



**Análisis de los impactos del cambio climático sobre los caudales de la parte alta de la  
cuenca del río Magdalena**

John Sebastian Bacca Bolaños

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesores

Santiago Valencia Cárdenas, MSc en Ingeniería Ambiental

Juan Fernando Salazar Villegas, Doctor (PhD) Profesor asociado

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

<b>Cita</b>	(Bacca-Bolaños et al, 2023)
<b>Referencia</b>	Bacca-Bolaños,J.,Valencia,S., & Salazar,J.F. (2023). <i>Análisis de los impactos del cambio climático sobre los caudales de la parte alta de la cuenca del río Magdalena</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Grupo de Investigación

El Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental - GIGA



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Julio César Saldarriaga Molina

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.



## **Dedicatoria**

Este trabajo va dedicado a mi mamá Francesca, mi abuela Esperanza, a mi tío Juan, Yamid y en general a toda mi familia materna, quienes han estado presentes en todo este proceso y me han apoyado siempre.

## **Agradecimientos**

Agradezco enormemente a Santiago Valencia y Juan Fernando Salazar por la disposición, paciencia y guianza durante la elaboración de mi trabajo de grado, de igual manera al Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental – GIGA. Este trabajo fue financiado por MINCIENCIAS a través del Programa de Investigación “SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS ECOLÓGICOS Y SOCIALES EN LA CUENCA MAGDALENA-CAUCA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y PÉRDIDA DE BOSQUES” (Código: 1115-852-70719) con fondos del «PATRIMONIO AUTÓNOMO FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS».

## **Tabla de contenido**

### **Contenido**

Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	11
2 Objetivos	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 Marco teórico	13
4 Metodología	18
5 Resultados	25
6 Conclusiones	31
Referencias	33
Anexos	37

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Descripción de fuentes de información que se emplearán en el trabajo.	21
<b>Tabla 2.</b> Descripción de coberturas del suelo para la parte alta de la cuenca del río Magdalena y su homologación con las coberturas del modelo SWAT.	22
<b>Tabla 3.</b> Parámetros empleados en la calibración de LAI	23
<b>Tabla 4.</b> Parámetros más sensibles obtenidos en la calibración del modelo SWAT para la cuenca, y el valor óptimo después de la calibración	26

## Lista de figuras

- Figura 1.** Esquema balance hídrico y partición del flujo en el modelo SWAT (Soil Water and Assessment Tool). Tomada de Castelli et al. (2017) 15
- Figura 2.** Ubicación del área de estudio, incluyendo la estación de aforo, las estaciones climatológicas y la red de drenaje. (a) mapa de Colombia, (b) mapa del Huila con ubicación de la cuenca, (c) cuenca de la parte alta del río Magdalena, (d) mapa de tipos de suelo y (e) mapa de coberturas 20
- Figura 3.** Caudales mensuales observados y simulados para los periodos de calibración (2003 - 2014) y validación (1994 - 2002). Donde NSE es el coeficiente Nash Sutcliffe efficiency, R<sup>2</sup> es el coeficiente de determinación y PBIAS es el porcentaje de sesgo. 28
- Figura 4.** Ciclo medio anual de los deltas de precipitación para los cuatro modelos estudiados y escenarios (SSP 2-4.5 y SSP5-8.5) para mitad (2040-2060) y finales (2080-2100) de siglo . Valores mayores a 1 indican aumentos en la precipitación futura respecto al periodo histórico mientras que, valores menores a 1 indican disminuciones. 29
- Figura 5.** Ciclo medio anual de los deltas de temperatura máxima para los cuatro modelos estudiados y escenarios (SSP 2-4.5 y SSP5-8.5) para mitad (2040-2060) y finales (2080-2100) de siglo. Valores mayores a 1 indican aumentos en la precipitación futura respecto al periodo histórico mientras que, valores menores a 1 indican disminuciones. 29
- Figura 6.** Ciclo medio anual de los deltas de temperatura mínima para los cuatro modelos estudiados y escenarios (SSP 2-4.5 y SSP5-8.5) para mitad (2040-2060) y finales (2080-2100) de siglo. Valores mayores a 1 indican aumentos en la precipitación futura respecto al periodo histórico mientras que, valores menores a 1 indican disminuciones. 30
- Figura 7.** Caudales simulados para el periodo histórico (1994-2014), mediados (2040-2060) y finales (2080 -2100) de siglo bajo los escenarios SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5 con los modelos EC-Earth3-Veg y Fgoals-g3. 31
- Figura 8.** Anomalías en los caudales mensuales para mediados (2040-2060) y finales (2080-2100) respecto al periodo histórico (1994-2014) para los escenarios SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5 con los modelos EC-Earth3-Veg y Fgoals-g3. 31

## **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>ARS</b>	Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos
<b>CHIRTS</b>	Climate Hazards Center Infrared Temperature with Stations
<b>CHIRPS</b>	Climate Hazards Group Infrared Precipitation combined with station data
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>IPCC</b>	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
<b>Km</b>	Kilómetros
<b>Km<sup>2</sup></b>	Kilómetros cuadrados
<b>Mm</b>	Milímetros
<b>MSc</b>	Magister Scientiae
<b>NSE</b>	Nash Sutcliffe efficiency
<b>PBIAS</b>	Porcentaje de sesgo (Percent BIAS)
<b>PhD</b>	Philosophiae Doctor
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficiente de determinación
<b>RCP</b>	Representative Concentration Pathways
<b>SWAT</b>	Soil and Water Assessment Tool
<b>SWAT-CUP</b>	SWAT Calibration and Uncertainty Programs
<b>SSP</b>	Shared Socioeconomic Pathways
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia

## **Resumen**

El análisis de los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua es clave para la gestión del recurso hídrico y el uso del suelo, especialmente en cuencas estratégicas para el abastecimiento de agua y generación de energía hidroeléctrica. Un ejemplo de este tipo de cuencas es la parte alta de la cuenca del río Magdalena localizada al sur del departamento del Huila. La cuenca tiene un área de aproximadamente 5600 km<sup>2</sup> y elevaciones entre los 718 y 4353 m.s.n.m. Esta cuenca abastece de agua a las poblaciones locales y al embalse El Quimbo, lo cual resalta la importancia de evaluar cómo podrían cambiar los caudales futuros de la cuenca ante escenarios futuros de cambio climático. En este estudio, se evalúan los caudales de la parte alta de la cuenca del río Magdalena bajo escenarios de cambio climático para mediados (2040-2060) y finales de siglo (2080-2100) mediante del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT). En particular, se empleó la versión adaptada denominada SWAT-Tb, para las trayectorias SSP2-4.5 y SPP5-8.5 del Panel Intergumental de Cambio Climático (IPCC). Los caudales de la cuenca presentan los mayores cambios, para finales de siglo bajo el escenario SSP5-8.5. Los resultados de este estudio tienen el potencial de ser empleados en el desarrollo de nuevas políticas de gestión y manejo del recurso hídrico en la parte alta de la cuenca del río Magdalena. Además, es de utilidad para el planteamiento de futuros estudios para analizar el impacto del cambio climático en cuencas estratégicas.

*Palabras clave:* cambio climático, caudales, SWAT, IPCC, cuenca del río Magdalena

## **Abstract**

The analysis of climate change impacts on water availability is key for water resource and land use management, especially in strategic watersheds for water supply and hydroelectric power generation. An example of this type of watershed is the upper part of the Magdalena river basin located in the south of the department of Huila. The watershed has an area of approximately 5600 km<sup>2</sup> and elevations between 718 and 4353 meters above sea level. This watershed supplies water to local populations and to the El Quimbo reservoir, which highlights the importance of assessing how future flows in the watershed could change under future climate change scenarios. In this study, flows in the upper Magdalena river basin are evaluated under climate change scenarios for the mid (2040-2060) and end of the century (2080-2100) using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. In particular, the adapted version called SWAT-Tb was used for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) SSP2-4.5 and SPP5-8.5 trajectories. The basin flows show the largest changes by the end of the century under the SSP5-8.5 scenario. The results of this study have the potential to be used in the development of new water resource management policies in the upper Magdalena river basin. In addition, it is useful for future studies to analyze the impact of climate change in strategic basins.

*Keywords:* climate change, flow rates, SWAT, IPCC, Magdalena river basin

## 1. Introducción

Las dinámicas de los caudales en las cuencas pueden verse alteradas por factores como el cambio climático (Risal et al., 2020; Alizadeh et al., 2022), desencadenando modificaciones en la temperatura, la ocurrencia de las precipitaciones, entre otras, generando lluvias extremas o periodos de sequías, que podrían intensificarse a futuro, lo cual tendrá un impacto directo en la evapotranspiración, en la calidad y cantidad de los componentes del balance hídrico (Barnett et al., 2005), por ende modificando los caudales y la disponibilidad de agua para actividades que dependen de ellos como la agricultura, la industria y el desarrollo urbano (Legesse et al. 2015). Es importante evaluar el impacto del cambio climático. Para este fin existen herramientas especializadas como son los modelos hidrológicos, que permiten simular los caudales bajo diferentes escenarios de cambio climático.

