



**MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y  
SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO  
CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO ALTO  
CAUCA (COLOMBIA) USANDO EL  
PROGRAMA HYDROBID**

**HYDROLOGICAL MODELLING AND  
CLIMATE CHANGE SCENARIOS SIMULATION  
IN ALTO CAUCA RIVER BASIN, COLOMBIA  
WITH THE HYDROBID MODEL**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**LAURA TATIANA FLORIÁN HERNÁNDEZ**

**Dirigido por:**

**Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR**

**Alcalá de Henares, a 7 de febrero de 2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a Dios por la brindarme la oportunidad y la sabiduría para la culminación de este máster

A mis padres, a mi hermana Mary y Sebastián, por el apoyo, motivación y amor incondicional en todo el proceso.

Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento al director de este TFM, el Dr. Juan Antonio Pascual, por el apoyo y dirección que me dio para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco a todos los docentes y compañeros que acompañaron este proceso de formación tan enriquecedor.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS .....	13
2.1 General.....	13
2.2 Específicos .....	13
3. ÁREA DE ESTUDIO .....	13
4. METODOLOGÍA.....	16
4.1 Fase 1: Modelación en HYDROBID y delimitación de las cuencas aferentes .....	16
4.1.1 Modelación en HYDROBID.....	16
4.1.2 Delimitación de cuencas aferentes .....	18
4.2 Fase 2. Información hidrometereológica .....	20
4.2.1 Tratamiento y completamiento de datos .....	23
4.3 Fase 3. Construcción y parametrización del modelo.....	25
4.4 Fase 4. Calibración del modelo.....	27
4.5 Fase 5. Escenarios de cambio climático .....	30
5. RESULTADOS .....	33
5.1 Tratamiento de datos hidrometereológicos .....	33
5.2 Construcción, parametrización y calibración del modelo.....	40
5.2.1 Calibración subcuenca 302229800 - Estación Paletara .....	41
5.2.2 Calibración subcuenca 302151400 – Estación Bocatoma Florida.....	43
5.2.3 Calibración subcuenca 302141600 – Estación Julumito .....	46
5.3 Escenarios de cambio climático.....	48
6. DISCUSIÓN.....	51
7. CONCLUSIONES .....	58
8. BIBLIOGRAFÍA.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio .....	14
Figura 2. Metodología empleada para el desarrollo de la modelación hidrológica.....	16
Figura 3. Esquema del modelo GWLF .....	18
Figura 4. Subcuencas aferentes de la cuenca del Río Alto Cauca identificadas mediante la base de datos AHD-LAC.....	19
Figura 5. Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas usadas en la modelación .....	22
Figura 6. Estructura de los archivos.....	26
Figura 7. Estaciones de caudal utilizadas para la calibración del modelo .....	28
Figura 8. Mapas de resultados de modelos múltiples del (CMIP5) de los escenarios RCP 2.6 y 8.5.....	31
Figura 9. Datos faltantes de las estaciones o puntos de precipitación, temperatura y caudal .....	34
Figura 10. Diagrama de cajas de los datos diarios de precipitación y sus respectivas anomalías.....	35
Figura 11. Precipitación media mensual multianual para las estaciones evaluadas.....	36
Figura 12. Diagrama de cajas de los datos diarios de temperatura y sus respectivas anomalías.....	37
Figura 13. Temperatura media mensual multianual para las estaciones evaluadas.....	38
Figura 14. Diagrama de cajas de los datos diarios de caudal y sus respectivas anomalías.....	39
Figura 15. Caudales medios mensuales multianuales para las estaciones de calibración ..	40
Figura 16. Curva de duración de caudal cuenca 302229800 .....	42
Figura 17. Caudales diarios modelados vs observados .....	42
Figura 18. Comparación de caudales anuales modelados vs observados .....	43
Figura 19. Curva de duración de caudal cuenca 302151400 .....	44
Figura 20. Caudales diarios modelados vs observados .....	45

Figura 21. Comparación de caudales anuales modelados vs observados .....	45
Figura 22. Curva duración de caudales .....	47
Figura 23. Caudales diarios modelados vs observados .....	47
Figura 24. Comparación de caudales anuales modelados vs observados .....	48
Figura 25. Balance hídrico de los diferentes escenarios de cambio climático modelados vs el escenario actual.....	49
Figura 26. Temperatura en los diferentes escenarios modelados .....	50
Figura 27. Percolación en los diferentes escenarios modelados.....	50
Figura 28. Caudales en los diferentes escenarios modelados .....	51
Figura 29. Rendimiento hídrico anual para la cuenca del Río Alto Cauca .....	52
Figura 30. Escorrentía media anual en año medio para la cuenca del Río Alto Cauca .....	54
Figura 31. Escorrentía media anual en año seco para la cuenca del Río Alto Cauca .....	55
Figura 32. Comparación de volúmenes anuales modelados vs observados .....	56
Figura 33. Relación del índice estandarizado de precipitación y los periodos de sequía o “Niño” para el territorio colombiano .....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca .....	15
Tabla 2. Coordenadas de los centroides de las subcuencas aferentes y su respectivo código identificador COMID.....	20
Tabla 3. Estaciones meteorológicas utilizadas para realizar el modelo.....	21
Tabla 4. Parámetros de calibración del modelo .....	27
Tabla 5. Estaciones usadas para la calibración del modelo .....	29
Tabla 6. Estadísticos de validación de la calibración del modelo .....	29
Tabla 7. Precipitación media para el departamento del Cauca en el periodo 1990-2020 ...	31
Tabla 8. Anomalías de temperatura y precipitación para el periodo 2020-2039 en el escenario	

RCP 2.6, 4.5 y 8.5 .....	32
Tabla 9. Multiplicador y porcentaje de cambio de la precipitación en los diferentes escenarios .....	33
Tabla 10. Relación de las faltantes en las estaciones y/o puntos de precipitación, temperatura y caudal .....	33
Tabla 11. Valores de los parámetros de calibración definidos para la calibración subcuenca 302229800.....	41
Tabla 12. Estadísticos de validación del modelo para la subcuenca 302229800 .....	41
Tabla 13. Valores de los parámetros de calibración definidos para la calibración subcuenca .....	43
Tabla 14. Estadísticos de validación del modelo para la subcuenca 302151400 .....	44
Tabla 15. Valores de los parámetros de calibración definidos para la calibración subcuenca 302141600.....	46
Tabla 16. Estadísticos de validación del modelo para la subcuenca 302141600 .....	46

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo A. Serie de datos hidroclimatológicos

Anexo B. Archivos modelo HYDROBID

## TABLA DE ABREVIATURAS

AHD: *Analytical Hydrology Dataset*

BID: *Banco Interamericano de Desarrollo*

CMIP5: *Coupled Model Intercomparison Project, 5th Phase*

CSV: *Comma Separated Values*

CVC: *Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca*

EIDENAR: *Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente – Universidad del Valle*

GWLF: *Generalized Watershed Loading Function*

IDEAM: *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LAC: *Latino América y El Caribe*

Msnm: *Metros sobre el nivel del mar*

QGIS: *Quantum Geographic Information System*

RTI: *Research Triangle Institute*

SNHT: *Standard Normal Homogeneity Tes*

## RESUMEN

En las últimas décadas a nivel mundial el acceso y la disponibilidad del recurso hídrico ha aumentado su importancia, ya que este recurso es de vital importancia para todas las actividades que se desarrollan en el territorio, como lo son las actividades agropecuarias, los usos domésticos, el consumo humano, saneamiento entre otras; considerando el crecimiento de la población y los posibles impactos del cambio climático que pueden afectar la disponibilidad del recurso. Debido a esto se hace necesario evaluar y planificar los recursos hídricos de una región, mediante la aplicación de diferentes programas y herramientas de modelación hidrológica para realizar una evaluación cuantitativa de este recurso hídrico con el fin de mejorar la gestión de este.

