mismos parámetros de la precipitación, presentando los valores más altos entre abril y mayo y entre octubre y noviembre con registros del 81% y del 82% respectivamente. Los valores más bajos se presentan en julio, agosto y septiembre con valores que oscilan el 75%.

5.3.3.4 Brillo y radiación solar

En cuanto al brillo solar los valores más altos se presentan a final de año con valores de 180 h/mes. Los menores valores se presentan en abril y mayo del primer semestre y en septiembre del segundo

semestre con valores de 120 h/mes. La radiación solar medida en ciertas estaciones de la cuenca presenta una distribución uniforme a lo largo del año presentando un valor promedio de 358 cal/cm².

5.3.3.5 Evapotranspiración

A partir de las estimaciones de Evapotranspiración potencial y real calculadas para el POMCA del río Bogotá, se estiman valores para la potencial de en promedio 1100mm anuales, mientras que los valores de evapotranspiración real para la cuenca oscilan alrededor de 1000mm anuales.

5.3.3.6 Régimen de Caudales

En la cuenca del río Apulo se cuenta con únicamente siete (7) estaciones de tipo hidrológicas, de las cuales seis cuenta con periodos de registros de menos de 10 años de datos y solamente una cuenta con más de 10 años de registro. Las estaciones existentes en la cuenca se muestran en la Tabla 5 y su distribución espacial se muestra en la Figura 8.

Tabla 5 Estaciones limnimétricas en la cuenca del río Apulo

Cod	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
2120880	SAN JAVIER	4.663667	-74.474528	784
2120885	PEÑA NEGRA	4.703528	-74.486278	980
2120892	MANZANARES	4.676	-74.510444	711
2120916	ESPERANZA LA	4.704278	-74.431694	1341
2120930	CARTAGENA	4.715167	-74.404222	1522
2120931	PUENTE PEATONAL	4.702972	-74.435194	1279
2120933	PUENTE FERROCARRIL	4.758917	-74.377472	2422
2120934	CHIRCAL EL	4.722722	-74.391972	1971
2120985	PROSOCIAL	4.702083	-74.434639	1299

En la estación La Esperanza ubicada en la cuenca media del río Apulo se observan dos periodos de aumentos de caudales obedeciendo a una distribución de tipo bimodal, con valores máximos de caudal registrados en mayo y noviembre. Los caudales oscilan en los 500 L/s, pero se han alcanzado valores de hasta 2 metros cúbicos por segundo (m³/s). En la Figura 7 se puede observar la distribución temporal de los valores medios máximos y mínimos de caudales registrados por la estación.

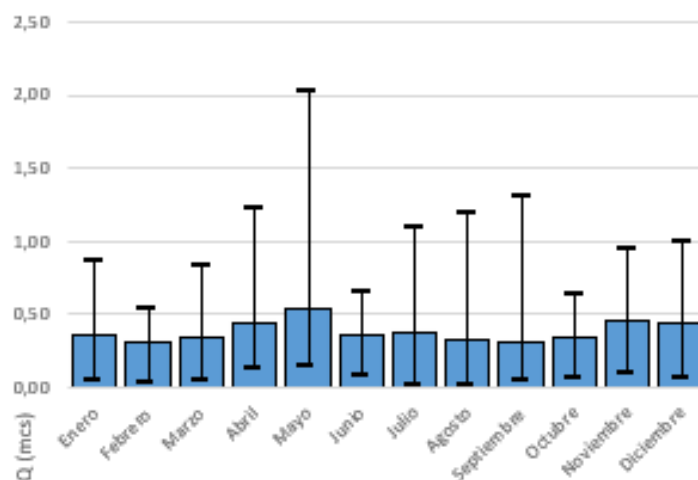


Figura 7 Distribución del régimen de caudales para la estación La Esperanza - Río Apulo

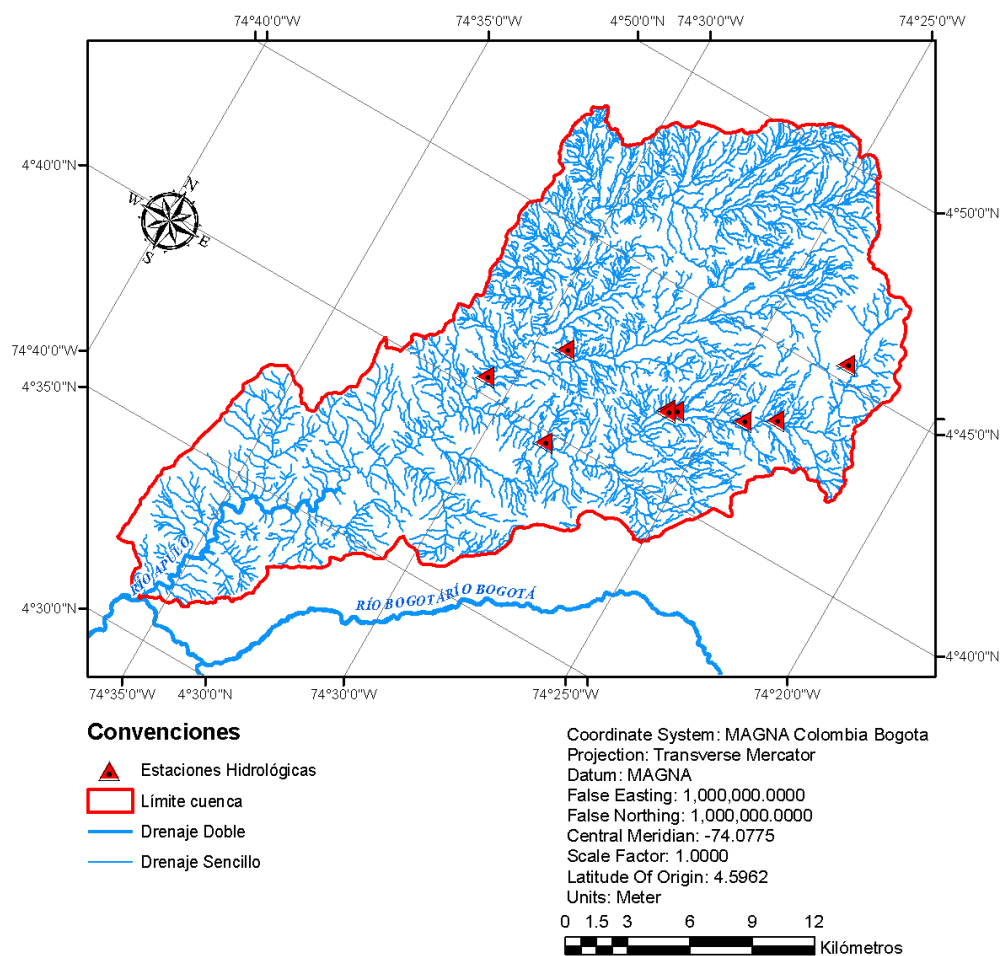


Figura 8 Estaciones hidrológicas en la cuenca del río Bogotá

5.3.4 Cobertura del suelo

De acuerdo con la metodología Corine Land Cover, en el POMCA del río Bogotá publicado en el año 2019 el suelo de la cuenca del río Apulo es principalmente de bosques plantados, seguido de cultivos permanente o transitorios. Esta disposición es acorde con los usos que se le dan al suelo, por la principal actividad económica de la región. En la figura Figura 9 se muestra la distribución de las coberturas de suelo para la cuenca del río Apulo.