Para cuantificar los impactos en la dinámica del recurso hídrico, generados por el cambio climático se han desarrollado herramientas computacionales como lo son los modelos hidrológicos que a día de hoy son ampliamente usados alrededor del mundo, ya que poseen capacidades para el manejo de los recursos hídricos y para el desarrollo de políticas de manejo del recurso (Valencia et al., 2019; Viviroli et al., 2011). Los estudios del impacto climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos son escasos debido a que la información hidroclimatológica para regiones tropicales es limitada (Viviroli et al., 2011).

Los modelos hidrológicos son herramientas ampliamente utilizadas para predecir la respuesta de la cuenca ante cambios en la cobertura, el clima o ambos. Tienen la capacidad de simular escenarios, dentro de los cuales se agregan diferentes modificaciones como por ejemplo aumentos o disminuciones en la temperatura del aire, con el fin de cuantificar, comparar y evaluar cómo será la respuesta de una cuenca ante dichas modificaciones. En la actualidad, los modelos son una herramienta importante para la gestión de recursos hídricos y medio ambientales (Devia et al., 2015).

El modelo SWAT es un modelo semidistribuido basado en procesos físicos desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS, por sus siglas en inglés; Arnold et al., 2012). SWAT es uno de los modelos más empleados para evaluar los efectos de alternativas de manejo sobre los recursos hídricos y la contaminación de fuentes difusas en las grandes cuencas hidrográficas (Neitsch et al., 2011). Alrededor del mundo se han desarrollado,

por ejemplo, estudios de los cambios en el uso del suelo y la variabilidad climática en la hidrología de la cuenca del río Muriaé en Brasil (Gomes et al., 2021), o como en el estudio de Song et al. (2022) donde se evalúan las diferencias entre la simulación de escorrentía de dos modelos en la cuenca del río Yeongsan ubicada en la región suroeste de Corea del Sur. En Colombia este modelo se ha utilizado en diversos estudios (Tapasco et al., 2015; Uribe et al., 2018; 2020). Por ejemplo, Hoyos et al. (2019) en una cuenca montañosa de la Sierra Nevada de Santa Marta analizó las respuestas de caudal a sequías meteorológicas donde el modelo se utilizó para predecir el rendimiento de agua de diferentes coberturas terrestres. Por otro lado, Villamizar et al. (2019) simuló el impacto de diferentes escenarios de cambio climático y de cambios de cobertura del suelo sobre la cuenca del Tona.

En Colombia, sobre la cuenca del río Magdalena se concentra cerca del 77% de la población del país, y es estratégica para la seguridad hídrica y energética de la región, la generación de energía hidroeléctrica y gran parte de la producción agrícola. Lo anterior ha generado cambios en la cobertura de la cuenca (Angarita, 2018; García-Leoz et al., 2018). Lo cual tiene un efecto directo en la hidrología de la cuenca provocando afectaciones y en otros aspectos como pérdidas de conectividad longitudinal de hábitats de peces y la disminución de transporte de sedimentos. Existen pocos estudios y un vacío de información para la asignación de recursos hídricos y se requieren estimaciones confiables al ser tan importante por su aporte hídrico en Colombia (Elgamal et al., 2017), de acuerdo con el informe AR6 del IPCC, con respecto a crecidas de ríos y afectaciones en los caudales, en el Cauca y Magdalena en Colombia (Hoyos et al., 2013; Ávila et al., 2019) se han registrado inundaciones récord, también se menciona que, del estudio Carmona y Poveda (2014) las tendencias de sequía en Colombia son bajas. Sin embargo, según Pabón-Caicedo et al. (2020) continúa existiendo una incertidumbre para la extensión de los Andes (Climate Change 2021: The Physical Science Basis, s. f.). Por estos motivos para la gestión y conservación de los recursos hídricos es necesario cuantificar los impactos asociados a estos factores (Anderson et al., 2017).

En este trabajo, se analiza el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua de la parte alta de la cuenca del río Magdalena. Para esto se simulará el balance hídrico de la cuenca empleando el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) en escenarios que incluirán las proyecciones de cambio climático del IPCC de los modelos climáticos globales

EC-Earth3-Veg y FGOALS-g3 para las trayectorias SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para mediados (2040-2060) y finales (2080-2100) de siglo.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Analizar la disponibilidad de agua en la parte alta de la cuenca del río Magdalena en escenarios de cambio climático

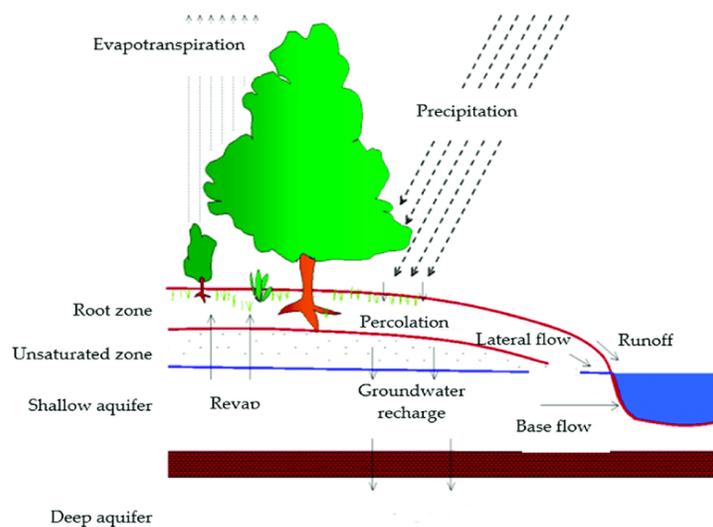
### **2.2 Objetivos específicos**

- Calibrar y validar el modelo SWAT para la cuenca.
- Plantear escenarios de cambio climático para la cuenca.
- Simular el balance hídrico de la cuenca bajo los distintos escenarios propuestos con el modelo SWAT.
- Discutir los efectos de diferentes escenarios de cambio climático sobre la disponibilidad de agua de la cuenca.

### 3 Marco teórico

El desarrollo de los modelos hidrológicos se da en todo el mundo para medir el impacto del clima y las propiedades del suelo en la hidrología y los recursos hídricos. como por ejemplo un modelo de escorrentía se puede expresar como un conjunto de ecuaciones que ayudan a estimar la escorrentía en función de varios parámetros utilizados para describir las características de la cuenca. Algunos modelos más utilizados para este campo incluyen herramientas como son: el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity model; (Liang et al., 1994)), HBV (Hydrologiska Byrans Vattenavdelning; Bergström et al., 1976), MIKE SHE (Systeme Hydrologique; Refsgaard et al., 1995). y SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998) (Devia et al., 2015, Sorooshian et al., 2008).

En particular, SWAT es un modelo desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS, por sus siglas inglés; Arnold et al., 2012) para predecir los impactos de las prácticas de manejo del suelo sobre el agua, rendimientos químicos y estimación de sedimentos en grandes cuencas con diferentes tipos y usos de suelo en el sector de la agricultura, para largos periodos de tiempo. Es un modelo semi-distribuido basado en procesos físicos para evaluar los efectos del manejo de alternativas sobre los recursos hídricos y la contaminación de fuentes difusas en las grandes cuencas hidrográficas (Neitsch et al., 2011).



**Figura 1.** Esquema balance hídrico y partición del flujo en el modelo SWAT (Soil Water and Assessment Tool). Tomada de Castelli et al. (2017)

El modelo se basa de la siguiente ecuación de balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

Donde

$SW_t$ : contenido final de agua en el suelo (mm),

$SW_0$ : contenido inicial de agua en el suelo (mm),

$R_i$ : precipitación (mm),

$Q_i$ : escorrentía (mm)

$ET_i$ : evapotranspiración (mm)

$P_i$ : percolación (mm)

$QR_i$ : es el flujo de retorno (mm) y  $t$  es el tiempo (días).

El modelo SWAT tiene la capacidad de simular la evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración flujo lateral, flujo de retorno, drenaje, pérdidas de transmisión y agua almacenada en el perfil del suelo (Arnold et al., 2012). Se ha hecho uso de esa herramienta en el país en algunas cuencas de Cundinamarca, del Valle del Cauca, Cesar, entre otras. Con el fin de estimar los efectos del cambio climático y efectos de cambios en el uso del suelo sobre la oferta hídrica y la producción de sedimentos, de igual manera en campos como la agricultura, hidroeléctricas y el abastecimiento humano (Uribe, 2009; Uribe y Valencia, 2010; Tapasco et al., 2015; Barbudo et al., 2016).

La información de entrada del modelo incluye los registros diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, las características del tipo suelo, coberturas. Los modelos presentan incertidumbres en sus simulaciones debido a la información de entrada, ya que las bases de datos pueden presentar errores en las mediciones, por otro lado, presentan limitaciones en la simulación de procesos físicos en algunas condiciones ambientales y por la incertidumbre en la estimación de sus parámetros (tapasco et al. 2020). Para disminuir limitaciones e incertidumbres se realizan los procesos de calibración y validación de modelos, en el proceso de

calibración se ajustan y modifican parámetros del modelo para que los caudales simulados coincidan con los datos observados. Con la validación se determina la exactitud que tuvo el modelo o simulación en representación de los datos observados (Vilaysane et al., 2015).