Teniendo en cuenta la importancia de la gestión del recurso hídrico el presente trabajo realizó una modelación hidrológica con el programa HYDROBID desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo en colaboración con el Research Triangle Institute (RTI) para la cuenca del Río Cauca, el cual constituye el segundo río más importante de Colombia después del Magdalena, siendo su principal afluente (Pérez Valbuena, Arrieta Arrieta, & Contreras Amaya, 2015). El sector evaluado de la cuenca del Río Cauca corresponde a su parte alta desde su nacimiento en el Páramo de Sotará, departamento del Cauca hasta unirse con el río Hondo, con una extensión aproximada de 854.61 km<sup>2</sup> y fuente de abastecimiento principal de la ciudad de Popayán y otros centros poblados.

Este modelo contemplo cinco (5) fases metodológicas, la primera consistió en una descripción general de la herramienta y la delimitación del área de estudio, seguido de la adquisición de información hidrometeorológica disponible para la cuenca y su respectivo tratamiento estadístico para completar los datos faltantes; se continuó con la construcción y parametrización del modelo y posterior ejecución para cada una de las tres estaciones de caudales observados usadas para calibrar los volúmenes simulados. Por último, se realiza la modelación de tres escenarios de cambio climático teniendo en cuenta los datos de anomalías de temperatura y precipitación previstas por el World Climate Research (WCRPs)

De los resultados se observó que HYDROBID constituye una buena herramienta para evaluar de manera regional la disponibilidad del recurso hídrico, Sin embargo, para el área de estudio la simulación realizada no obtuvo los valores óptimos en los parámetros estadísticos de calibración. No obstante, se logró una buena calibración gráfica con respecto al volumen total modelado en la curva de duración de caudales.



Además, con los escenarios de cambio climático modelados se observó una variación de la precipitación que va del -0.39% hasta un 6.59% y un aumento en la temperatura de aproximadamente 1°C. Estas variaciones, evidencian cambios en la disponibilidad del recurso hídrico con respecto al escenario actual, las cuales deben tenerse en cuenta para realizar una adecuada gestión por parte de las entidades ambientales oficiales para mitigar los posibles escenarios de desabastecimiento y/o inundaciones que puedan presentarse en la cuenca del Río Alto Cauca.

**Palabras claves:** Modelo hidrológico, HYDROBID, Río Cauca, Colombia, Cambio Climático

## ABSTRACT

Globally, in recent decades, access and availability of water resource has increased its importance, since these resources play a vital role for all the activities that take place in territory, such as agricultural activities, domestic uses, human consumption, sanitation among others, considering population growth and climate change impacts that may affect water resource availability. Therefore, it is necessary to evaluate and water resource planning, through application of different programs and hydrological modeling tools to develop a quantitative evaluation of water resource to improve its management.

Considering water resource management importance, this paper generates a hydrological modeling with HYDROBID program developed by the Inter-American Development Bank in collaboration with the Research Triangle Institute (RTI) for Cauca River basin, which is second most important river in Colombia after Magdalena River, being its main tributary (Pérez Valbuena, Arrieta Arrieta, & Contreras Amaya, 2015). Evaluated sector of Cauca River basin is the upper part from its source in Páramo Sotará, department of Cauca, until it joins Hondo River, with an approximate extension of 854.61 km<sup>2</sup>. It is also main supply source of city of Popayán and another village around.

This model includes five (5) methodological phases. First one was a general tool description and study area delimitation. followed by basin available hydrometeorological information download and its respective statistical treatment to complete missing data. Next, model construction and parameterization and subsequent execution for each of three (3) observed flow stations used to calibrate simulated volumes. Finally, modeling of three (3) climate change scenarios is develop considering temperature and precipitation anomaly data predicted by the World Climate Research (WCRPs).

From results, it was observed that HYDROBID is a suitable tool to regionally assess water resources availability. However, for the study area, simulation did not obtain optimal values in calibration statistical parameters. In contrast, a good graphical calibration was achieved regarding total volume modeled in flow duration curve.

In addition, modeled climate change scenarios indicate variation in precipitation ranging from -0.39% to 6.59% and an increase in temperature of approximately 1°C. These variations also indicated changes in water resources availability with respect to current scenario, which must be consider carrying out accurate management by official environmental entities to mitigate possible shortages scenarios and/or floods that may occur in Alto Cauca River Basin.

**Key words:** Hydrological model, HYDROBID, Cauca River, Colombia. Climate Change

## 1. INTRODUCCIÓN

El Río Cauca, afluente del río Magdalena, es una de las fuentes hídricas más importantes del Occidente Colombiano, nace en el sur del Macizo Colombiano en el Páramo de Sotará Departamento del Cauca, desciende siguiendo su curso en dirección paralela a la cordillera Occidental. Este río Atraviesa de sur a norte nueve departamentos (Cauca, Valle del Cauca, Quindío, Risaralda, Caldas, Antioquia, Córdoba, Sucre y Bolívar), brindando grandes beneficios y servicios ecosistémicos trascendentales a cerca de 183 municipios; servicios que son la base del desarrollo socioeconómico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Ministerio de Hacienda y Crédito Público; Departamento Nacional de Planeación, 2009).

En torno a este importante afluente se han desarrollado actividades productivas de gran importancia para la economía regional como los son la industria azucarera, actividades mineras y agropecuarias, hidroeléctricas, entre otras, representando cerca del 20% del total del producto nacional (Pérez Valbuena, Arrieta Arrieta, & Contreras Amaya, 2015). Además, se estima que abastece a cerca de tres millones de personas en todo su recorrido (CVC, 2022) incluyendo ciudades como Cali y Popayán.

Teniendo en cuenta la importancia y la demanda que tiene este afluente en el territorio se hace necesario evaluar las posibles alteraciones originadas por el Cambio Climático, este entendido como una variación en la temperatura precipitación, humedad relativa y la escorrentía, que originan como consecuencias cambios en el ciclo hidrológico, por lo cual la gestión de los recursos hídricos se hará más compleja si no se tienen en cuenta estas alteraciones a nivel local y regional (Menzel & Burger, 2002). Por lo cual se hace necesario realizar una caracterización adecuada del territorio para gestionar de manera eficiente el recurso disponible, esto puede llevarse a cabo mediante la aplicación de modelos hidrológicos que permitan estimar los valores de escorrentía teniendo en cuenta las variables de precipitación y temperatura.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en el marco de la ayuda que brinda a sus países miembros en la adaptación al cambio climático y las alteraciones que puedan darse en la disponibilidad de agua, patrocina y crea el sistema de simulación hidrológica HYDROBID.