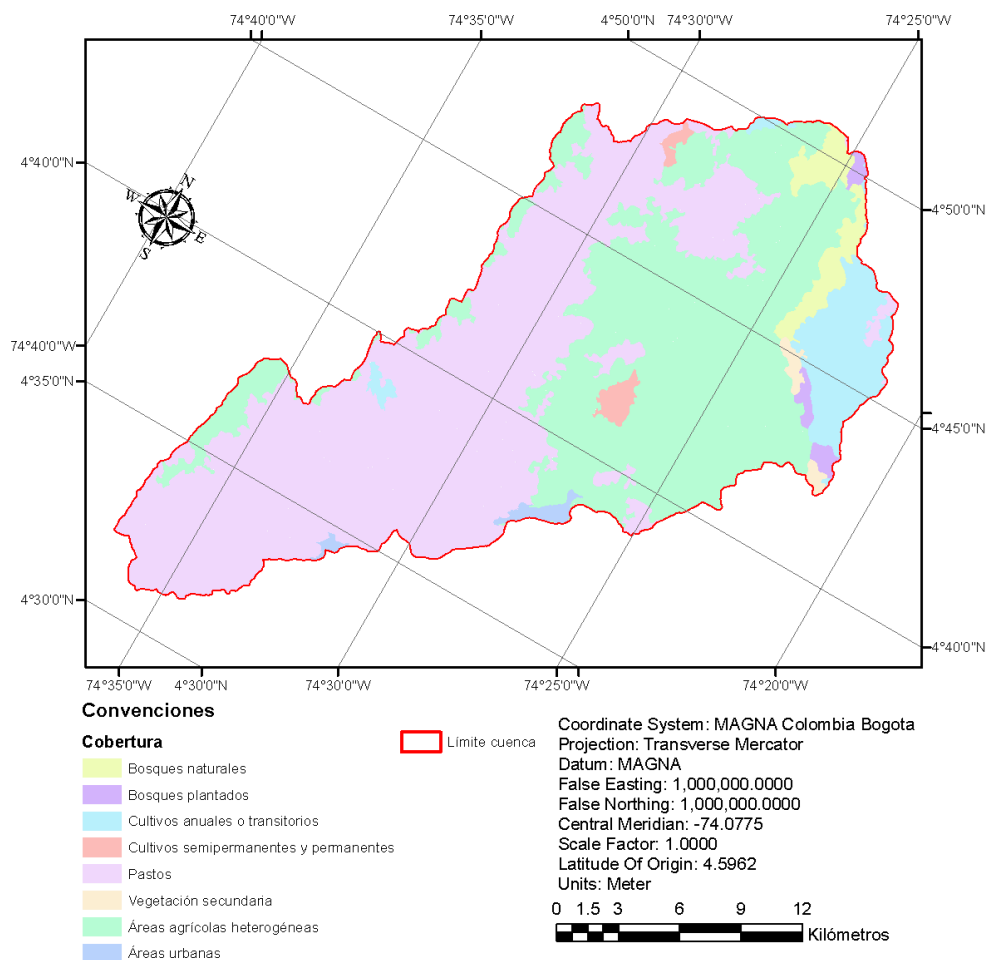


Figura 9 Cobertura del suelo cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Río Bogotá

5.3.5 Demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Apulo

De acuerdo con la información recopilada de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR, en la subcuenca del río Apulo se identificaron 469 concesiones de agua superficial que demandan sobre la cuenca un total de 205 L/s, cuyos usos son principalmente de uso doméstico seguido de uso para riego y silvicultura. En la Figura 10 se muestra la distribución espacial de las concesiones otorgadas por la CAR y su distribución de acuerdo con el uso principal otorgado se muestra en la Figura 11.

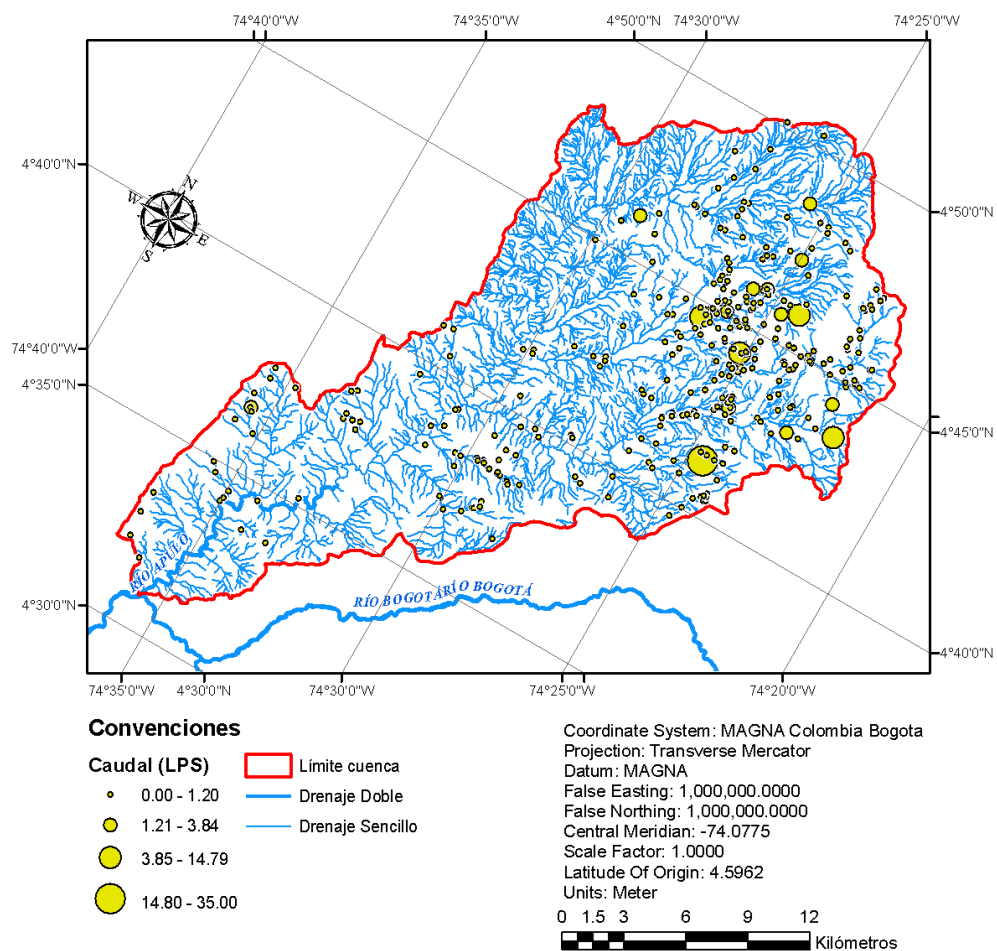


Figura 10 Concesiones otorgadas por la CAR en la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia a partir de POMCA Rio Bogotá

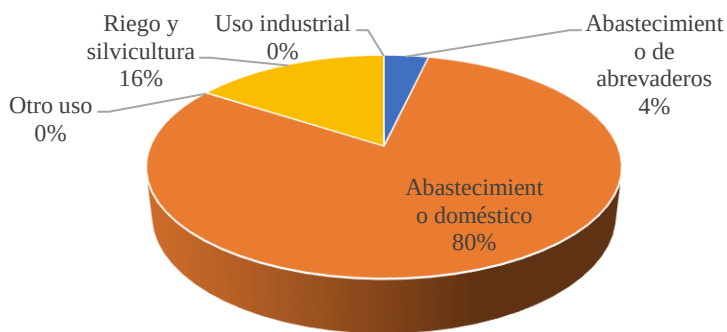


Figura 11 Usos principales del agua en la cuenca del río Apulo. Fuente: Elaboración propia

6. Metodología

De acuerdo con la disponibilidad de información y las características del software descritos en los capítulos anteriores la representación de la cuenca del río Apulo se realizó siguiendo la siguiente metodología:

6.1 Fuentes de información

A continuación, se describen las fuentes de información empleados para realizar el modelo WEAP de la cuenca del río Apulo:

6.1.1 Características físicas e hidroclimatológicas de la cuenca

De acuerdo con los elementos disponibles en el modelo WEAP para realizar la caracterización de las unidades hidrológicas, a partir de la información recopilada se utilizó la información de los formatos señalados en la Tabla 6, la cual posteriormente se procesa con las herramientas señaladas para obtener la caracterización que requiere la modelación de la cuenca:

Tabla 6 Fuentes, formatos y herramientas para la caracterización hidrológica

Datos de entrada	Fuente	Formato y Herramientas de procesamiento
Datos de entrada – Demandas		
- Área	POMCA cuenca del río Bogotá	Shape para procesamiento en herramienta SIG
- Cobertura del suelo	POMCA cuenca del río Bogotá	Shape para procesamiento en herramienta SIG
- Clima	Registros estaciones hidrometeorológicas IDEAM	Tablas de datos para procesamiento en Excel y distribución espacial mediante herramientas SIG
Datos para calibración		
- Registros de caudales	Registros estaciones hidrológicas IDEAM	Tablas de datos para procesamiento en Excel

6.1.2 Demandas de recurso hídrico en la cuenca del río Apulo

Para la identificación de las demandas del recurso hídrico en la cuenca del río Apulo, las cuales se contemplan dentro del balance hídrico de la cuenca, se recopiló la información de concesiones otorgadas por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca vigentes al año 2019 las cuales fueron suministradas por la Corporación de forma tabular, a partir de la cual, de acuerdo con su localización se agruparon por unidad de análisis hidrológica definida en el modelo WEAP, que se muestra en la sección de resultados.