### **3.1 Representación de la dinámica de la vegetación**

El modelo SWAT simula el crecimiento de la vegetación basado en el modelo EPIC (Williams et al.1989) desarrollado para regiones templadas (Arnold et al., 2012). En este sentido, múltiples estudios han resaltado que el modelo presenta limitaciones a la hora de simular los ciclos de crecimiento estacional de los árboles y la vegetación perenne en los trópicos representado a través del Índice de Área Foliar (LAI por su sigla en inglés;Wagner et al., 2011). Por esta razón, se han propuesto versiones adaptadas del modelo SWAT que lograr capturar mejor la estacionalidad del LAI en regiones tropicales (Haas et al., 2022; Ma et al., 2019; Strauch & Volk, 2013). En particular, Alemayehu et al. (2017) desarrolló una versión del modelo denominada SWAT-T que mejora la simulación del LAI y, por tanto, la simulación de la evapotranspiración, la escorrentía y los caudales. Para este estudio se empleó la versión SWAT-Tb desarrollada por Valencia et al. (2021) modificando SWAT-T. SWAT-Tb tiene una mejor representación de la estacionalidad bimodal del LAI que puede presentarse en regiones tropicales.

### **3.3 Escenarios de cambio climático**

Los escenarios desarrollados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por su sigla en inglés) permiten el análisis de los impactos del cambio climático futuro para el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación (Pedersen et al., 2022). Estos escenarios son un conjunto de trayectorias de concentración y emisiones de gases de efecto invernadero diseñadas para apoyar la investigación sobre los impactos y las posibles respuestas políticas al cambio climático, contaminantes del aire, aerosoles, y uso futuro de la tierra (Pedersen et al., 2022; Riahi et al., 2017). Esta información ha sido ampliamente utilizada también para estudiar, por ejemplo, respuestas hidrológicas al cambio climático (Kim et al., 2013; Ficklin et al., 2009; Moradkhani et al., 2010; Praskievicz y Chang, 2011; Tu, 2009; Yoshimura et al., 2009). Estas

trayectorias, fueron implementadas en el informe AR5 del IPCC, reciben el nombre de RCP (Representative Concentration Pathways, siglas en inglés), y se conforman de 4 escenarios los cuales son: RCP8.5 un escenario de emisiones altas, RCP6 como una línea de base media o un caso de mitigación alta, RCP4.5 puede considerarse como un escenario de mitigación intermedio, y RCP2.6 es el escenario de mitigación más bajos actualmente en la literatura (van Vuuren et al., 2011).

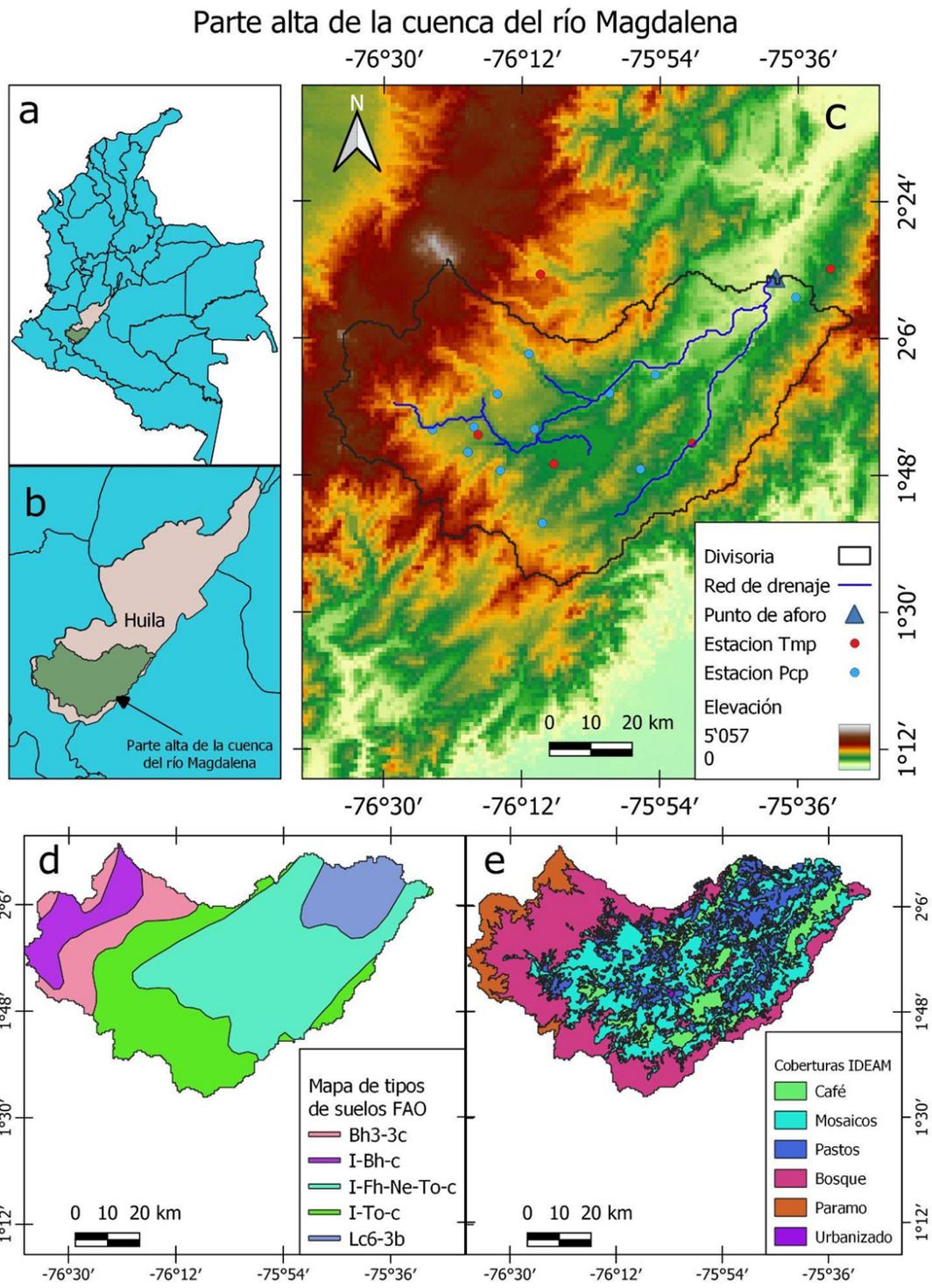
A través del tiempo los Informes de Evaluación del IPCC (AR) a las trayectorias creando así los nuevos escenarios, los SSP rutas socioeconómicas compartidas (The Shared Socioeconomic Pathways siglas en inglés) (Pedersen et al., 2022 ; Riahi et al., 2017) son la nueva generación de trayectorias implementadas en el último informe AR6, su función es cuantificar los desarrollos de energía, uso de la tierra y las incertidumbres asociadas a las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes del aire. Estos escenarios se diferencian de los anteriores ya que tienen en cuenta desarrollos socioeconómicos alternativos, incluido el desarrollo sostenible, la rivalidad regional, la desigualdad, el desarrollo basado en combustibles fósiles y el desarrollo intermedio, los 5 escenarios nuevos son: SSP1 de sostenibilidad consiste en tomar el camino verde, es decir bajos desafíos para la mitigación y la adaptación, SSP2 llamado a la mitad del camino que consiste en desafíos medianos para la mitigación y la adaptación, SSP3 de rivalidad regional consiste plantear un camino rocoso de grandes desafíos para la mitigación y la adaptación, SSP4 referente a la desigualdad plantea un camino dividido con bajos desafíos para la mitigación, altos desafíos para la adaptación y por último SSP5 que se basa en el desarrollo impulsado por combustibles fósiles: tomando la carretera es decir planteando grandes desafíos para la mitigación, bajos desafíos para la adaptación (Riahi et al., 2017).

Según estudios recientes los escenarios (SSP) tienen mejor desempeño, en la representación de la precipitación acumulada, que en los de la generación anterior (RCP), pero han presentado dificultades en la simulación de la temperatura sobre los Andes Colombianos donde los escenarios RCP lo realizan de manera más precisa (Arias et al., 2021; Ortega et al., 2021).

## 4 Metodología

### 4.1 Área de estudio

La parte alta de la cuenca del río Magdalena está situada en el sur del departamento del Huila, principalmente en jurisdicción de los municipios de Pitalito, Garzón, San Agustín y Acevedo (Figura 2). Su área es de 5673.24 km<sup>2</sup> con elevaciones entre los 718 y 4353 m.s.n.m. La cuenca se caracteriza por presentar una temperatura promedio entre los 16 °C y los 23 °C y una precipitación promedio anual de 1720 mm. Dado que la cuenca se encuentra dentro la región andina según el estudio de Urrea et al 2019, la cuenca presenta regímenes mixtos, bimodal y de manera más reducida unimodal (Gobernación del Huila y Unidad de Planificación Agropecuaria 2019; Urrea et al., 2019). En la cuenca predominan las actividades económicas asociadas al sector agropecuario, siendo el café y el frijol unos de sus principales productos, seguido de la actividad piscícola que presenta importantes desarrollos en el orden nacional. La cuenca hidrográfica posee áreas de carácter estratégico que tiene reconocimiento internacional al integrar la reserva de la Biósfera Cinturón Andino, declarado por la UNESCO en 1979; de igual manera hace parte de los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad global de la ecorregión de los Andes del norte de acuerdo con el WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza) (Pedroza et al., 2020; 2015). Alimenta al embalse el Quimbo, una central a pie de presa, con una capacidad instalada de 400 MW nominales, con la cual se estima que se puede alcanzar una generación media de energía del orden de 2216 GWh/año. El embalse tiene un volumen útil de 2601 hm<sup>3</sup> y un área inundada de 8250 ha. (PIS - Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo, 2021). Su principal función es garantizar la confiabilidad del suministro de energía, elevar la seguridad energética y la estabilidad del sistema eléctrico colombiano y aportar significativamente a la autosuficiencia energética de la Nación (El Quimbo | Enel Colombia, 2015).