Este sistema comprende módulos de análisis hidrológico y cambio climático para estimar el recurso disponible, a nivel de cuencas y subcuencas, debido a que los diferentes pronósticos indican que en las próximas décadas un gran porcentaje de las personas de la región de Latinoamérica y El Caribe experimenten estrés hídrico (Rinner, Bruhn, Miralles-Wilhelm, & Muñoz Castillo, 2014). Conjuntamente, cuenta con una Base de Datos de Hidrología Analítica creada especialmente para la región de América Latina y el Caribe, la cual incluye relaciones de flujo entre cuencas aguas arriba/abajo, información de la cobertura y uso del suelo y una delimitación de cuencas específica; permitido así una modelación hidrológica muy cercana al escenario actual de cada cuenca, en donde se pueden tener en cuenta algunas variables como el cambio climático, aumento de la demanda, cambios en el uso del suelo y de la cobertura vegetal.

Dicho lo anterior el presente documento desarrolla un caso de aplicación del sistema HYDROBID en la parte Alta del Río Cauca, comprendida entre su nacimiento hasta su confluencia con el Río Hondo, en los municipios de Puracé y Popayán, departamento del Cauca. Con el propósito principal de realizar una caracterización del recurso hídrico en esta área, partiendo de los datos hidroclimatológicos disponibles y como los cambios en estas variables podrían afectar la disponibilidad y acceso al recurso en diferentes escenarios de cambio climático. Los resultados de estas modelaciones pueden ser contemplados para la planificación y gestión del recurso hídrico en la región, evaluando posibles acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático con el fin de garantizar el acceso a este recurso de vital importancia para todas las actividades desarrolladas por la comunidad que la habita.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 General**

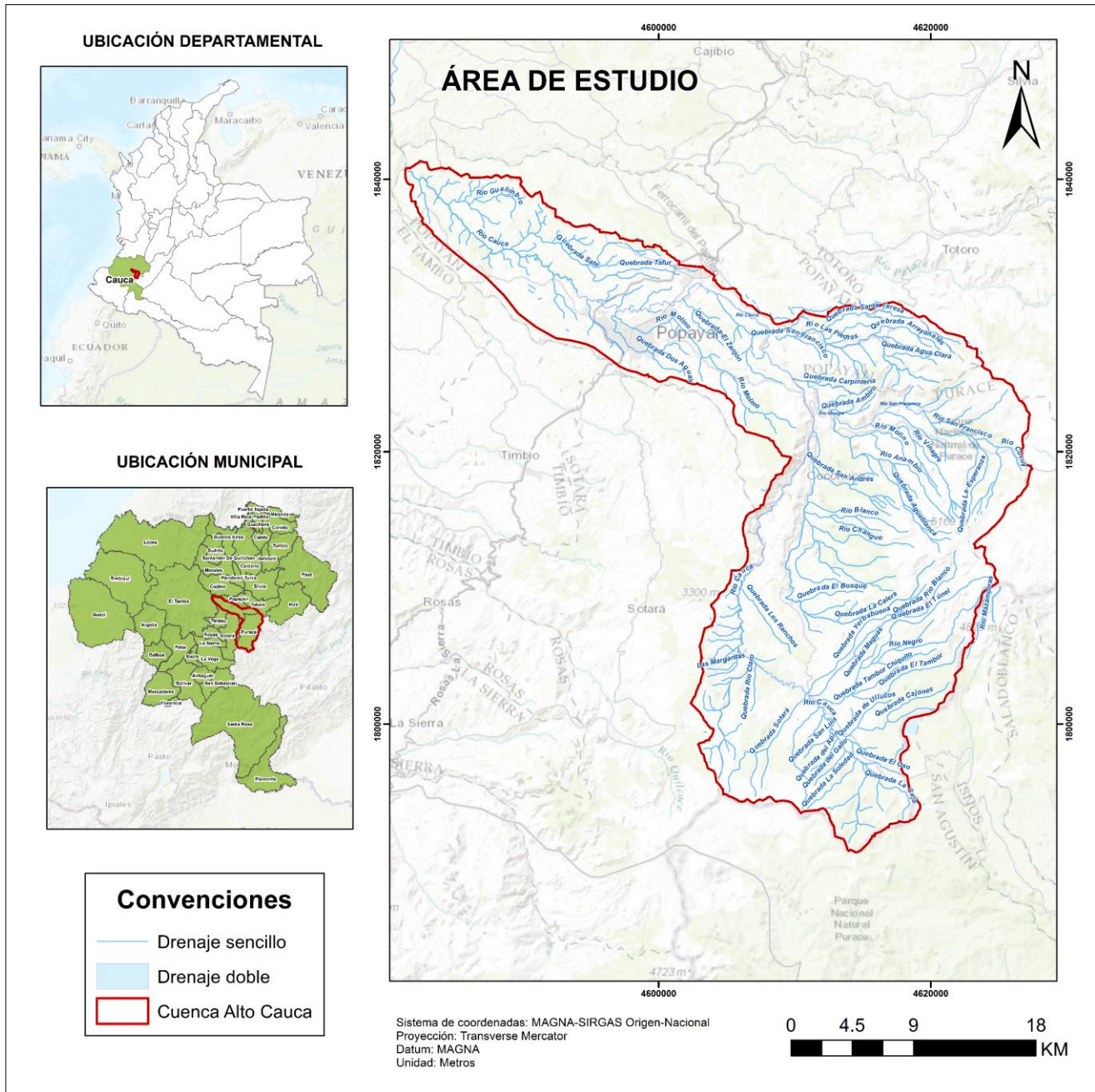
Caracterizar la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca del Alto Río Cauca calculada mediante el programa HYDROBID, además de evaluar los posibles cambios en la oferta hídrica en los diferentes escenarios de cambio climático.

### **2.2 Específicos**

- Realizar la modelización hidrológica de la cuenca del Alto Río Cauca mediante el programa HYDROBID
- Calibración del modelo de la cuenca del Alto Río Cauca mediante la parametrización del modelo HYDROBID
- Evaluación de los escenarios de cambio climático utilizando el programa HYDROBID para estimar la disponibilidad del recurso hídrico para la cuenca de estudio.

## **3. ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio corresponde a la cuenca del Río Alto Cauca, la cual se encuentra ubicada en el sur occidente de Colombia, específicamente en el departamento del Cauca, en los municipios de Puracé y Popayán. Esta cuenca, como su nombre lo indica, corresponde a la parte más alta del Río Cauca. Su nacimiento se encuentra cerca de la Laguna del Buey, en el Páramo de Sotará, la cual se encuentra en el Parque Nacional Puracé, en límite de los departamentos del Cauca y Huila, a aproximadamente 3100 msnm. (Figura 1)



**Figura 1.** Localización del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

Esta cuenca tiene una extensión de 854.51 km<sup>2</sup> y dentro de la Zonificación Hidrográfica del país propuesta por el IDEAM (2013), se encuentra dentro del área hidrográfica Magdalena Cauca y la zona hidrográfica Cauca. Dentro de los afluentes más importantes del Alto Río Cauca se encuentran el Río Negro, el Río Grande, Río San Francisco, Río Las Piedras, Río

Molino, hasta el punto de salida donde se une con el Río Hondo, donde inicia la parte media de este drenaje teniendo un recorrido de 99,51 km. El rango de altura de la cuenca es de 1396 a 4673 msnm, los rangos de pendientes varían del 3% al 89%.