6.2 Planteamiento de escenarios de cambios de uso del suelo

De acuerdo con las coberturas identificadas en la cuenca del río Apulo se consideran tres posibles escenarios que pueden darse con la toma de decisiones por parte de las entidades encargadas de la gestión de los recursos naturales y la planeación en la región como lo son la Corporación Autónoma Regional, las Administraciones municipales o Departamentales.

Planteando estos posibles escenarios se busca evaluar el cambio en el régimen hidrológico en la cuenca del río Apulo a partir del cambio de los usos del suelo, utilizando la herramienta WEAP.

Los suelos de la cuenca del río Apulo son principalmente bosques plantados y pastos, considerando posibles escenarios de cambio de usos de suelo a partir de criterios de ordenamiento territorial, mediante el cual se busque el crecimiento de las condiciones materiales del territorio, expresables en mejores infraestructuras y mejores condiciones de producción para una mayor productividad y competitividad territorial (Cabeza, 2006).

Los escenarios que se plantean, considerando posibles criterios de ordenamiento territorial en las regiones son:

- Considerando que la principal actividad económica de la cuenca es la producción agrícola, se plantea un escenario de aumento del 10% en las áreas agrícolas heterogéneas disminuyendo en este mismo porcentaje la cobertura de pastos.
- Teniendo en cuenta el atractivo turístico de la mayoría de los municipios de la cuenca, se plantea como escenario un aumento del 10% en las áreas urbanas disminuyendo en el porcentaje de pastos, contemplando una posible expansión en construcción de conjuntos residenciales y su infraestructura urbana asociada.
- Contemplando un posible escenario de políticas de preservación ambiental, al considerar los diferentes ecosistemas de importancia presentes en la cuenca, se planteó un posible aumento del 10% en las áreas de bosques plantados disminuyendo en cobertura de pastos, como estrategia de conservación y preservación de los recursos naturales de la cuenca.

6.3 Modelación en WEAP de la cuenca del río Apulo

Para la representación de los procesos hidrológicos en la cuenca del río Apulo se emplea el modelo WEAP, para ello la metodología empleada consideró:

6.3.1 Representación topológica de la cuenca

Para la representación topológica de la cuenca se emplearon los elementos del modelo WEAP que se señalan en la Tabla 1. En este sentido las subcuencas que se definen se representan mediante elementos de “Unidades Hidrológicas”, las demandas se representan mediante los elementos de “Sitios de demanda”, los ríos principales se representan utilizando el elemento “Río” y los sitios de captación mediante el elemento “Medidor de caudal”.

Todos estos elementos se relacionan en el modelo mediante vínculos que obedezcan a las relaciones hidrológicas de la cuenca, para lo que el modelo WEAP permite interactuar con cartografía en formato shape que facilita la identificación de las relaciones como se muestra en la sección de resultados.

6.3.2 Representación de las características físicas de cada Unidad Hidrológica

Las características físicas de cada subcuenca se representan como atributos a las Unidades Hidrológicas, las cuales incluyen:

- Área: Determinada a partir de la cartografía en formato shape disponible para la cuenca.
- Coeficiente de cultivo y precipitación efectiva: Se determinan para cada una de las coberturas existentes en la cuenca, para lo que se determina el área de cada cobertura a partir de la

cartografía en formato shape disponible para la cuenca. Estos coeficientes se dejan por defecto y serán objeto de calibración.

6.3.3 Representación de las condiciones climáticas

La información de las condiciones climáticas se obtendrá de los registros de precipitación disponibles para la cuenca, para lo que se tomarán series representativas para cada Unidad Hidrológica a partir de los registros en la zona. Los datos empleados para representar las condiciones climáticas son:

- Precipitación: Se realizará la distribución espacial de las series de tiempo de las estaciones que registran lluvias en las zonas, a partir de las cuales se realizará una única serie que represente el comportamiento de precipitación en cada Unidad Hidrológica.
- Evapotranspiración de referencia: La Evapotranspiración de referencia se calculará empleando la ecuación de Hargreaves siguiendo la recomendación hecha por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, teniendo en cuenta que en las estaciones climatológicas de la cuenca no se cuenta con información de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento para el periodo de estudio (FAO, 2006). La ecuación de Hargreaves calcula la evapotranspiración de referencia ET_o en mm/día como:

$$ET_o = 0,0023 (T_{med} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a$$

Donde T_{med} corresponde a los valores medios mensuales de temperatura media, T_{max} son los valores de temperatura máxima mensual, T_{min} corresponde a los valores de temperatura mínima y R_a a valores de radiación extraterrestre en mm/día, cuyos valores se tomaron para una latitud de 4° Norte y los valores mensuales obedecieron al día 15 de cada mes como se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7 Valores de R_a ($MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$) empleados para la estimación de la evapotranspiración de referencia.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
R_a	34,6	36,4	37,6	37,4	36,0	35,0	35,3	36,5	37,3	36,6	34,9	33,9

Tomado de (FAO, 2006)

Una vez se estiman los valores de Evapotranspiración de referencia estos se representarán mediante series de tiempo representativos para cada Unidad Hidrológica del modelo.

6.3.4 Representación de las demandas

Las demandas en la cuenca se agregarán para cada Unidad Hidrológica considerando el caudal total concesionado para cada Unidad los cuales se representaron a través del elemento “Demand Site” del modelo, las cuales se consideran en el balance hídrico que realiza el modelo WEAP.

6.3.5 Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizará la metodología PEST (Parameter ESTimation) como módulo integrado en WEAP para realizar la calibración de los parámetros de coeficiente del cultivo y precipitación efectiva de cada una de las coberturas.

PEST es un estimador de parámetros para modelos independientes no lineales. Este programa ha sido ampliamente utilizado para la calibración de varios tipos de modelos en diferentes áreas de la ingeniería. PEST se comunica con el modelo directamente con el archivo de entrada del programa el

cual se está utilizando, de esta manera PEST puede usar el archivo del programa automáticamente sin necesidad de recompilar el archivo de entrada.

Este programa está basado en el método Gauss-Marquardt-Levenberg lo cual hace que el algoritmo utilizado para calibrar los parámetros no lineales tenga buenas aproximaciones. Siendo diseñado específicamente para modelos ambientales complejos, el tiempo requerido para calibración puede ser reducido a la hora de usar este programa.

Para la estimación de los coeficientes de cultivo se tomó un rango de 0 a 1.5 de acuerdo con los valores identificados en las recomendaciones de la FAO para la estimación del coeficiente (FAO, 2006), y la precipitación efectiva en el rango de 0% a 100%.

Se utilizó la ecuación del sesgo relativo (P-Bias) y del parámetro de eficiencia de Nash - Sutcliffe para estimar el desempeño del modelo, cuya ecuación y valores de referencia se muestran en la Tabla 8:

Tabla 8 Ecuaciones para evaluación del desempeño del modelo

Criterio	Expresión	Valores admisibles
Sesgo relativo % (P-Bias)	$PBIAS = \left[\frac{\sum_i^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_i^n (Y_i^{obs})} \right] * 100$	Muy bueno: < 10% Bueno: 10 – 15% Satisfactorio: 15 – 25% No satisfactorio: > 25%
Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE)	$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_i^n (Log(Y_i^{sim}) - Log(Y_i^{obs}))^2}{\sum_i^n (Log(Y_i^{obs}) - Log(Y^{mean}))^2} \right]$	Muy bueno: 0.75 – 1.00 Bueno: 0.65 – 0.75 Satisfactorio: 0.50 – 0.65 No satisfactorio: < 0.5

Para la calibración se identificarán las estaciones limnimétricas o limnigráficas existentes en la cuenca y cuya disponibilidad de registros permita comparar las simulaciones que se realizan en WEAP con los datos que se observaron para el periodo de tiempo que se empleó en la caracterización climática de la cuenca.