**Figura 2.** Ubicación del área de estudio, incluyendo la estación de aforo, las estaciones climatológicas y la red de drenaje. (a) mapa de Colombia, (b) mapa del Huila con ubicación de la cuenca, (c) cuenca de la parte alta del río Magdalena, (d) mapa de tipos de de suelo y (d) mapa de coberturas

## 4.2 Datos

En este trabajo se emplea información hidroclimatológica, mapas de cobertura, mapas de tipos de suelo y modelos de elevación digital, la Tabla 1 presenta un resumen de la información utilizada. El DEM se emplea para delimitar la cuenca y las subcuencas. Los mapas de cobertura y tipo de suelo en combinación con el DEM permitirán definir las HRUs. Para esto será necesario definir una resolución espacial común entre el mapa de coberturas, suelos y el DEM. A partir de la información hidroclimatológica el periodo de estudio que se analiza es de 1994 a 2014. Se encontró un porcentaje del 5,7 % de datos faltantes para precipitación, en la estación Puente Balseadero [21040040] y de un 18.2% para datos de temperatura en la estación Santa Leticia [21055030]. Los datos faltantes se completan empleando las estimaciones de precipitación y temperatura de CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation combined with station data siglas en inglés; Funk et al., 2018) y CHIRTS (Climate Hazards Center Infrared Temperature with Stations siglas en inglés; Funk et al., 2019), respectivamente. Para la precipitación, cuando se presentaba un dato faltante para la estación Y y día X, este fue reemplazado por la estimación de CHIRPS para la correspondiente estación (Y) y fecha (X). En el caso de la temperatura, primero, se realizó una corrección de sesgos en los datos de CHIRTS. Para completar los datos faltantes de temperatura, se calculó un delta (ecuación 2) de manera mensual (J), siguiente a esto se suma al dato (Z) de la fecha (X) de CHIRTS (ecuación 3) y este nuevo dato reemplaza al faltante, el cual corresponde al dato (Z) de la fecha (X) faltante en escala diaria. Estas bases de datos se seleccionaron ya que cuentan con datos diarios para el periodo de estudio a una alta resolución. Además, Valencia et al. (en revisión) resalta que CHIRPS es uno de los productos globales de precipitación con mejor desempeño para Colombia. Los caudales se obtuvieron de la estación del IDEAM Puente Balseadero [21047010] para el periodo 1994-2014 con 0.51% de datos faltantes. Los mapas de coberturas y de tipos de suelo se obtuvieron del Sistema de información ambiental de Colombia y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (o más conocida como FAO siglas en inglés), respectivamente. Con esta información se simularán los caudales mensuales para la cuenca en el periodo seleccionado, en la Tabla 2 se muestran las coberturas presentes en la cuenca y su homologación con las que opera SWAT. Durante el desarrollo de este estudio se encontraron limitaciones en la obtención de datos ya que la información climatológica se presentaba incompleta para la mayoría de estaciones, por ese motivo se recurre a la complementación de datos con información de bases

de datos globales, los cuales también presentan incertidumbres. Por otro lado, por la extensión de la cuenca, es necesario hacer una simplificación tanto en los mapas de coberturas y de tipos de suelo lo cual representa una simplificación de la heterogeneidad de la cuenca.

$$(\Delta T = t_{(IDEAM(j))} - t_{(CHIRTS(j))}) \quad (2)$$

$$T\Delta(j, i) = T_{obs}(j, i) + \Delta T(j) \quad (3)$$

**Tabla 1.** Descripción de fuentes de información que se emplearán en el trabajo.

<b>Dato</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fuente</b>
Modelo de elevación digital (DEM)	Elevación del terreno con una resolución que se determinará durante el proyecto.	Shuttle Radar Topography Mission - NASA (NASA, 2015)
Mapa de tipos de suelo	El Mapa de Suelos Digitalizado del Mundo, a escala 1:5.000.000, está en la proyección Geográfica (Latitud - Longitud).	Food and Agriculture Organization (FAO, 2007)
Mapa de coberturas / usos del suelo	Mapa de ecosistemas continentales, marinos y costeros de Colombia 2017. Versión 2.1	Sistema de información ambiental de Colombia (SIAC, 2017)
Climatología	Registros diarios de precipitación y temperatura (máxima y mínima)	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)
		CHIRPS y CHIRTS (Funk et al., 2015; 2019)
Hidrología	Registros diarios de caudales para la cuenca	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)
Escenarios de cambio climático (precipitación y temperatura (mínima y máxima) para el periodo 1988-2100.	EC-Earth3-Veg (0.7° Lat x 0.7° Lon)	EC - Earth Consortium; Jungclaus et al.; Li (2019)

	FGOALS-g3 (2.025° Lat x 2° Lon)	Li et al., 2020; Pu et al., 2020

**Tabla 2.** Descripción de coberturas del suelo para la parte alta de la cuenca del río Magdalena y su homologación con las coberturas del modelo SWAT.

Cobertura	Descripción	Clasificación de SWAT
Agroecosistema cafetero	cultivos de café	COFF
Agroecosistema de mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Mosaico de cultivos y pastos	AGRL
Agroecosistema ganadero	Tierras ocupadas por pastizales con un porcentaje de cubrimiento mayor al 70% y con altos niveles tecnológicos	PAST
Bosque andino húmedo	Mosaico de múltiples bosques	FRST
Páramo	Vegetación de páramo	BROM
Territorio artificializado	Zonas urbanas	URMD

### 4.3 Calibración y validación del modelo SWAT

Se empleó QSWAT 1.4 para pre-procesar la información de entrada del modelo. La calibración del LAI se realizó de forma manual tomando como valores de referencia los reportados por la literatura (López-Ramírez et al., 2021; WOLF et al., 2011) (Tabla 3).

**Tabla 3.** *Parámetros empleados en la calibración de LAI*

Parámetro	Cobertura	LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
v__ALAI_MIN.plant.dat	COFF	4
v__BLAI.plant.dat	COFF	4
v__ALAI_MIN.plant.dat	AGRL	1.5
v__BLAI.plant.dat	AGRL	1.5
v__ALAI_MIN.plant.dat	PAST	1.5
v__BLAI.plant.dat	PAST	1.5
v__ALAI_MIN.plant.dat	BROM	2.5
v__BLAI.plant.dat	BROM	2.5
v__ALAI_MIN.plant.dat	FRST	4
v__BLAI.plant.dat	FRST	4

En el caso de los caudales, El proceso de calibración y validación se realizó empleando SWAT-CUP versión 5.1.6, (SWAT Calibration and Uncertainty Programs, por sus siglas en inglés; Abbaspour et al., 2013) con tres años de calentamiento. Inicialmente, se realizó un análisis de sensibilidad con 250 iteraciones y 19 parámetros (Tabla 1 del Material suplementario). Luego, usando los parámetros significativos ( $p < 0.05$ ) obtenidos en el paso anterior se emplearon para calibrar el modelo para el periodo 2003-2014 con 250 iteraciones. El NSE se usó como función objetivo. Finalmente, se realizó la validación del modelo donde se ajustaron los parámetros al valor ideal sugerido por SWAT-CUP. El desempeño de calibración y validación de los caudales se evaluó utilizando los estadísticos de prueba sugeridos por Moriasi et al. (2015), cómo el coeficiente Nash - Sutcliffe (NSE, por sus siglas en Inglés), el sesgo porcentual (PBIAS, por sus siglas en Inglés) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), los cuales se calculan mediante las ecuaciones 3, 4 y 5 mostradas a continuación.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{obs})} \quad (3)$$

$$PBIAS = 100 \left( \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i})} \right) \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) (Q_{sim,i} - Q_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{obs}) \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{sim})} \quad (5)$$

Donde:

$Q_{obs}$  es el valor del caudal observado para determinado mes,  $Q_{sim}$  es el valor del caudal simulado para determinado mes,  $N$  es el número de meses durante el periodo de interés o límite superior,  $i$  es el valor inicial o límite inferior.

#### 4.4 Re-escalamiento estadístico

La información necesaria para los escenarios de cambio climático se encuentra en una escala con un tamaño entre 100 a 300 km por grilla en comparación con el tamaño de la cuenca de la parte alta del río Magdalena. Esto hace necesario realizar un proceso de reducción de escala o re-escalamiento para tener una representación más detallada del área de estudio. Este proceso puede ser realizada de manera dinámica por medio de un modelo climático de mayor resolución o estadística en donde hay diversos métodos (Mizukami et al., 2016), para este estudio se utilizara el método Delta Change factor ya que se encontró en la revisión bibliográfica que es el más utilizado y simple para estudios hidrológicos.