La precipitación anual de la cuenca varía entre los 1000 y 2000 mm, presentando una franja de abundantes precipitaciones que aumenta o disminuye de acuerdo con la intensidad del periodo de vientos (CVC, 2015). La cuenca presenta un régimen bimodal, en donde los periodos húmedos se presentan entre los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre y las precipitaciones más bajas se ocurren en los meses ocurren durante diciembre-enero-febrero y junio a agosto (Sedano Cruz, 2015). Los meses con mayor precipitación no coinciden con los de mayor caudal, presentándose desfases de tiempo continuo, como consecuencia del proceso natural de saturación, drenaje de los suelos entre temporadas de lluvias y la geomorfología de la cuenca (CVC, Universidad del Valle, EIDENAR, 2007)

Además de esto a continuación en la Tabla 1 se presentan algunos parámetros morfométricos de la cuenca, en donde los relacionados con la forma de la cuenca indican que según la clasificación propuesta por Reyes (2012) esta cuenca tiene un forma alargada según su factor de forma, según su índice de compacidad es una cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga, su cauce principal corresponde a un canal regular con sinuosidad media y una densidad de drenajes baja.

**Tabla 1.** Parámetros morfométricos de la cuenca

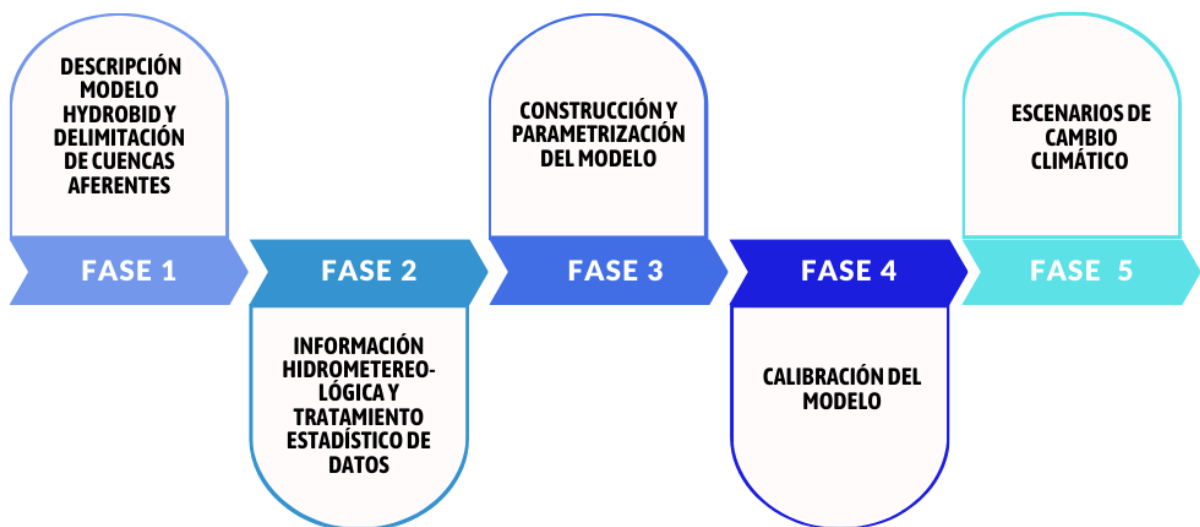
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Área	854.61 km <sup>2</sup>
Perímetro	184.34 km
Longitud cauce principal	99.51 km
Factor de forma	0.23
Índice de compacidad	1.76
Índice de sinuosidad	1.66
Densidad de drenaje	1.04
Pendiente media	18,04%

Fuente: Elaboración propia

## 4. METODOLOGÍA

Con el fin de realizar la caracterización y modelación hidrológica de esta cuenca se propone la metodología a desarrollar, presentada en la Figura 2, la cual consta de 5 fases. Como primer paso se realiza la delimitación de las cuencas aferentes al sector Alto del Río Cauca usando una base de datos hidrográficos para Latinoamérica y el Caribe, luego de esto se recopila toda la información climática existente para el área de estudios y se tratan estadísticamente estas series de datos para homogenizarlas y rellenar los datos faltantes.

Teniendo la información de precipitación y temperatura para la interpolación climática, además de la información de caudales para la posterior calibración del modelo se inicia la construcción y parametrización del modelo en HYDROBID, seguido a esto con la información recopilada de caudales se realiza la respectiva calibración para las cuencas donde se encuentran estas estaciones. Por último, se realiza la modelación para tres posibles escenarios de cambio climático dentro de la cuenca.



**Figura 2.** Metodología empleada para el desarrollo de la modelación hidrológica

Fuente: Elaboración propia

### 4.1 Fase 1: Modelación en HYDROBID y delimitación de las cuencas aferentes

#### 4.1.1 Modelación en HYDROBID

HYDROBID es un sistema integrado y cuantitativo para la modelación hidrológica y gestión de recursos de la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC por sus siglas en inglés). Este sistema se generó como aporte del Banco interamericano de Desarrollo (BID) a los países

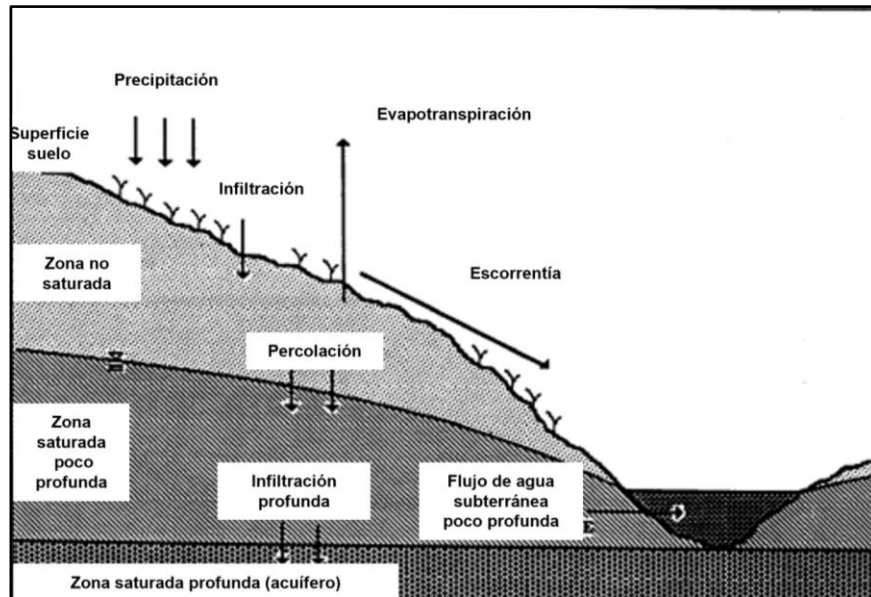


miembros como Argentina, Bahamas, Barbados, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia entre otros, con el fin de aplicar un conjunto integrado de herramienta de simulación de cuenca que incluye modelos de análisis hidrológico y cambio climático para estimar la disponibilidad hídrica de manera regional a nivel de cuencas y subcuencas; con el fin de diseñar medidas para la adaptación al cambio climático y los posibles efectos que tenga en el suministro de agua en las regiones (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Muñoz Castillo, 2014).

Este modelo usa una estructura de datos y topologías de la red de cuencas y drenajes de una base de datos de hidrología analítica (AHD por sus siglas en inglés). Esta base de datos posee información sobre el uso del suelo, características del suelo y su respectivo número de curva para 230.000 cuencas de Latinoamérica y el Caribe (BID, 2022). Además de esto, HYDROBID posee un módulo de interpolación climática en donde a partir de las series de datos diarias de precipitación y temperatura disponibles para el área de estudio realiza una interpolación para cada cuenca aferente y asigna valores medios de estos parámetros.