6.3.6 Simulación hidrológica bajo escenarios de cambio de usos del suelo

Una vez se tenga calibrado el modelo se representarán los escenarios cambiando los porcentajes de coberturas que tiene el modelo de forma que se obtengan series medias mensuales multianuales que permitan realizar comparativos entre los diferentes escenarios simulados como respuesta de la cuenca a cambios de coberturas de suelo.

7. Resultados

A continuación, se describe la estrategia de modelación de la cuenca del río Apulo en el modelo WEAP

7.1 Caracterización física e hidroclimatológica de la cuenca del río Apulo

Teniendo en cuenta la disponibilidad de información para la calibración del modelo, como se describe en el aparte 7.1.4, se definieron dos Unidades Hidrológicas para realizar la modelación de la cuenca del río Apulo, a partir de las cuales se utilizó la siguiente información para la respectiva caracterización:

7.1.1 Área

Con el fin de agrupar la información de la cuenca del río Apulo en las dos subcuencas definidas para la modelación en WEAP se empleó la información señalada en la Tabla 9:

Tabla 9 Estimación área Unidades Hidrológicas modelo WEAP Río Apulo

Zonificación POMCA	UH WEAP	Área (km ²)
Directos Cuenca baja Río Curí	UH R Curí	205,8
Directos Cuenca media Río Curí		
Directos Cuenca alta Río Curí		
Directos Cuenca baja Río Apulo	UH R Apulo	278,9
Quebrada El Tigre		
Directos Cuenca alta Río Apulo		
Quebrada La Yegüera		

7.1.2 Coeficiente de cultivo y Precipitación efectiva

Los valores de coeficiente de cultivo y precipitación efectiva obedecerán al tipo de cobertura que se tiene en cada una de las subcuencas. A partir del mapa de coberturas señalado en la Figura 9, se hizo una estimación del área que cada cobertura tiene en la subcuenca y los valores del coeficiente de cultivo y la precipitación efectiva corresponden a valores que se calibrarán para la cuenca como se describirá más adelante. Las áreas identificadas de para cada una de las coberturas se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 Áreas por cobertura para cada subcuenca de modelación en WEAP

Cobertura	Cuenca Río Apulo (km ²)	Cuenca Río Curí (km ²)
Áreas agrícolas heterogéneas	85,05	99,68
Áreas urbanas	3,26	NR
Bosques naturales	0,09	13,58
Bosques plantados	2,84	1,08
Cultivos anuales o transitorios	25,52	2,42
Cultivos semipermanentes y permanentes	3,04	1,45
Pastos	156,40	87,55
Vegetación secundaria	2,69	0,01

NR= No registra

7.1.3 Caracterización climática

7.1.3.1 Precipitación

A partir de la información de estaciones hidroclimatológicas de la cuenca se identificaron las estaciones cuyos registros de precipitación total mensual abarcaran el periodo comprendido entre 1992 y 2012 de acuerdo con la disponibilidad de registros de caudales en la cuenca con fines de calibración del modelo como se explica adelante (ver capítulo 7.1.4 Información para la calibración del modelo) como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Cantidad de registros mensuales por año de precipitación total en la cuenca del río Apulo

Código	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
2120639	12	12	12	12	12	12	5	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12
2120178	12	12	8	12	11	8	12	12	12	12	12	8	12	12	12	11	12	12	12	12	12
2120180	9	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12
2120179	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12
2120647		9	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	7	12	12	12	12	12	12	12
21205670	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	11	12	12	12	12	12
21205660	12	12	12	12	12	11	11	8	9	10	12	10	12	12	12	9	12	12	12	12	12

Con la información de las estaciones seleccionadas se realizó la distribución espacial de los registros mediante interpolación con el uso del software ArcGIS para obtener finalmente un valor representativo de precipitación para la cuenca en series de tiempo mensuales como se muestra en la Figura 12 para la cuenca del río Curí y en la Figura 13 para la cuenca del río Apulo:

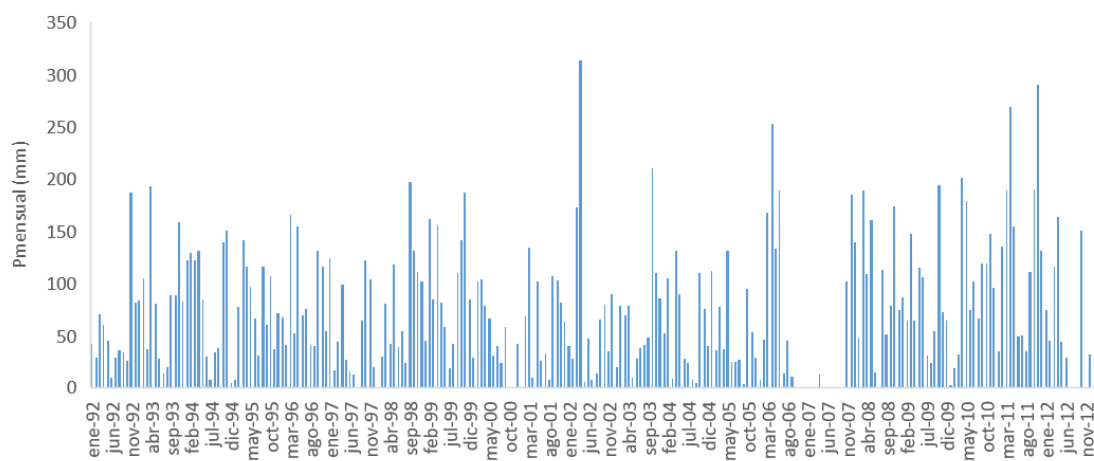


Figura 12 Serie de precipitación para la cuenca del río Curí

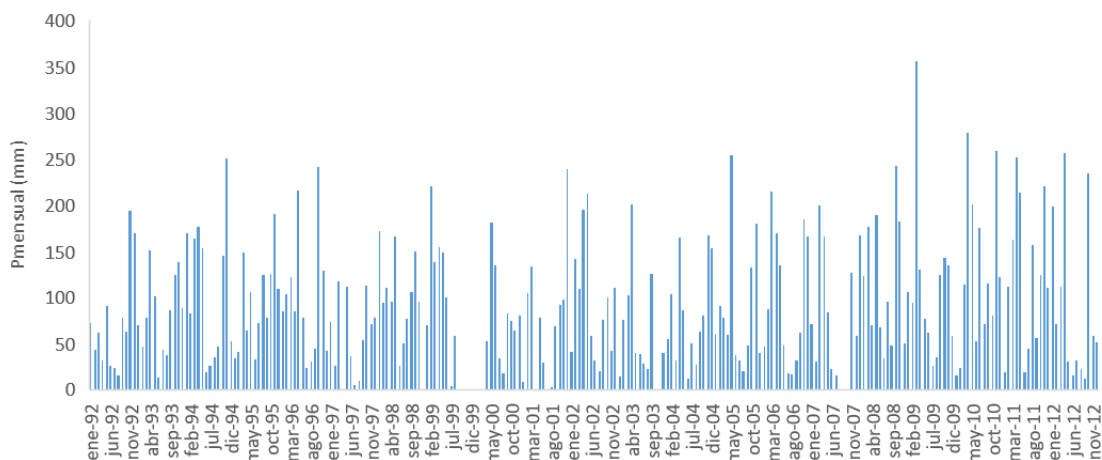


Figura 13 Serie de precipitación para la cuenca del río Apurí

7.1.3.2 Evapotranspiración de referencia

Teniendo en cuenta el periodo de análisis tomado de 1992 a 2012 las estaciones que cuentan con valores de temperaturas medias, máximas y mínimas, para el análisis se utilizaron las señaladas en la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14, obteniendo las series de evapotranspiración de referencia mensual mostradas en la Figura 14 y en la Figura 15.