Para procesar la información de los escenarios de cambio climático se utilizó el método de reducción de escala estadística llamado “Delta-Change factor”. Consiste en primer lugar, en calcular deltas de precipitación y temperatura (ecuaciones 6 y 7) los cuales indican los cambios que se presentan en las variables en el futuro. Estos se calculan a escala mensual ( $j$ ) y con la

información del escenario futuro (SSP5-8.5 y SSP2-4.5;  $P_{fut}(j)$  y  $T_{fut}(j)$ ), con respecto al experimento histórico de CMIP6 ( $P_{hist}(j)$  y  $T_{hist}(j)$ ) para el mismo periodo que la calibración y validación del modelo SWAT-Tb. En segundo lugar, los deltas obtenidos se aplican a los datos de las estaciones del IDEAM (Ecuación 8 y 9;  $P_{obs}(j, i)$  y  $T_{obs}(j, i)$ ), donde el delta del mes ( $\Delta p(j)$  y  $\Delta T(j)$ ) es aplicado a todos los datos diarios ( $i$ ) y el mes ( $j$ ) correspondiente (e.g. Sellami et al., 2016; Bajracharya et al., 2018).

$$\Delta p(j) = P_{fut}(j) \div P_{hist}(j) \quad (6)$$

$$\Delta T(j) = T_{fut}(j) - T_{hist}(j) \quad (7)$$

$$P\Delta(j, i) = P_{obs}(j, i) \times \Delta p(j) \quad (8)$$

$$T\Delta(j, i) = T_{obs}(j, i) + \Delta T(j) \quad (9)$$

Por último, habiendo calculado las series de precipitación y temperatura con los efectos del cambio climático, introduce esta información en el modelo calibrado, para obtener resultados del posible comportamiento de los caudales.

## 5 Resultados

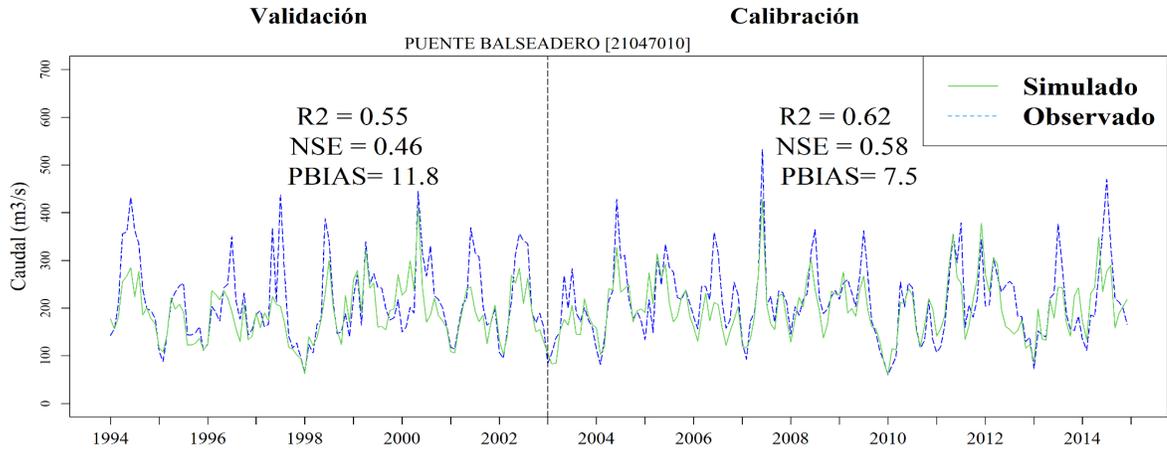
### 5.1 Calibración y validación

El análisis de sensibilidad de los caudales dio como resultado que 11 de los 19 parámetros seleccionados para el análisis fueron estadísticamente significativos ( $p < 0.05$ ) (Tabla 5). Los resultados obtenidos para los estadísticos de prueba, teniendo en cuenta los rangos de evaluación propuestos por Moriasi et al. (2015), indican que el modelo logra representar adecuadamente las dinámicas de la cuenca (Figura 3 y Tabla 2 del material suplementario). En particular, los resultados de la calibración (NSE=0.58, R2=0.62, PBIAS=7.5%) y validación (NSE=0.46, R2=0.55, PBIAS=11.8%) se encuentran dentro de las categorías de bueno y satisfactorio, respectivamente. Sin embargo, el modelo tiende a subestimar los caudales principalmente los

valores máximos en el periodo de validación. Por el contrario, el modelo refleja una mejor representación de los caudales mínimos durante ambos periodos. Cabe destacar que se presentan limitaciones ya que, al utilizar nuevas configuraciones y datos para la calibración, los cuales en la revisión de literatura se observó que presentan una alta variabilidad en regiones tropicales de montaña como es el área estudio, y también porque hay pocos estudios sobre índice de área foliar para Colombia.

**Tabla 4.** *Parámetros más sensibles obtenidos en la calibración del modelo SWAT para la cuenca, y el valor óptimo después de la calibración*

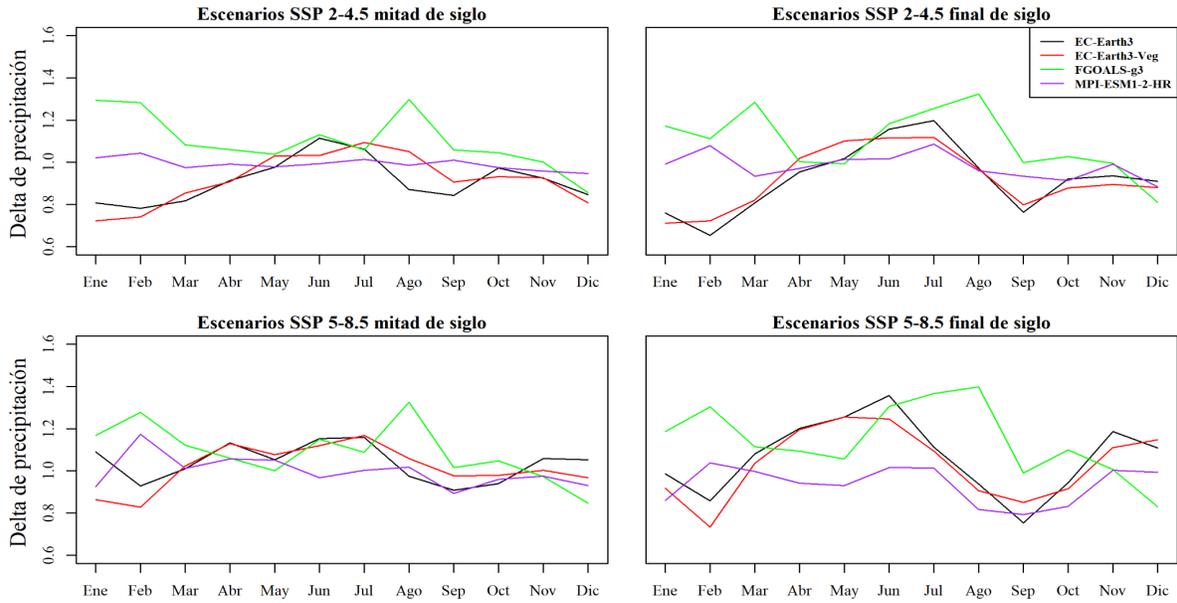
Parámetro*	Valor óptimo	Rango	
		Min	Max
R__CN2.mgt	0.360	0.1	0.7
V__ALPHA_BF.gw	0.046	0	0.4
V__GWQMN.gw	75.960	0	180
V__RCHRG_DP.gw	0.465	0.2	0.7
V__CH_K2.rte	109.446	3	160
V__GW_REVAP.gw	0.039	0.03	0.08
V__ESCO.hru	0.133	0	0.15
V__EPCO.hru	0.093	0	0.3
R__SOL_Z(..).sol	-0.374	-0.5	0.5
R__SOL_AWC(..).sol	-0.154	-0.3	0
V__REVAPMN.gw	197.759	160	480
<p><b>R_</b> indica que el valor del parámetro se multiplica por (1 + un valor dado dentro del rango establecido).  <b>V_</b> indica que el valor del parámetro es reemplazado por un valor dado dentro del rango establecido.</p>			