Este sistema de simulación hidrológica se basa en el modelo estándar Factor de Carga de Cauce Generalizados, (GWLF por sus siglas en inglés) y es mejorado adaptando la metodología de tiempo de retardo enrutamiento, desarrollado por el Research Triangle Institute (RTI). Este modelo de lluvia-escorrentía tiene en cuenta las características y uso del suelo para calcular un volumen de escorrentía estimado teniendo en cuenta los valores de precipitación y temperatura ingresados para luego calcular la evapotranspiración e infiltración con el fin de calcular un flujo base por cuenca, valor al cual se ajusta con el volumen de percolado, y finalmente este flujo es enrutado en la red de drenaje definida en la AHD.

Esta escorrentía que es resultado de la excedencia de la infiltración y el flujo base es una descarga gradual de la capa no saturada, donde todo el volumen que excede el valor de evaporación calculado se infiltra en esta capa; al transcurrir el tiempo, el agua infiltrada se pasa desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el volumen almacenado de la capa saturada. Como se muestra en la Figura 3 el agua de la capa saturada se enruta en el canal de corriente convirtiéndose en flujo de base donde se mezcla con la escorrentía de la cuenca y otros flujos de entrada provenientes de las cuencas de aguas arriba para así generar el volumen de flujo de corriente para el día. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Muñoz Castillo, 2014)



**Figura 3.** Esquema del modelo GWLF

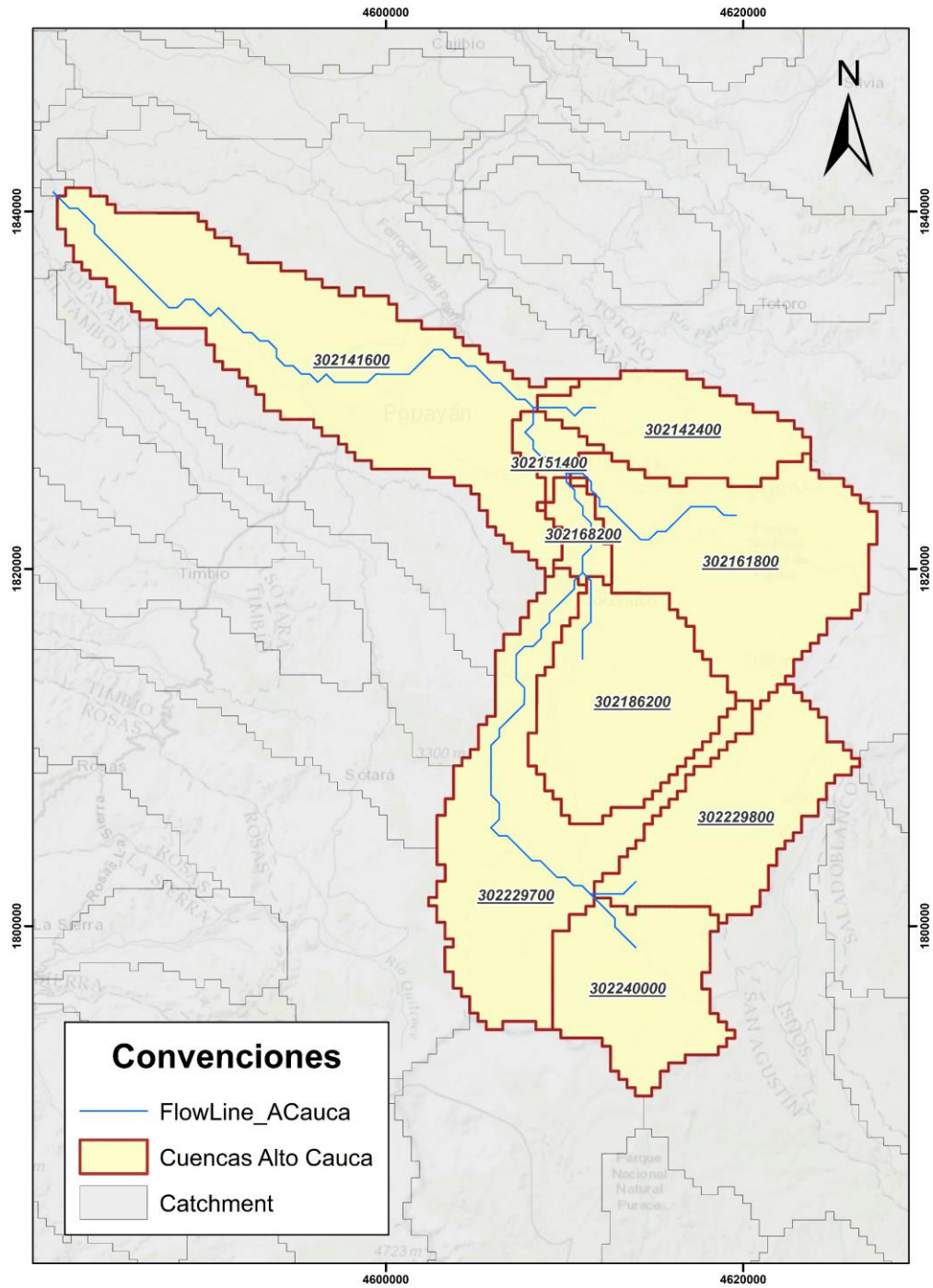
Fuente: Modificado de (Halth, Mandel, & Shyan Wu, 1992)

#### 4.1.2 Delimitación de cuencas aferentes

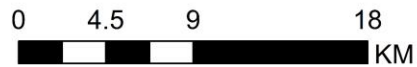
La AHD - LAC contiene datos vectoriales información que brinda la conectividad de las cuencas, cuencas que son representadas por polígonos que poseen un código único de intensificación denominado COMID, además de contener las líneas de flujo que generan la interconexión de las cuencas. Cada una de las cuencas en la base de datos posee la información de tipo de suelo, longitud del drenaje, número de curva entre otros.

Como primer paso para estructurar el modelo del área de estudio se deben identificar las subcuencas aferentes al punto de descarga seleccionado, esta delimitación se realiza usando la base de datos AHD- LAC, visualizada mediante un sistema de información geográfico de acceso libre, en este caso fue usado el programa QGIS. De esta delimitación se obtienen los centroides de cada cuenca objeto de estudio con su respectivo código COMID el cual será el identificador de cada cuenca en todo el desarrollo de la modelación.