Tabla 12 Cantidad de registros mensuales por año de temperatura media en la cuenca del río Apurí

Código	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
2120647		6	11	12	12	10	11	11	12	12	12	11	12	3	12	10	12	8	12	12	5
21205660	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
21205670	12	12	11	11	9	11	11	12	12	12	12	12	12	10	12	11	12	12	12	12	12
21206180	12	12	12	12	12	12	12	12	8	11	12	12	12	11	9	3	4	10	8		11

Tabla 13 Cantidad de registros mensuales por año de temperatura máxima en la cuenca del río Apurí

Código	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
2120647		6	12	12	12	9	9	11	11	11	12	10	11	2	11	10	12	6	12	12	12
21205670	12	12	12	12	8	12	7			8	12	12	12	9	12	11	12	8	12	12	12
21205660	12	12	12	12	12	11	11	8		7	12	12	12	12	10	4	12	12	12	12	12
21206180	12	12	12	12	12	12	12	12	8	11	12	12	12	11	9	4	5	11	12	12	12

Tabla 14 Cantidad de registros mensuales por año de temperatura mínima en la cuenca del río Apurí

Código	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
21205670	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	11	12	12	12	10	12
21205660	12	12	12	11	12	11	11	8	0	8	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12
21206180	12	12	12	12	12	12	12	12	8	11	12	12	12	11	9	4	5	11	12	12	12
2120647		6	12	12	12	9	9	11	11	11	12	11	8	2	11	10	12	6	12	12	12

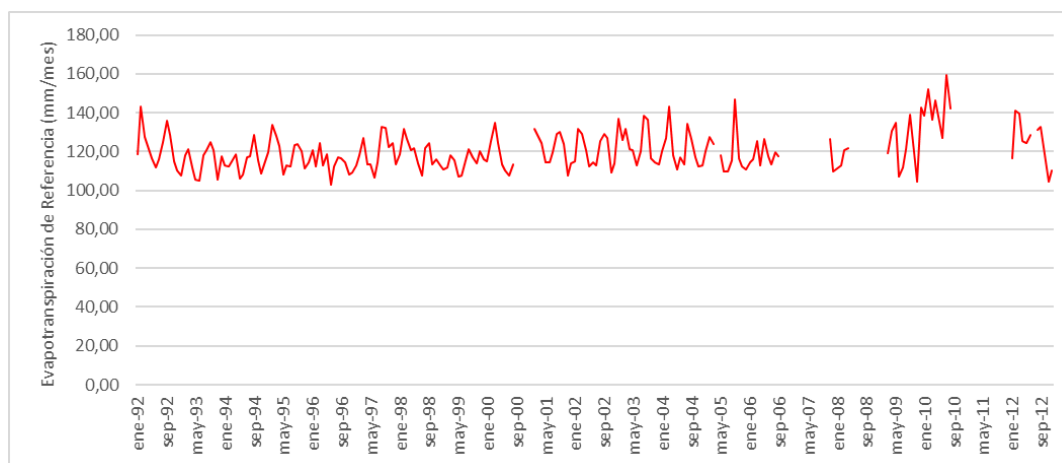


Figura 14 Series de valores de Evapotranspiración de referencia para la subcuenca del río Curí

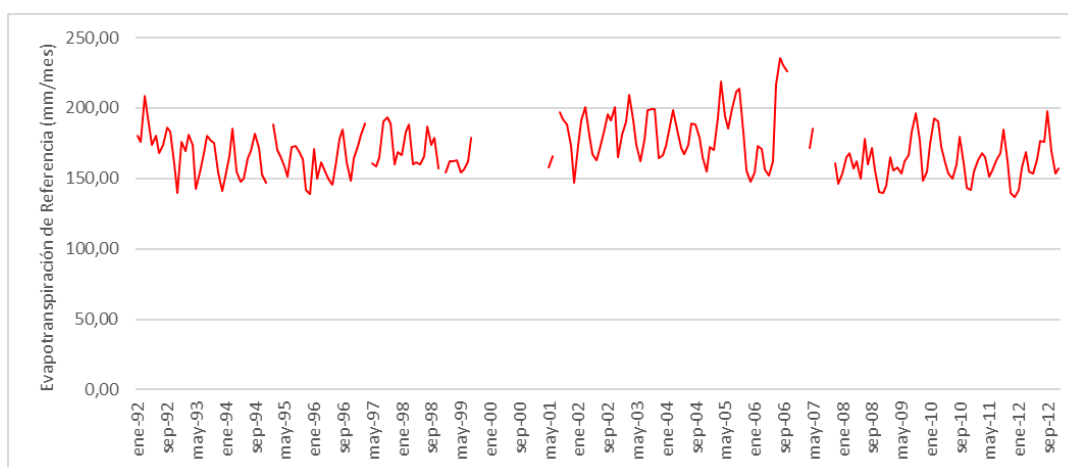


Figura 15 Series de valores de Evapotranspiración de referencia para la subcuenca del río Apulo

7.1.4 Información para la calibración del modelo

Para la calibración del modelo se identificaron las estaciones hidrológicas que tiene la cuenca, de las cuales se buscó la que tuviese la mayor longitud de registros. En la Tabla 15 se muestra la longitud de registros con que cuentan las estaciones de la cuenca:

Tabla 15 Cantidad de registros mensuales por año de caudales medios en la cuenca del río Apulo

Código	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
2120930		8	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10
2120916		7	12	6	11	10	12	12	12	12	12	4		6	11	12	12	10	12	12	12	12	12	10
2120934					12	9	11	12	12	12	12	12	10	12	12	9	12	11	9	12	12	12	12	10
2120933					9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	6	12	12	12	12	12	12	10
2120885	12	12	12	12	11	6	11	12	12	12	12	12											11	10
2120931									8	11	12	7	12	6	11	12	11	12	10	11	10			
2120892	9	11	10	8	3	9	11	8	10	12	12	12												4
2120880									12	12	12	12										12	12	10
2120985																					12	12	12	10

Las estaciones con mejor longitud de registros son las estaciones 2120930 Cartagena y 2120916 La Esperanza, las cuales se encuentran en el río Apulo. Teniendo en cuenta que la que mayor área de cuenca abarca es la estación La Esperanza, se selecciona como estación para calibración de los parámetros de la cuenca, cuya serie de registros se muestra en la Figura 16.

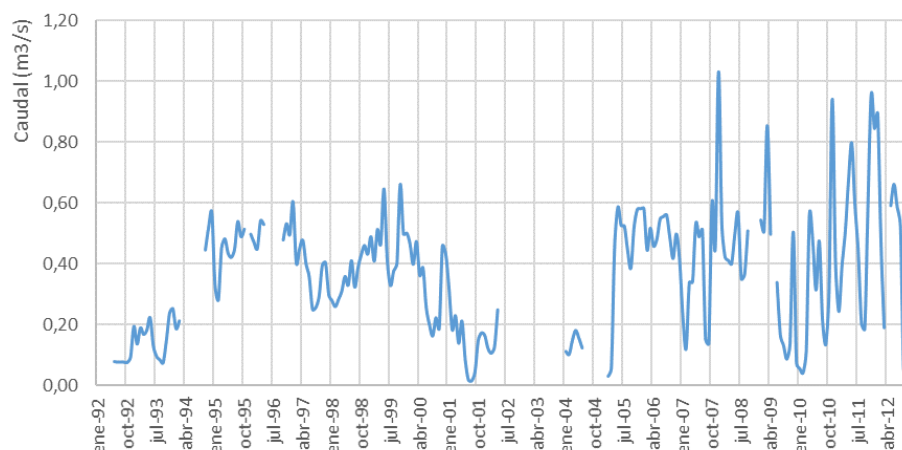


Figura 16 Series de caudales para la estación La Esperanza

7.2 Identificación de las demandas de recurso hídrico en la Cuenca del río Apulo

Teniendo en cuenta la distribución espacial de las demandas en la cuenca y que la modelación en WEAP se agregó para dos subcuencas, las demandas del recurso tomadas a partir de las concesiones de agua otorgadas en la región, igualmente se agregó para cada una de las dos subcuencas o Unidades Hidrológicas de modelación. En este sentido la información de demandas en la cuenca se agregó como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16 Demandas estimadas de cada subcuenca en el río Apulo

Subcuenca	Caudal total concesionado (L/s)	Estimado de población
Río Curí	89.064	64126
Río Apulo	116.5688	83930

Teniendo en cuenta que el principal uso que se le da al agua en la cuenca es el doméstico, para su representación en WEAP se consideró el caudal total concesionado como caudal de uso doméstico, tomando como referencia un consumo promedio día de 120L/Hab-d para estimar una cantidad de población abastecida en la cuenca y un coeficiente de consumo del 20%¹ (Teniendo en cuenta el coeficiente de retorno del 80% recomendado por el Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS)

¹ En el modelo WEAP el coeficiente de consumo se considera como el porcentaje del caudal afluente consumido (pérdidas del sistema), calculando el caudal de retorno como el producto del caudal afluente*(1-coeficiente de consumo). De esta forma, para el modelo, del total de agua concesionada en cada Unidad Hidrológica, solamente se retorna a la cuenca el 80% (recomendado por el RAS) y se consume efectivamente el 20%.