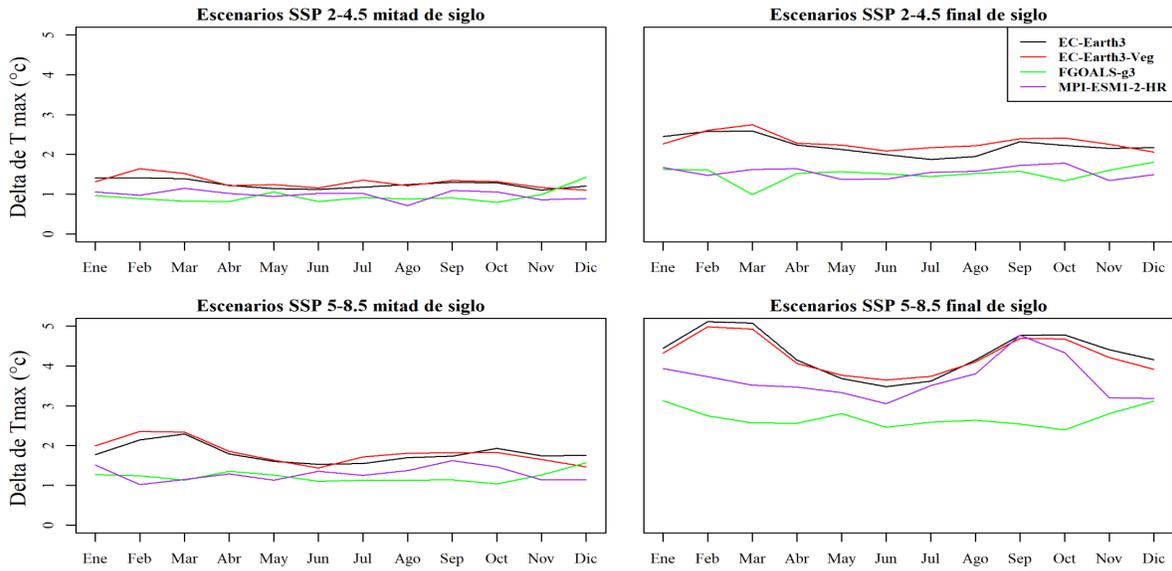
**Figura 3.** Caudales mensuales observados y simulados para los periodos de calibración (2003 - 2014) y validación (1994 - 2002). Donde NSE es el coeficiente Nash Sutcliffe efficiency, R2 es el coeficiente de determinación y PBIAS es el porcentaje de sesgo.

## 5.2 Proyecciones en la precipitación y temperatura

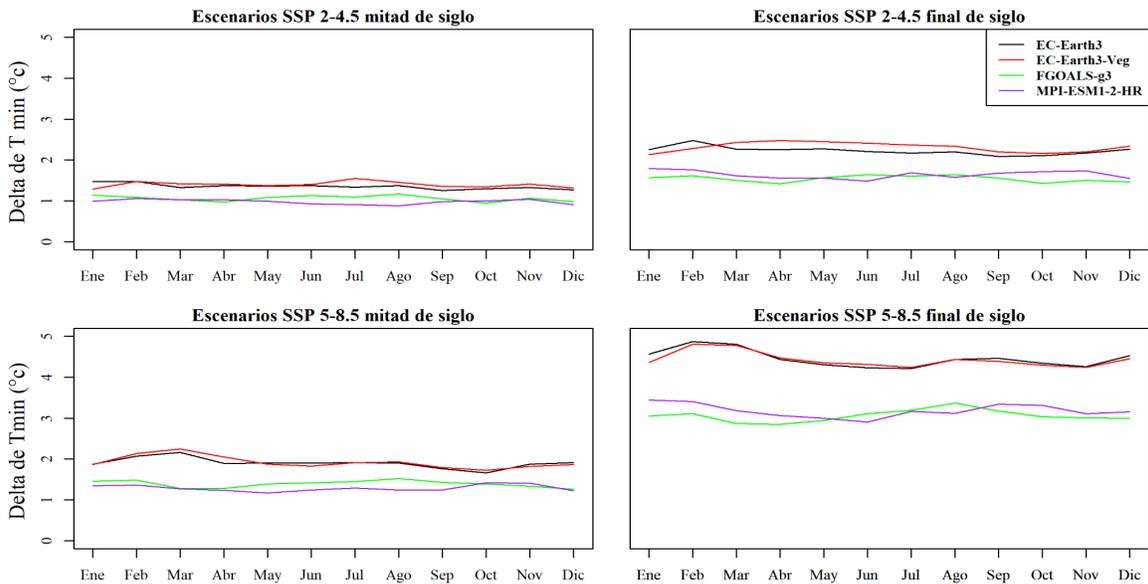
Las Figuras 4, 5 y 6 muestran las proyecciones de cambio en la precipitación y temperatura (i.e., deltas) para mediados (2040-2060) y finales de siglo (2080-2100) respecto al periodo histórico (1994-20014) bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 simulados con los modelos EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, FGOALS-g3 y MPI-ESM1-2-HR. En general, los deltas de precipitación de los diferentes modelos presentan períodos de aumentos como disminuciones que son más notorios para el escenario SSP5-8.5 a finales de siglo. Se puede resaltar que durante las temporadas diciembre-enero-febrero (DEF) y agosto-septiembre-octubre (ASO) es cuando las mayores disminuciones se proyectan, por el contrario de marzo a septiembre se presentan aumentos. Analizando los deltas de temperatura el modelo Fgoals-g3 es el que menores aumentos presenta para todos los escenarios y ventanas de tiempo (Figuras 5 y 6). Por otro lado, el modelo EC-Earth3-Veg presenta mayores aumentos en la temperatura mínima y máxima de hasta 5°C y 4°C, respectivamente. Comparando los 4 modelos estudiados se puede observar que FGOALS-g3 y EC-Earth3-Veg son los modelos que presentan los mayores aumentos y disminuciones en ambas variables (temperatura y precipitación). Por esta razón, estos 2 modelos fueron seleccionados para analizar el comportamiento de los caudales en cada uno de los escenarios, ya que representan futuros contrastantes para los caudales de la cuenca de la parte alta del río Magdalena.



**Figura 4.** Ciclo medio anual de los deltas de precipitación para los cuatro modelos estudiados y escenarios (SSP 2-4.5 y SSP5-8.5) para mitad (2040-2060) y finales (2080-2100) de siglo. Valores mayores a 1 indican aumentos en la precipitación futura respecto al periodo histórico mientras que, valores menores a 1 indican disminuciones.



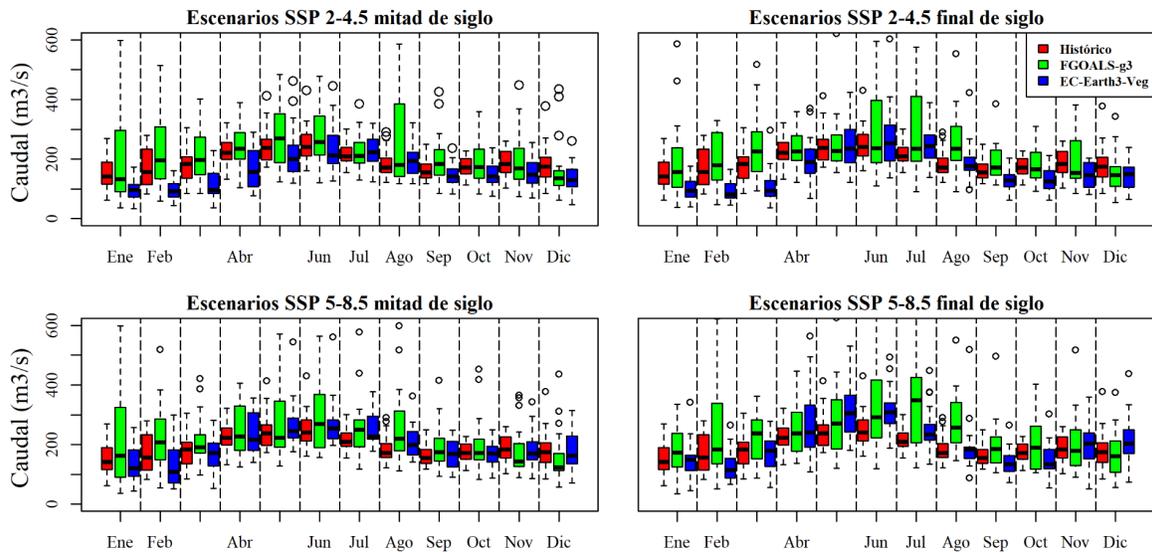
**Figura 5.** Ciclo medio anual de los deltas de temperatura máxima para los cuatro modelos estudiados y escenarios (SSP 2-4.5 y SSP5-8.5) para mitad (2040-2060) y finales (2080-2100) de siglo. Valores mayores a 1 indican aumentos en la precipitación futura respecto al periodo histórico mientras que, valores menores a 1 indican disminuciones.