La Figura 4 muestra las nueve (9) subcuencas aferentes al punto de descarga delimitadas en el programa QGIS con las subcuencas de la base de datos AHD-LAC, además Tabla 2 muestra los códigos identificadores de cada subcuenca y las coordenadas de su centroide para realizar la interpolación climática. Teniendo en cuenta esto la cuenca donde se definió el punto de descarga es la identificada con el código COMID 302141600



Sistema de coordenadas: MAGNA-SIRGAS Origen-Nacional  
 Proyección: Transverse Mercator  
 Datum: MAGNA  
 Unidad: Metros



**Figura 4.** Subcuencas aferentes de la cuenca del Río Alto Cauca identificadas mediante la base de datos AHD-LAC

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.** Coordenadas de los centroides de las subcuencas aferentes y su respectivo código identificador COMID

COMID	Coordenadas centroide WGS 1984	
	X	Y
302141600	-76.625104	2.472466
302151400	-76.514792	2.426667
302142400	-76.450252	2.437723
302168200	-76.499391	2.384647
302161800	-76.4195	2.371167
302186200	-76.477821	2.298403
302229700	-76.524081	2.231993
302229800	-76.421567	2.241845
302240000	-76.469614	2.155083

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2 Fase 2. Información hidrometeorológica

Teniendo en cuenta la delimitación de las subcuencas, se procede a recopilar la información hidroclimática disponible para el área de estudio. Para esto se realizó la consulta de la información hidroclimatológica oficial suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en su página de consulta y descarga de datos hidrometeorológicos (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>), en donde se encontraron once (11) estaciones con datos de precipitación diarios en mm para el periodo de 1999 a 2020.

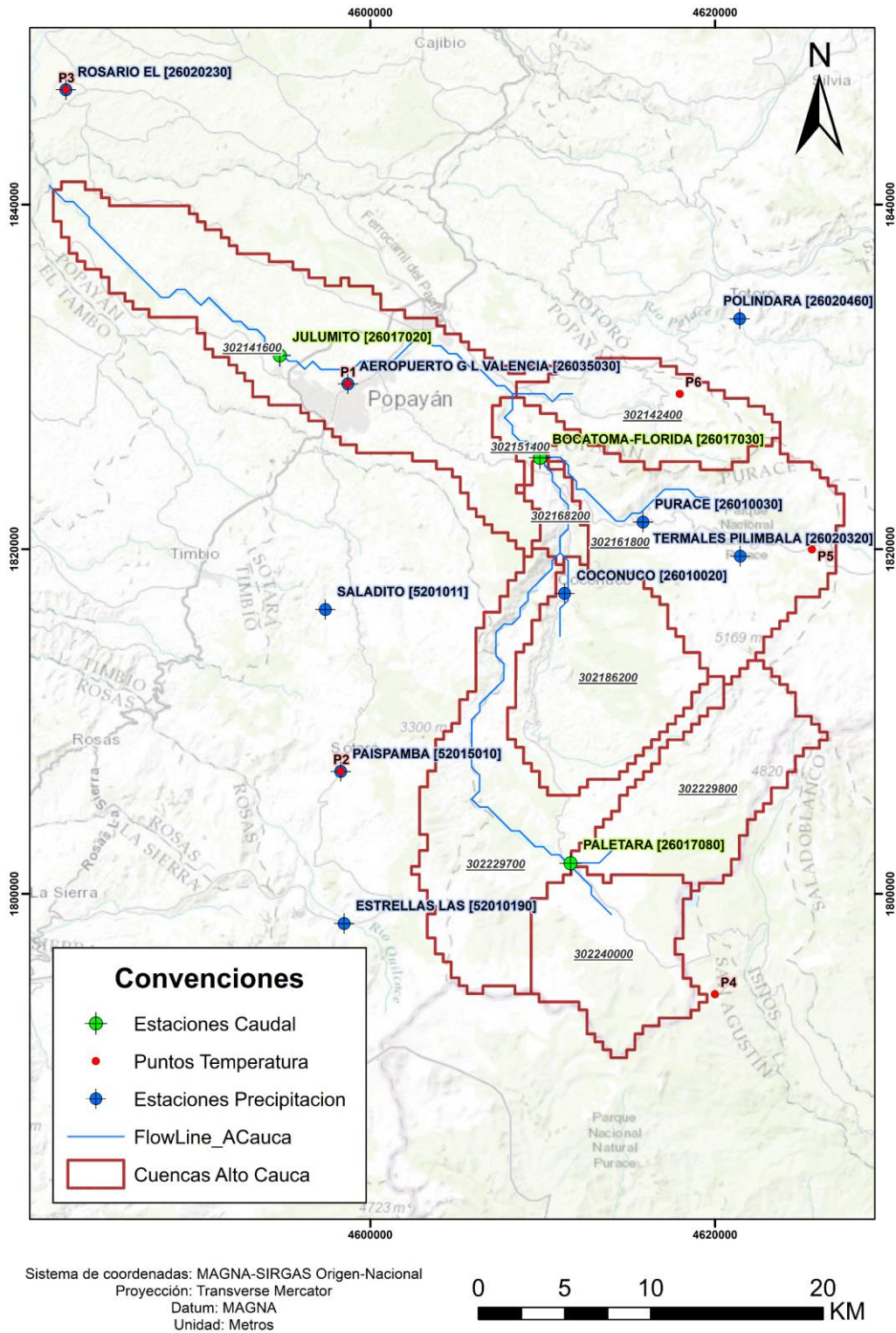
Sin embargo, no se encontraron registros de temperatura para el mismo periodo de tiempo en las estaciones aledañas, así que para las series diarias de temperatura se usó información satelital de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés) más específicamente los datos del proyecto Predicción de Recursos Energéticos Mundiales (POWER por sus siglas en inglés), estos datos se obtienen a partir del dataset de reanálisis de la Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador (GMAO) de los productos satelitales MERRA-2 y del sistema de procesamiento de datos GEOS 5.12.4 (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Estos datos fueron descargados para seis (6) puntos o coordenadas con el fin de abarcar todas las cuencas aferentes, obteniendo series diarias de temperatura en grados centígrados para el periodo de 1999 a 2020.

Además de los datos de precipitación y temperatura, se obtuvieron series de caudal diarias en m<sup>3</sup>/s para tres (3) estaciones del IDEAM (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>) a lo largo del Río Cauca, las cuales se usarán para la calibración del modelo hidrológico en el periodo de 1999 a 2006. La ubicación, nombres, y características de las estaciones y/o puntos seleccionados para realizar la interpolación climática y calibraron de la modelación se muestra en la Figura 5 y Tabla 3.

**Tabla 3.** Estaciones meteorológicas utilizadas para realizar el modelo

Código	Nombre	Tipo de estación	Parámetro	Temporalidad	WGS 1984	
					Coordenada X	Coordenada Y
26035030	AEROPUERTO G L VALENCIA	Climática principal	Precipitación	1999-2020	-76.609	2.453
26010020	COCONUCO	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.496	2.343
52010190	ESTRELLAS LAS	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.610	2.170
21010250	HORNITOS	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.250	1.980
52015010	PAISPAMBA	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.612	2.250
26020460	POLINDARA	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.405	2.488
26010030	PURACÉ	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.455	2.381
52010110	SALADITO	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.620	2.335
52010150	SALINAS	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.589	2.293
26020320	TERMALES PILIMBALA	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.404	2.363
26020230	ROSARIO EL	Pluviómetro	Precipitación	1999-2020	-76.756	2.607
P1	PUNTO 1	Satelital	Temperatura	1999-2020	-76.609	2.453
P2	PUNTO 2	Satelital	Temperatura	1999-2020	-76.496	2.343
P3	PUNTO 3	Satelital	Temperatura	1999-2020	-76.610	2.170
P4	PUNTO 4	Satelital	Temperatura	1999-2020	-76.250	1.980
P5	PUNTO 5	Satelital	Temperatura	1999-2020	-76.612	2.250
P6	PUNTO 6	Satelital	Temperatura	1999-2020	-76.405	2.488
26014080	PALETARA	Limnimétrica	Caudal	1999-2006	-76.492	2.202
26017030	BOCATOMA-FLORIDA	Limnimétrica	Caudal	1999-2006	-76.509	2.414
26017020	JULUMITO	Limnigráfica	Caudal	1999-2006	-76.644	2.468

Fuente: Elaboración propia



**Figura 5.** Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas usadas en la modelación

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.1 Tratamiento y completamiento de datos

Las series de datos hidrometeorológicas son de vital importancia para las modelizaciones hidrológicas sin embargo estos datos pueden verse afectados por errores en la toma de datos o cambios en los instrumentos de medida, y hacen que los datos y conclusiones obtenidas en la elaboración de los modelos sean erróneas.