7.3 Representación de procesos hidrológicos en la cuenca del río Apulo

7.3.1 Topología del modelo

La topología del modelo corresponde a la representación de los principales elementos que conforman la cuenca. De acuerdo con la zonificación de la cuenca, se identifican dos principales cuerpos de agua: El río Curí y el Río Apulo, para los cuales se determinarán dos subcuencas para las cuales se agregarán los elementos que representa WEAP como se muestra en la Figura 17.

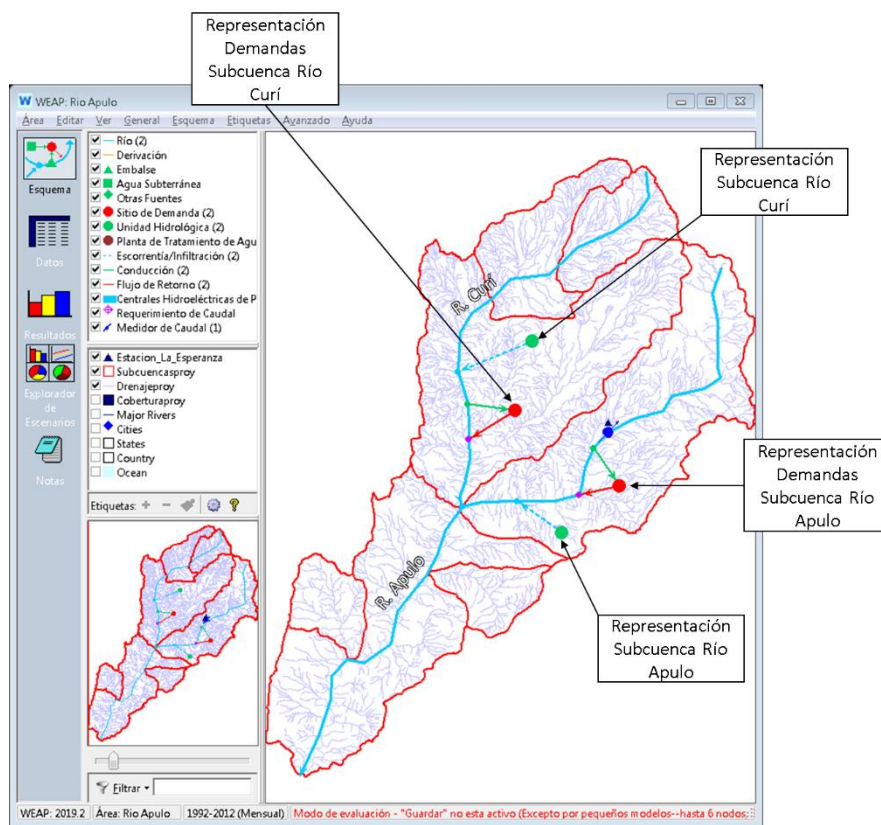


Figura 17 Representación topológica de la cuenca del río Apulo

7.3.2 Selección del modelo hidrológico

Para representar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Apulo se empleó el modelo de coeficiente simplificado para representar el proceso lluvia – escorrentía teniendo en cuenta que es un modelo que tiene pocos parámetros comparado con el modelo de humedad del suelo que tiene WEAP.

Adicionalmente, al tener en consideración la pobre instrumentación hidrológica que permita calibrar el modelo, se consideró oportuno emplear la metodología más sencilla con que cuenta WEAP para realizar la representación de su comportamiento hidrológico.

7.3.3 Calibración

Para la calibración del modelo, al emplear la estación La Esperanza, se delimitó el área de aporte al sitio de ubicación de la estación, el área delimitada se muestra en la Figura 18.

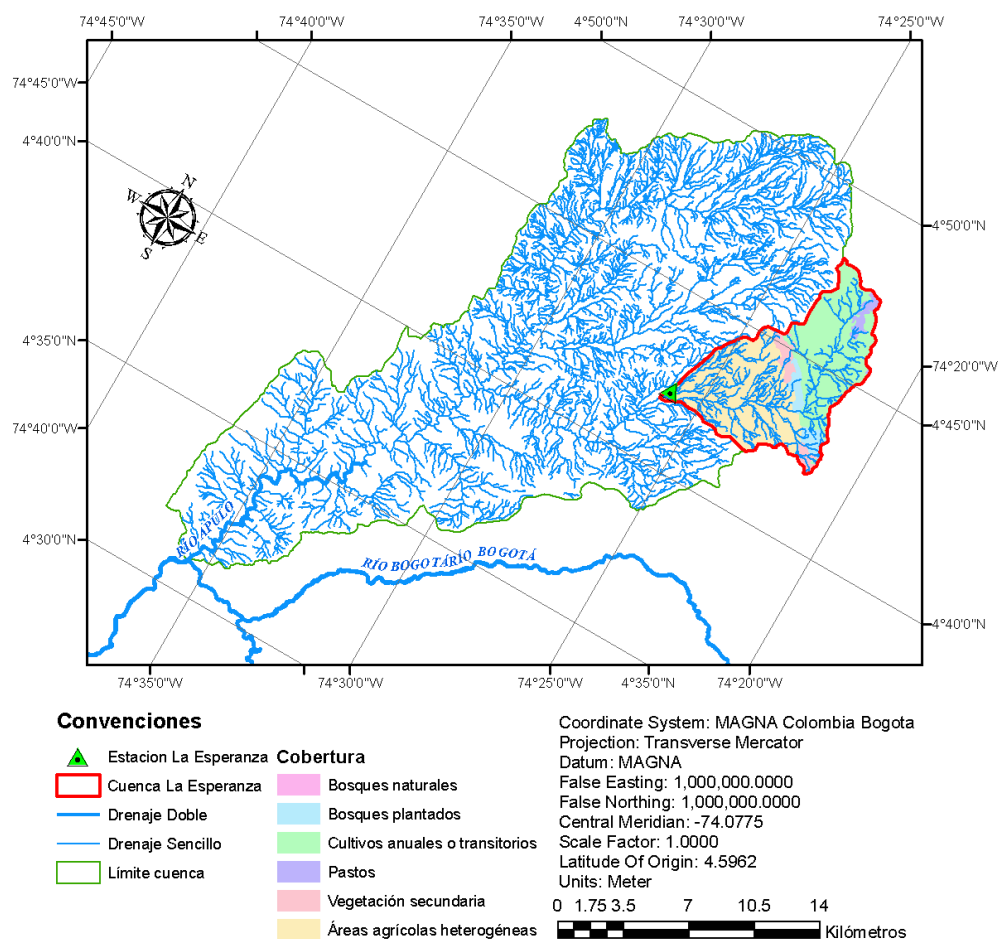


Figura 18 Delimitación de la subcuenca a partir de la estación La Esperanza

El área de la subcuenca formada es de 59.4km², los cuales se distribuyen en las coberturas señaladas en la Tabla 17, tomadas del mapa de coberturas empleado para el trabajo:

Tabla 17 Área que representa cada cobertura en la subcuenca La Esperanza

Cobertura	Área (km ²)
Áreas agrícolas heterogéneas	28.36
Bosques naturales	0.09
Bosques plantados	2.84
Cultivos anuales o transitorios	24.00
Pastos	1.50
Vegetación secundaria	2.69

Como periodo de calibración del modelo se tomó del año 1992 al 2007 y se utilizó la metodología PEST (Parameter ESTimation).