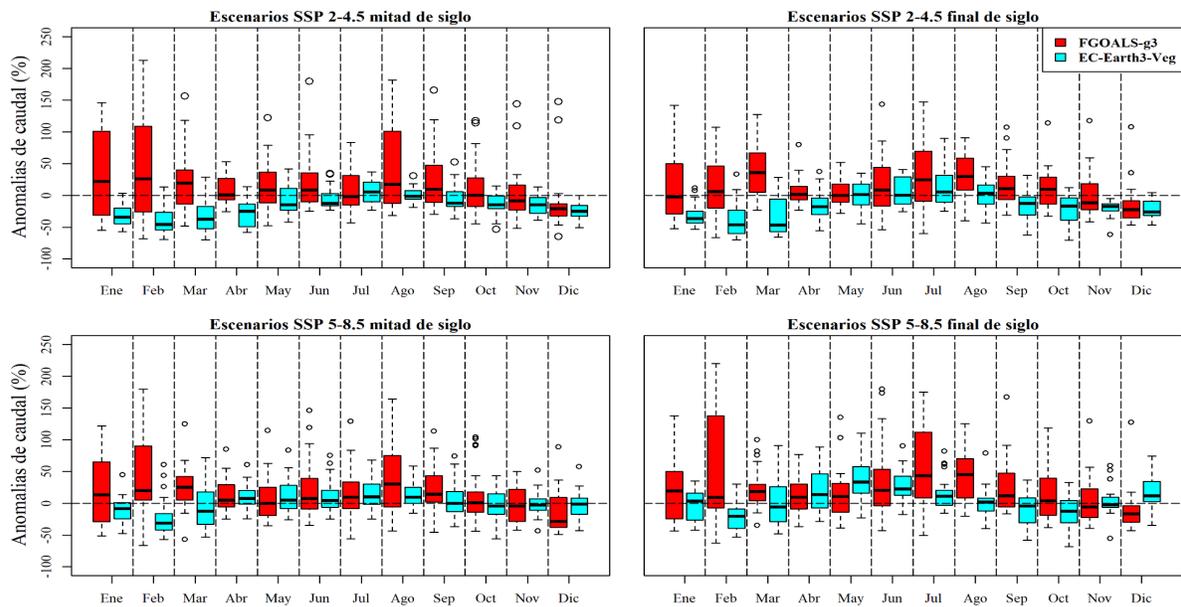
**Figura 6.** Ciclo medio anual de los deltas de temperatura mínima para los cuatro modelos estudiados y escenarios (SSP 2-4.5 y SSP5-8.5) para mitad (2040-2060) y finales (2080-2100) de siglo. Valores mayores a 1 indican aumentos en la precipitación futura respecto al periodo histórico mientras que, valores menores a 1 indican disminuciones.

### 5.3 Análisis de escenarios futuros para la cuenca de la parte alta del río Magdalena.

Las Figuras 7 y 8 muestran los caudales simulados y anomalías respecto al período histórico para cada uno de los modelos, escenarios y ventanas de tiempo futuro. Los resultados indican que el modelo Fgoals-g3 presenta una señal de aumento en los caudales durante JJA (50% aproximadamente) para mediados y finales de siglo bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. En contraste, el modelo EC-Earth3-Veg muestra disminuciones en el caudal, principalmente para la temporada DJF (30% aproximadamente) Finalmente, los resultados resaltan que es clave analizar los impactos del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica de las cuencas empleando múltiples modelos dado las diferencias que se pueden presentar entre las proyecciones de cada modelo.



**Figura 7.** Caudales simulados para el periodo histórico (1994-2014), mediados (2040-2060) y finales (2080 -2100) de siglo bajo los escenarios SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5 con los modelos EC-Earth3-Veg y Fgoals-g3.



**Figura 8.** Anomalías en los caudales mensuales para mediados (2040-2060) y finales (2080-2100) respecto al periodo histórico (1994-2014) para los escenarios SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5 con los modelos EC-Earth3-Veg y Fgoals-g3.

## 6 Conclusiones

Los resultados de los estadísticos de desempeño indican que el modelo logra representar las dinámicas de los caudales mensuales para el periodo de calibración y validación. Las proyecciones de cambio climático muestran aumentos y disminuciones en la precipitación y temperatura para mediados y finales de siglo. En particular, los modelos EC-Earth3-Veg y Fgoals-g3 presentan los resultados más contrastantes en la dirección y magnitud del cambio para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Por ejemplo, el modelo EC-Earth3-Veg muestra disminuciones en la precipitación (~10%) mientras que, el modelo Fgoals-g3 proyecta incrementos de hasta el 30%, principalmente para las temporadas DJF y JJA. En el caso de la temperatura mínima y máxima, aunque ambos modelos proyectan incrementos, estos son más

marcados para el modelo EC-Earth3-Veg y finales de siglo bajo los escenarios SSP2-4.5 (+2°C) y SSP5-8.5 (+4.5°C). La señal de cambio en los caudales futuros varía dependiendo del modelo empleado. En el caso del modelo Fgoals-g3, los caudales tienden a aumentar (~50%), en especial para inicios (enero-marzo) y mediados (julio-septiembre) de año. Por el contrario, las anomalías en los caudales obtenidas a partir del modelo EC-Earth3-Veg muestran disminuciones de hasta el (~30%) para la temporada DJF para ambos escenarios y periodos de tiempo analizados. Esto indica que las disminuciones en la precipitación y aumentos en la temperatura proyectadas con el modelo EC-Earth3-Veg resultan en una disminución de los caudales, y por ende potencialmente en la disponibilidad de agua, durante la temporada seca DJF. Sin embargo, los resultados contrastantes entre los dos modelos climáticos analizados resaltan la alta variabilidad que pueden presentar las proyecciones de cambio climático para Colombia y el área de estudio. Finalmente, los resultados de este estudio pueden ser de utilidad para el planteamiento de futuros estudios donde se evalúe el impacto del cambio climático en cuencas estratégicas. Además, tienen el potencial de ser empleados en el desarrollo de nuevas políticas de gestión y manejo del recurso hídrico en la parte alta de la cuenca del río Magdalena.

## Referencias

- Abbaspour, K. C. (2013). Swat-cup 2012. SWAT calibration and uncertainty program—A user manual.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2–4), 413–430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- Alizadeh, M. R., Adamowski, J., & Inam, A. (2022). Integrated assessment of localized SSP–RCP narratives for climate change adaptation in coupled human-water systems. *Science of The Total Environment*, 823, 153660. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153660>
- Anderson, E. P., Marengo, J., Villalba, R., Halloy, S., Young, B., Cordero, D., Gast, F., Jaimes, E., Ruiz, D., Herzog, S. K. et al. (2017). Consequences of climate change for ecosystems and ecosystem services in the tropical andes.
- Angarita, H. (2018, 8 mayo). HESS - Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. 1. <https://hess.copernicus.org/articles/22/2839/2018/>
- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., van Griensven, A., Liew, M. W. V., Kannan, N. y Jha, M. K. (2012), ‘SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION’, 55(4), 1491–1508.
- Alemayehu, T., van Griensven, A., Woldegiorgis, B. T. & Bauwens, W. (2017). An improved SWAT vegetation growth module and its evaluation for four tropical ecosystems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4449–4467. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4449-2017>
- Bajracharya, A. R., Bajracharya, S. R., Shrestha, A. B., & Maharjan, S. B. (2018). Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*, 625, 837–848.
- Balthazar, V., Vanacker, V., Molina, A., & Lambin, E. F. (2015). Impacts of forest cover change on ecosystem services in high Andean mountains. *Ecological Indicators*, 48, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.043>
- Elgamal, A., Reggiani, P., & Jonoski, A. (2017). Impact analysis of satellite rainfall products on flow simulations in the Magdalena River Basin, Colombia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9, 85–103. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.09.001>
- Barbudo, L., Ochoa, J.M. y Verbel, E.Y. (2016). Aplicación del modelo SWAT en el estudio hidrosedimentológico de la cuenca quebrada San Pedro en el municipio de Curumaní,

Departamento del Cesar. Trabajo de grado. Universidad de Manizales. Facultad de Especialización en Sistemas de Información Geográfica. 62 p.

- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303–309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- S. Bergström Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments SMHI RH07, Norrköping (1976)
- Castelli, G., Foderi, C., Guzman, B., Ossoli, L., Kempff, Y., Bresci, E., & Salbitano, F. (2017). Planting Waterscapes: Green Infrastructures, Landscape and Hydrological Modeling for the Future of Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. *Forests*, 8(11), 437. <https://doi.org/10.3390/f8110437>
- Devia, G. K., Ganasri, B., & Dwarakish, G. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Duan, Z., Tuo, Y., Liu, J., Gao, H., Song, X., Zhang, Z., Yang, L., & Mekonnen, D. F. (2019). Hydrological evaluation of open-access precipitation and air temperature datasets using SWAT in a poorly gauged basin in Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 569, 612–626. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.026>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066 (2015). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Funk, C., Peterson, P., Peterson, S., Shukla, S., Davenport, F., Michaelsen, J., Knapp, K. R., Landsfeld, M., Husak, G., Harrison, L., Rowland, J., Budde, M., Meiburg, A., Dinku, T., Pedreros, D., & Mata, N. (2019). A High-Resolution 1983–2016 Tmax Climate Data Record Based on Infrared Temperatures and Stations by the Climate Hazard Center. *Journal of Climate*, 32(17), 5639–5658. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-18-0698.1>
- García-Leoz, V., Villegas, J.C., Suescún, D., Flórez, C.P., Merino-Martín, L., Betancur, T., León, J.D., 2018. Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: improved water availability in early stages of natural vegetation recovery. *Reg. Environ. Chang.* 18 (4), 1117–1129. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>.
- Gebre, S. L. (2015). Potential Impacts of Climate Change on the Hydrology and Water resources Availability of Didessa Catchment, Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Geology Geosciences*, 04(01). <https://doi.org/10.4172/2329-6755.1000193>
- Gomes, L., Bianchi, F., Cardoso, I., Schulte, R., Fernandes, R., & Fernandes-Filho, E. (2021). Disentangling the historic and future impacts of land use changes and climate variability on the hydrology of a mountain region in Brazil. *Journal of Hydrology*, 594, 125650. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125650>
- Haas, H., Reaver, N. G., Karki, R., Kalin, L., Srivastava, P., Kaplan, D. A. & Gonzalez-Benecke, C. (2022). Improving the representation of forests in hydrological models. *Science of The Total Environment*, 812, 151425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151425>

- Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Jepsen, S. M., Wemple, B., Valencia, S., Marsik, M., Doria, R., Escobar, J., Restrepo, J. C., & Velez, M. I. (2019). Modeling Streamflow Response to Persistent Drought in a Coastal Tropical Mountainous Watershed, Sierra Nevada De Santa Marta, Colombia. *Water*, 11(1), 94. <https://doi.org/10.3390/w11010094>
- Kim, J., Choi, J., Choi, C., & Park, S. (2013). Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *Science of The Total Environment*, 452-453, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.005>
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F. & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 99(D7), 14415. <https://doi.org/10.1029/94jd00483>
- Li, L., Yu, Y., Tang, Y., Lin, P., Xie, J., Song, M., Dong, L., Zhou, T., Liu, L., Wang, L., Pu, Y., Chen, X., Chen, L., Xie, Z., Liu, H., Zhang, L., Huang, X., Feng, T., Zheng, W., . . . Wei, J. (2020). The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model Grid-Point Version 3 (FGOALS-g3): Description and Evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(9). <https://doi.org/10.1029/2019ms002012>
- López-Ramírez, S. M., Mayer, A., Sáenz, L., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Looker, N., Schürz, C., Berry, Z. C., Manson, R., Asbjornsen, H., Kolka, R., Geissert, D., & Lezama, C. (2021). A comprehensive calibration and validation of SWAT-T using local datasets, evapotranspiration and streamflow in a tropical montane cloud forest area with permeable substrate in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 603, 126781. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126781>
- Ma, T., Duan, Z., Li, R. & Song, X. (2019). Enhancing SWAT with remotely sensed LAI for improved modelling of ecohydrological process in subtropics. *Journal of Hydrology*, 570, 802-815. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.024>
- Moradkhani, H. and Sorooshian, S., 2008. General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. *Hydrological modeling and the water cycle*. Springer. 291 p. ISBN 978-3-540-77842-4
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J. y Williams, J. (2011), *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*.
- Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P. A., & Nobre, P. (2021). Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5 / CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6713–6735. <https://doi.org/10.1002/joc.7221>
- Pedersen, J. T. S., van Vuuren, D., Gupta, J., Santos, F. D., Edmonds, J., & Swart, R. (2022). IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022? *Global Environmental Change*, 75, 102538. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102538>

- Pedroza, N. M. M., & Guzmán, M. C. V. (2020). 1. Rutas para la transformación de las sociedades sostenibles. Libros Universidad Nacional Abierta ya Distancia, 1-34.
- POMCH. (s. f.). Corporación autónoma regional del alto Magdalena. Recuperado 28 de junio de 2022, de <https://cam.gov.co/recurso-hidrico/pomch.html>
- Pu, Y., Liu, H., Yan, R., Yang, H., Xia, K., Li, Y., Dong, L., Li, L., Wang, H., Nie, Y., Song, M., Xie, J., Zhao, S., Chen, K., Wang, B., Li, J. & Zuo, L. (2020). CAS FGOALS-g3 Model Datasets for the CMIP6 Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP). *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(10), 1081-1092. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-2032-0>
- Refsgaard, J. C., & Storm, B. (1995). MIKE SHE, Computer Models of Watershed Hydrology, VP Singh, ed. Water Resources, Highlands Ranch, Colo, 809-846.
- Risal, A., Parajuli, P. B., Dash, P., Ouyang, Y., & Linhoss, A. (2020). Sensitivity of hydrology and water quality to variation in land use and land cover data. *Agricultural Water Management*, 241, 106366. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106366>
- Sellami, H., Benabdallah, S., La Jeunesse, I., & Vanclooster, M. (2016). Quantifying hydrological responses of small Mediterranean catchments under climate change projections. *Science of the Total Environment*, 543, 924-936
- Song, Y., Zhang, J., & Lai, Y. (2021). Influence of multisite calibration on streamflow estimation based on the hydrological model with CMADS inputs. *Journal of Water and Climate Change*, 12(7), 3264–3281. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.115>
- Shuttle Radar Topography Mission. (s. f.). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Recuperado 15 de julio de 2022, de <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
- Strauch, M. & Volk, M. (2013). SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. *Ecological Modelling*, 269, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.013>
- Suescún, D., León, J.D., Villegas, J.C., García-Leoz, V., Correa-Londoño, G.A., Flórez, C.P., 2019. ENSO and rainfall seasonality affect nutrient exchange in tropical mountain forests. *Ecohydrology* <https://doi.org/10.1002/eco.2056>.
- Tapasco, J., M. Quintero, N. Uribe, J. Valencia, G. Romero, S. Calderón, D. A. Ordóñez, A. Álvarez, L. Sánchez-Aragón y C. E. Ludeña. 2015. Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Recurso Hídrico. Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 258, Washington D.C.
- UN WATER (2019), Climate Change and Water UN-Water Policy Brief, Technical report. URL: <https://www.unwater.org/publications/un-water-policy-brief-on-climate-changeand-water/>
- Uribe, N., Estrada, R. D., & Jarvis, A. (2009). Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: el caso de las cuencas Tuluá-Morales, Guabas, Sabaletas, Amaime, Nima, Bolo, Fraile, Desbaratado y Palo. Contrato de prestación de servicios TNC – CIAT. 62 p.
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149–4162. <https://doi.org/10.1029/2018wr023316>

- Uribe, N., & Valencia, J. (2010). Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: caso cuenca del río Tunjuelo - Cundinamarca.
- Valencia, S., Salazar, J. F., Villegas, J. C., Hoyos, N., & Duque-Villegas, M. (2022). SWAT-Tb with improved LAI representation in the tropics highlights the role of forests in watershed regulation. *Authorea Preprints*.
- van Vuuren, DP, Edmonds, J., Kainuma, M. et al. Las vías de concentración representativas: una descripción general. *Cambio Climático* 109, 5 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vilaysane, B., Takara, K., Luo, P., Akkharath, I., & Duan, W. (2015). Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.047>
- Villamizar, S. R., Pineda, S. M., & Carrillo, G. A. (2019). The Effects of Land Use and Climate Change on the Water Yield of a Watershed in Colombia. *Water*, 11(2), 285. <https://doi.org/10.3390/w11020285>
- Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G., Hamlet, A. F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, I., López-Moreno, J. I. et al. (2011). Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 471-504.
- Ward, P. J., Eisner, S., Flörke, M., Dettinger, M. D., & Kummu, M. (2014). Annual flood sensitivities to El Niño–Southern Oscillation at the global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 47-66.
- WOLF, S., EUGSTER, W., POTVIN, C., TURNER, B. L., & BUCHMANN, N. (2011). Carbon sequestration potential of tropical pasture compared with afforestation in Panama. *Global Change Biology*, 17(9), 2763-2780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02460.x>
- Worako, A. W., Haile, A. T., & Taye, M. T. (2021). Streamflow variability and its linkage to ENSO events in the Ethiopian Rift Valley Lakes Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100817. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100817>

## **Anexos**

**Anexo 1. Tabla 1. Parámetros empleados en la calibración del modelo SWAT.**

Parámetro	Valor	
	Mínimo	Máximo
r_CN2.mgt	-0.9	0.5
v_ALPHA_BF.gw	401.635	1.218.365
v_GW_DELAY.gw	51.673.264	31.912.674
v_GWQMN.gw	523.344	1.596.656
v_RCHRG_DP.gw	135.829	414.171
v_CH_N2.rte	50.968	126.632
v_CH_K2.rte	35.451.878	179.548.126
v_GW_REVAP.gw	-19.322	127.722
r_CANMX.hru	-1.282.586	-87.414
v_ESCO.hru	490.349	1.489.651
v_CH_N1.sub	-31.995	89.915
v_EPCO.hru	-278.307	578.307
v_REVAPMN.gw	233.614.029	711.385.986
v_SURLAG.bsn	1.547.376	4.621.624
r_OV_N.hru	-22.177.195	-7.117.806
r_SOL_Z().sol	-451.283	58.283
v_ALPHA_BNK.rte	441.467	1.338.533
r_SOL_AWC().sol	-1.458.822	-145.178
r_HRU_SLP.hru	-394.613	229.613

**Anexo 2. Ecuaciones y rangos de desempeño para los estadísticos de prueba evaluados planteados por Moriasi et al., (2007), Cibin et al., (2012) y Me et al., (2015).**

Estadístico	Rangos de desempeño del modelo			
	Insatisfactorio	Satisfactorio	Bueno	Muy bueno
NSE	< 0.5	0.5 - 0.6	0.65 - 0.75	0.75 - 1
PBIAS	> ± 25 %	± 15 % ± 25%	10 % ± 15%	< ± 10 %
R2	< 0.5	0.5 - 0.6	0.6 - 0.7	0.7 - 1