Teniendo en cuenta esto se realizan pruebas estadísticas con el fin de identificar datos y comportamientos anómalos, además de completar los datos faltantes. Para el presente análisis se utilizó el paquete de programación en R llamado *Climatol* (Guijarro, 2019), el cual tiene funciones de control de calidad homogenización y relleno de datos para distintas variables climatológicas, como precipitación y temperatura.

Este paquete *-Climatol-* en una fase inicial antes de realizar el relleno de datos faltantes, se normaliza la serie de datos utilizando el método de Paulhus y Kohler (1952) el cual completa los datos de precipitación diaria mediante promedios de valores de estaciones cercanas, normalizados mediante división por sus respectivas precipitaciones medias. Además de esto *Climatol* también normaliza los datos restando las medias o por medio de una estandarización completa. Procesos que se muestran a continuación:

##### **Ecuación 1.** Método de Paulhus y Kohler

1. Restar la media:  $x = X - m_X$

2. Dividir por la media:  $x = X/m_X$

3. Estandarizar:  $x = (X - m_X)/s_X$

Fuente: (Guijarro, 2019)

Donde,

$X$ , es la serie de datos

$m_X$ , es la media de la serie  $X$

$s_X$ , es la desviación típica de la serie  $X$

Estos parámetros se calculan de manera provisional con las series incompletas, luego al tener estos valores se llenan los datos faltantes para recalcularlos de nuevo; esto dará como resultados nuevos valores de medias y desviaciones típicas. Este proceso se realiza hasta que ningún valor de la media cambie con respecto a los valores iniciales, seguido a la

estabilización de las medias se normalizan los datos y se calculan con la siguiente expresión:

**Ecuación 2.** Regresión ortogonal

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j}$$

Fuente: (Guijarro, 2019)

Donde

$\hat{y}$  es el dato estimado a partir de  $n$  datos

$x_j$  son los datos más próximos disponibles en el paso temporal

$w_j$  es el peso asignado a cada dato

Esta expresión, estadísticamente corresponde a un modelo de regresión lineal llamado Eje Mayor Reducido o Regresión Ortogonal, este consiste en ajustar la recta reduciendo las distancias de los puntos en dirección perpendicular a esta, en lugar de en dirección vertical como se hace regularmente. Las series que se estiman a partir de esta regresión sirven como referencia para la identificación de anomalías restando los valores estimados a los valores observados, este proceso permite controlar la calidad de las series e identificar y procesar los datos anómalos y comprobar su homogeneidad mediante la aplicación de la prueba SNHT propuesta por Alexandersson (1986).

Cuando los máximos valores SNHT de las series son mayores que un umbral predefinido, la serie se divide por el punto de máximo SNHT, pasando todos los datos antes del cambio a una nueva serie que se añade a las demás con las mismas coordenadas, pero añadiendo un sufijo numérico al código y al nombre de la estación. Este procedimiento se realiza de forma iterativa, partiendo solo las series con mayores valores SNHT en cada ciclo, hasta que no se encuentren más anomalías. Además, como SNHT es una prueba originalmente ideada para encontrar un solo punto de ruptura en una serie, la existencia de dos o más saltos en la media de un tamaño similar podría enmascarar sus resultados. Para minimizar este problema, en una primera pasada se aplica SNHT sobre ventanas temporales solapadas, y después en una segunda pasada se aplica SNHT a las series completas, que es cuando la prueba tiene más poder de detección. Finalmente, una tercera pasada se dedica a rellenar todos los datos ausentes en todas las series y sub-series homogéneas con el mismo procedimiento de estimación de datos explicado anteriormente. Por lo tanto, aunque la

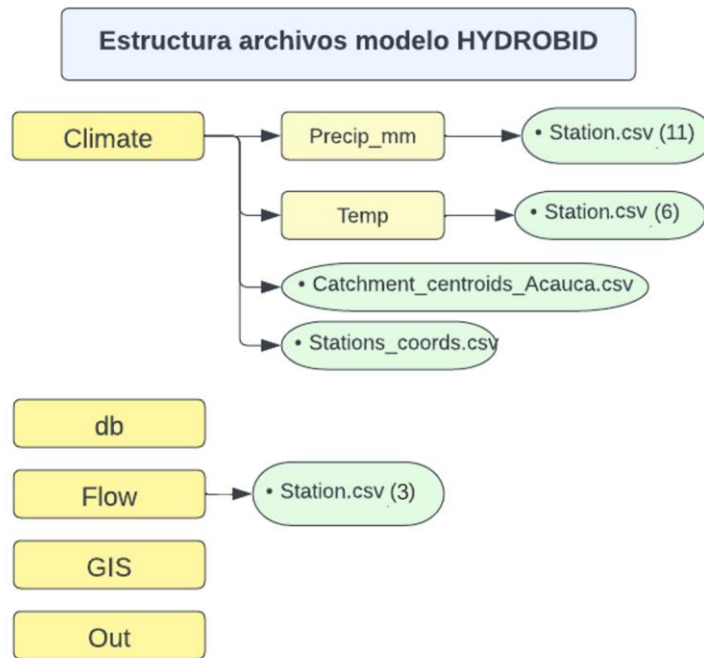


metodología del programa es muy simple, su operación se complica a través de una serie de procesos iterativos anidados (Guijarro, 2019)

### **4.3 Fase 3. Construcción y parametrización del modelo**

Como paso inicial para la construcción del modelo HYDROBID se introducen los datos climáticos previamente tratados estadísticamente, estos se organizan en archivos separados por coma, CSV por sus siglas en inglés (Comma Separated Values), un archivo por estación de precipitación y temperatura; cada archivo contiene los datos diarios de cada parámetro para los veintiún (21) años evaluados, comprendidos del 1 de enero de 1999 al 31 de diciembre de 2020. Además de esto se crean dos archivos CSV adicionales, uno con las coordenadas de los centroides de cada subcuenca, y otro con las coordenadas de las estaciones de los datos climatológicos.

La Figura 6 muestra la estructura de los archivos utilizados, donde en la carpeta Climate se encuentran los archivos mencionados, además de esto se generan carpetas con la base de datos ADH- LAC para la cuenca, carpeta “db”, con los archivos de las series de caudales para la calibración, carpeta “Flow”; la cartografía con los polígonos de las subcuencas de estudio, los centroides de estas y la localización de las estaciones hidrometereológicas, carpeta “GIS” y por último se crea una carpeta donde se guardan los resultados de todas las ejecuciones del modelo, llamada “Out”.