Tras realizar la calibración del modelo se obtuvo la serie de caudales señalada en la Figura 19 cuyo desempeño en P-Bias se obtuvo en el 3% y NSE de 0.87 los cuales se consideran resultados muy buenos para el desempeño del modelo.

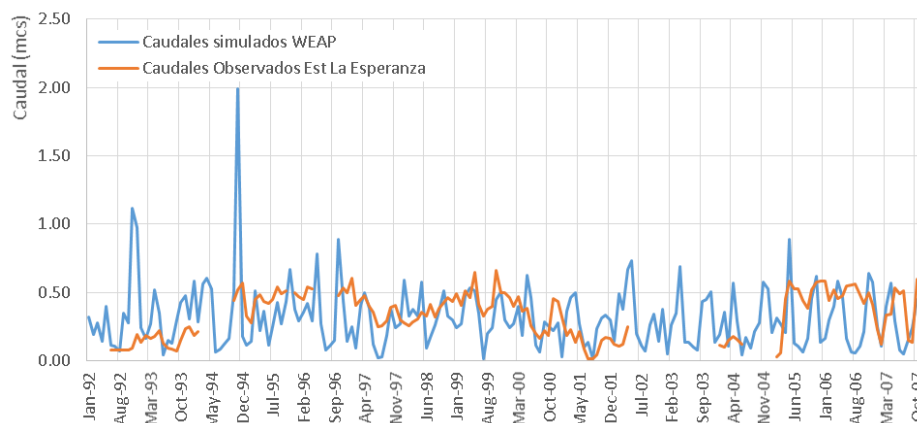


Figura 19 Serie de caudales simulada en el modelo WEAP tras la calibración del modelo

Los parámetros resultantes de la calibración del modelo fueron:

Tabla 18 Resultados de la calibración del modelo

Cobertura	Área (km2)	Coefficiente de cultivo	Precipitación efectiva
Áreas agrícolas heterogéneas	28.36	1.50	100.00%
Bosques naturales	0.09	1.24	49.72%
Bosques plantados	2.84	1.50	62.53%
Cultivos anuales o transitorios	24.00	1.50	100.00%
Pastos	1.50	0.01	11.63%
Vegetación secundaria	2.69	1.05	61.12%

7.3.4 Validación

Para la validación del desempeño del modelo se utilizó el periodo comprendido entre el año 2008 y el 2012, y la evaluación del mismo se realizó empleando los parámetros definidos en la Tabla 18. Las series resultantes se muestran en la Figura 20 cuyo PBIAS resultó en el -5% y el coeficiente NSE en 0.88 manteniendo buenos resultados de la modelación.

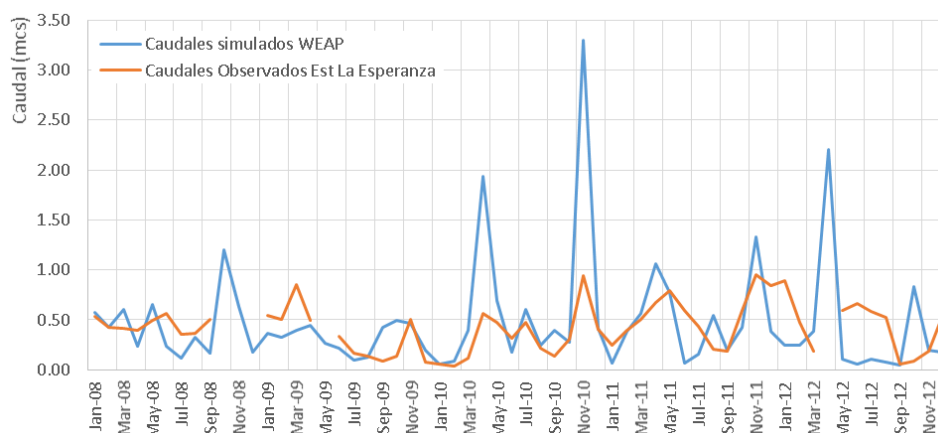


Figura 20 Serie de caudales simulada en el modelo WEAP tras la validación del modelo

7.3.5 Simulación de escenarios

Obtenidos los parámetros de calibración del modelo se realizaron simulaciones para visualizar el comportamiento de los caudales en la cuenca a partir de cambios en las coberturas del suelo. Los escenarios analizados fueron:

7.3.5.1 Escenario 1 Aumento en las áreas agrícolas heterogéneas

Se consideró un aumento del 10% en las áreas agrícolas heterogéneas disminuyendo en este mismo porcentaje la cobertura de pastos de la cuenca. Los resultados de los caudales modelados para este escenario se muestran en la Figura 21 donde se evidencia que esta alteración disminuiría los caudales de la cuenca en hasta el 32% de los caudales de la línea base.

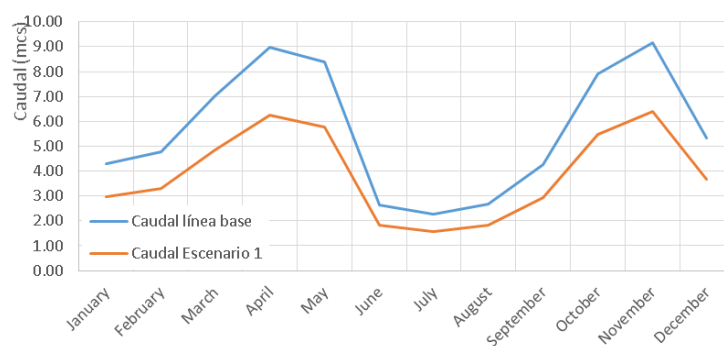


Figura 21 Alteración en la generación de caudales para el escenario 1

7.3.5.2 Escenario 2 Aumento en las áreas urbanas

Se consideró un aumento del 10% en las áreas urbanas disminuyendo en este mismo porcentaje la cobertura de pastos de la cuenca. Los resultados de los caudales modelados para este escenario se muestran en la Figura 22 donde se evidencia que al igual que en el escenario anterior, la alteración disminuiría los caudales generados en la cuenca en hasta el 22% respecto al caudal de la línea base.

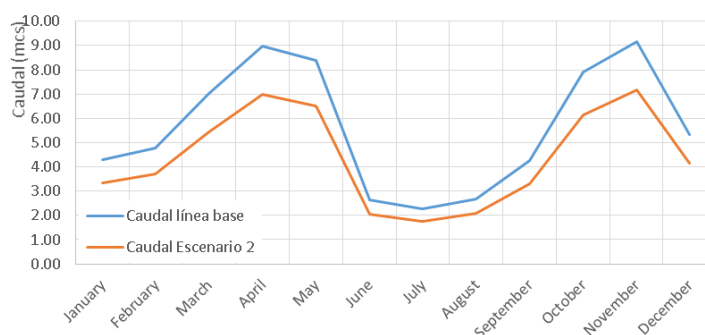


Figura 22 Alteración en la generación de caudales para el escenario 2

7.3.5.3 Escenario 3 Aumento en las áreas de bosques plantados

Se consideró un aumento del 10% en las áreas de bosques plantados disminuyendo en este mismo porcentaje la cobertura de pastos de la cuenca. Los resultados de los caudales modelados para este escenario se muestran en la Figura 23 donde se evidencia que al igual que los dos escenarios anteriores, la alteración disminuiría los caudales generados en la cuenca en hasta el 23% del caudal generado en la línea base.

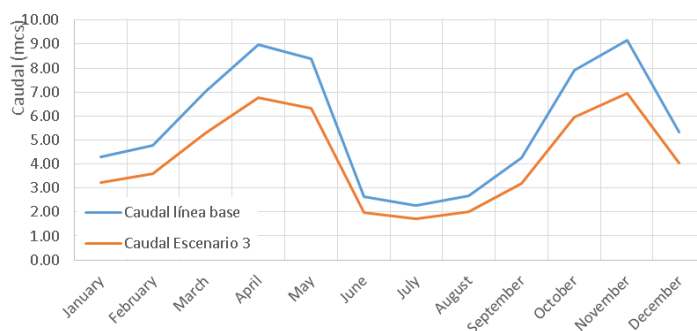


Figura 23 Alteración en la generación de caudales para el escenario 3

7.3.5.4 Análisis de los resultados

A partir de los escenarios representados para el cambio de usos del suelo en la cuenca se compilaron en la Figura 24 los caudales resultantes de los diferentes escenarios.

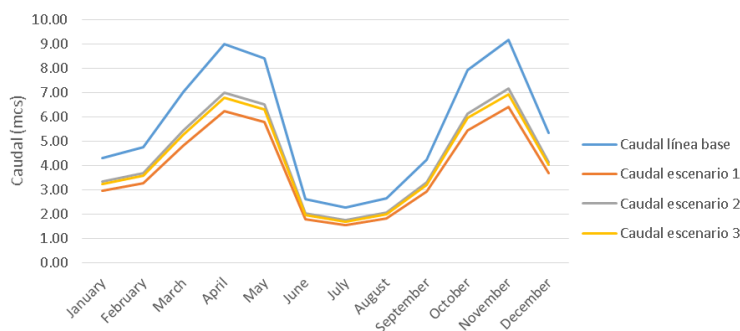


Figura 24 Comparativo de las alteraciones en caudales para los diferentes escenarios

Como puede evidenciarse en los tres escenarios se tiene una disminución de los caudales resultantes en la cuenca, siendo el escenario más desfavorable el de aumento de las áreas agrícolas heterogéneas (disminución de los caudales en el 32% respecto a la línea base) y el menos el de aumento de áreas urbanas (disminución de los caudales en el 22% respecto a la línea base).

Estos resultados pueden obedecer a una respuesta de la modelación matemática y no obedecerían necesariamente al comportamiento físico e hidrológico de la cuenca, dado que los resultados de los parámetros de coeficiente de cultivo y de precipitación efectiva demuestran una necesidad imperiosa del modelo para generar escorrentía, teniendo en cuenta que para las dos coberturas principales (áreas agrícolas heterogéneas y pastos) los valores de estos parámetros fueron los del límite superior, lo que puede obedecer a altas demandas de evapotranspiración en la cuenca.

8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Conclusiones

El modelo empleado para la representación de la cuenca del río Apulo en el software WEAP, contempló un balance entre la precipitación efectiva por cada tipo de cobertura, la evapotranspiración calculada como el producto del coeficiente de cultivo por la evapotranspiración de referencia la cual se calculó a partir de datos de temperatura de la cuenca usando la ecuación de Hargreaves, y las demandas de agua de la cuenca

Para la modelación de la cuenca, se realizó un proceso de calibración y validación a partir de los datos observados de la estación La Esperanza ubicada en la cuenca alta del río Apulo en el periodo de 1992 a 2012, utilizando el módulo PEST integrado en el software WEAP.

Los resultados del proceso de calibración y validación fueron aceptables en términos de los resultados de las funciones objetivo, representados por los resultados del coeficiente PBIAS del 3% y NSE de 0.87 para la calibración, y para la validación un PBIAS del -5% teniendo en cuenta que el modelo sobreestimó los caudales comparado con las observaciones de la estación y NSE de 0.86 lo cual continúa representando un buen desempeño.

A partir de los parámetros obtenidos para el modelo, se realizó la simulación mediante cambios de coberturas del suelo planteando tres escenarios diferentes: aumento de áreas agrícolas heterogéneas, aumento de áreas urbanas y aumento de áreas de bosques plantados. Para cada uno de los escenarios se supuso un aumento en el 10% del área disminuyéndolo en la cobertura de pastos, al ser la mayor cobertura de la cuenca.

Como resultado de la modelación se evidenció que en los tres escenarios se tiene una disminución de los caudales resultantes en la cuenca, siendo el escenario más desfavorable el de aumento de las áreas agrícolas heterogéneas (disminución de los caudales en el 32% respecto a la línea base) y el menos el de aumento de áreas urbanas (disminución de los caudales en el 22% respecto a la línea base), lo que puede obedecer a una respuesta de la modelación matemática y no al comportamiento físico e hidrológico de la cuenca, dado que los resultados de los parámetros de coeficiente de cultivo y de precipitación efectiva demuestran una necesidad imperiosa del modelo para generar esorrentía, teniendo en cuenta que para las dos coberturas principales (áreas agrícolas heterogéneas y pastos) los valores de estos parámetros fueron los del límite superior, lo que puede obedecer a altas demandas de evapotranspiración en la cuenca.

8.2 Recomendaciones

Se considera WEAP como una herramienta de fácil uso y con complementos útiles al momento de realizar modelación hidrológica como la posibilidad de incluir demandas del recurso hídrico y los módulos de calibración que tiene integrados. Sin embargo es necesario contar con buenas fuentes de información que permitan alimentar al modelo, como es el caso de mayores fuentes de información climática para la estimación de la evapotranspiración mediante métodos más robustos y más aceptados como la ecuación de Penman Montheit (FAO, 2006) y mejores registros en las estaciones hidrológicas para obtener series que permitan optimizar la calibración del modelo.

La modelación en WEAP de la cuenca del río Apulo puede mejorarse complementando con fuentes de información satelital para la obtención de una mejor estimación de la evapotranspiración y la implementación de estaciones hidrológicas en más sitios de la cuenca que permitan tener diferentes puntos de calibración.

La implementación de la herramienta en la cuenca demostró su utilidad para la gestión integral de los recursos hídricos, la cual podría llegar a ser implementada en entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales, de manera que se pueda simular la respuesta de las cuencas hidrográficas a cambios, no sólo en el uso del suelo, sino en las demandas del recurso hídrico, y así validar la información que presenten estudios hidrológicos para intervenciones en los cuerpos de agua y/o las gestiones territoriales que se adelanten en los municipios.

9. Bibliografía

- Blöschl, G., Sivalapan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (2013). *Runoff prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bruinjeel, L. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agric. Ecosyst. Environ.* vol. 104, 185-228.
- Cabeza, A. (2006). *Políticas latinoamericanas de ordenamiento territorial. Procesos de ordenamiento en América Latina y Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- CAR - Planeación Ecológica Ltda. - Ecoforest Ltda. (2006). *Elaboración de Diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca Hidrográfica del río Bogotá*. Bogotá.
- CCG - SEI. (2009). *Guía Metodológica - Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el modelo WEAP*. Santiago: Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute.
- FAO. (2006). Evapotranspiración de cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Estudio FAO Riego y Drenaje*.
- Harris, N. M., Gurnell, D. M., Hannah, D. M., & Petts, G. E. (2000). Classification of river regimes: a context for hydro-ecology. *Hydrological Processes*(14(16-17)), 2831-2848.
- IDEAM. (2002). Perfil del estado de los recursos y del medio ambiente en Colombia 2001. En IDEAM, *Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC* (pág. Tomo 3). Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2004). *Zonificación y codificación de cuencas hidrográficas en Colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- MinAmbiente - MinHacienda - Corporinoquía - CAR - Corpoguavio - Fondo de Adaptación - Consorcio Huitaca. (2019). *Ajuste al Plan de Ordenación y Manejo de la cuenca del río Bogotá*. Bogotá.
- MinAmbiente. (2014). *Guía para la formulación de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCAS)*. Bogotá: Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible.
- Ocampo, O., & Vélez, J. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol 13 No. 24, 43-58.
- ONU. (2013). *Objetivos de Desarrollo del Milenio: informe 2013*. Nueva York: Organización de las Naciones Unidas.

- Sauquet, E., Gottschalk, L., & Krasovskaia, I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrology Research*(39(5-6)), 406. doi:10.2166/nh.2008.331
- Stockholm Environment Institute. (20 de noviembre de 2019). *WEAP (Water Evaluation and Planning)*. Obtenido de <https://www.weap21.org/index.asp?action=200>
- UC-SEI. (2009). *Guía metodológica - modelación hidrológica y de recursos hídricos con el modelo WEAP*. Santiago, Boston: Centro de cambio Global - Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute.
- WWAP. (2006). *2nd Edition of the UN World Water Development Report: water a shared responsibility*. France: UNESCO.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 - A demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. *Water International*, 30(4), 487-500.
- Zamudio, C. (2012). Gobernabilidad sobre el recurso hídrico en Colombia: Entre avances y retos. *Gestión y Ambiente*, 99-112.