**Figura 6.** Estructura de los archivos

Fuente: Adaptado (BID, 2022)

Luego de estructurar la información se procede a enrutar la información en la herramienta Climate Data Interpolating Tool, para como su nombre lo indica generar las interpolaciones para cada subcuenca, teniendo en cuenta la ubicación de los centroides de cada una de estas y las estaciones meteorológicas. Esto con el fin de generar en la base de datos, una nueva tabla que incluya los valores de precipitación y temperatura media asociada a cada COMID.

Teniendo todos los datos, se configuran y enrutan todos los archivos para realizar la modelación en donde se definen el nombre del proyecto, la cuenca a modelar, las fechas de inicio y fin de la modelación, paso seguido se realiza la parametrización del modelo teniendo en cuenta que en la primera ejecución se tienen valores por defecto. Los parámetros que presenta el modelo y su descripción se muestran a continuación en la Tabla 4.

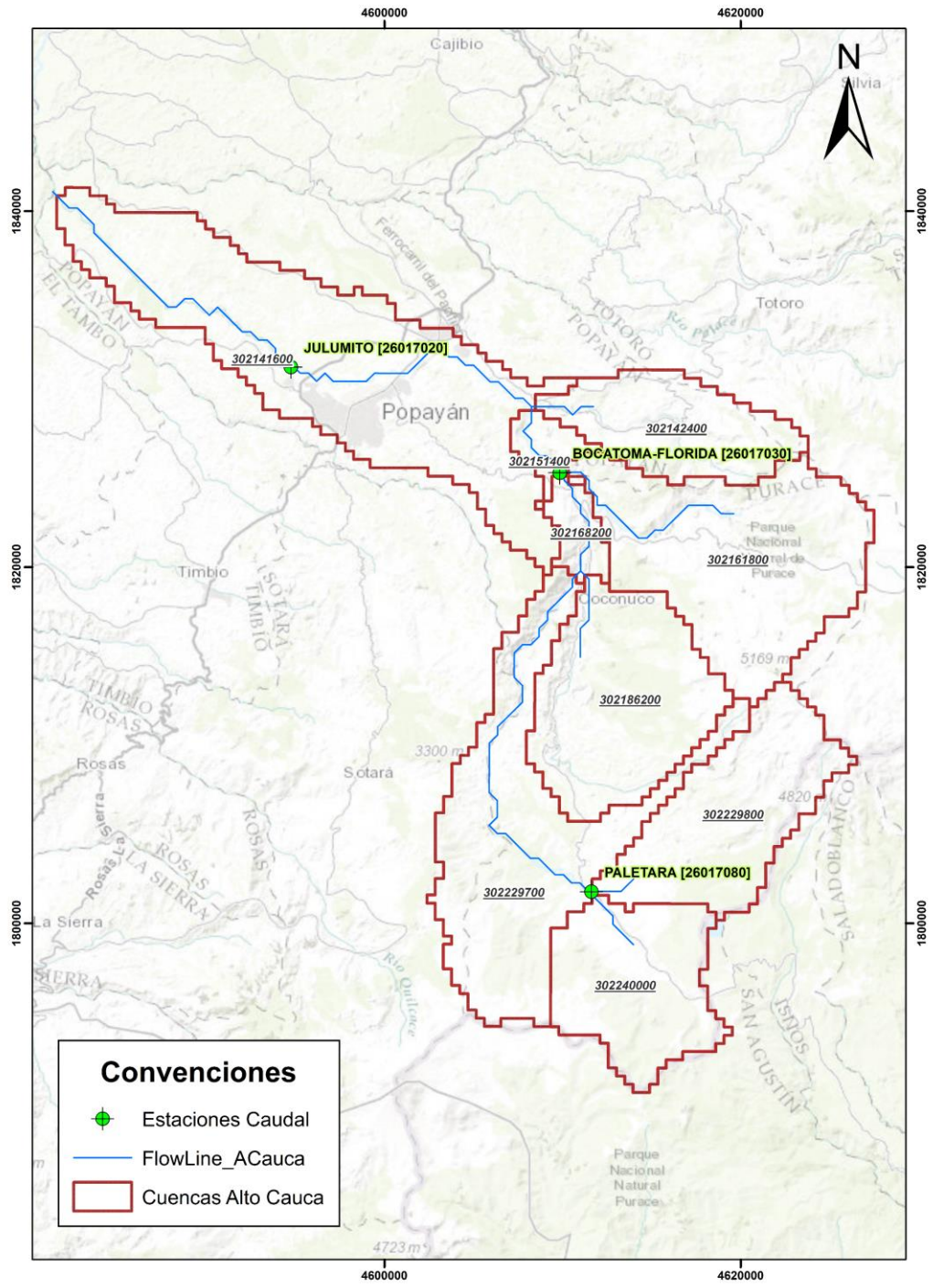
**Tabla 4.** Parámetros de calibración del modelo

Parámetro	Descripción	Observación	Valor por defecto
Número de curva (NC)	Parámetro que representa la capacidad de cada tipo de suelo de generar escorrentía superficial, contra la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía.	Tiene una relación directamente proporcional con los caudales altos	1
Contenido disponible de agua (CDA)	Estima el monto de agua que se puede almacenar en el suelo para ser usado por las plantas, afectando la infiltración hacia las aguas subterráneas, activa el inicio de la percolación.	Su modificación tiene mayor impacto en los caudales bajos, interacciona con el coeficiente de recesión y altera el caudal	1
Coefficiente de recesión	Caracteriza como el agua subterránea cerca de la superficie contribuye a los caudales en los ríos después de un evento de grandes caudales, controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado.	Tiene una relación directamente proporcional con la pendiente de la curva de duración	0,01
Coefficiente de percolación	Corresponde al intercambio entre agua cerca de la superficie hacia las zonas más profundas del terreno y los acuíferos, controla la tasa de filtración en el acuífero subterráneo.	Tiene una relación inversamente proporcional con el volumen de escorrentía	0,005
Factor ET de la estación de cultivo	Es el factor de evapotranspiración de las plantas durante la etapa de cultivo		1
Factor ET de la estación de latencia	Es el factor de evapotranspiración en la etapa donde no se encuentra cultivada la zona		1

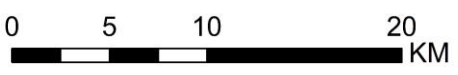
Fuente: (BID, 2022)

#### 4.4 Fase 4. Calibración del modelo

Después de realizar la parametrización del modelo, la primera modelación se realiza para la subcuenca 302229800 en la cual se encuentra ubicada la estación PALETARA, seguido se ejecuta el modelo para la subcuenca 302151400 donde se encuentra la estación BOCATOMA-FLORIDA. Y por último se calibra la subcuenca 302141600 la cual es el punto de descarga de la cuenca del Río Alto Cauca con la estación JULUMITO (Figura 7).



Sistema de coordenadas: MAGNA-SIRGAS Origen-Nacional  
 Proyección: Transverse Mercator  
 Datum: MAGNA  
 Unidad: Metros



**Figura 7.** Estaciones de caudal utilizadas para la calibración del modelo

Fuente: Elaboración propia

Los registros de caudal disponibles para la calibración abarcan siete (7) años, desde el 1 de enero de 1999 a el 31 de diciembre de 2006, la Tabla 5 muestra los detalles de las estaciones seleccionadas.

**Tabla 5.** Estaciones usadas para la calibración del modelo

Código	Nombre	COMID	Tipo de estación	Temporalidad	WGS 1984	
					Coordenada X	Coordenada Y
26014080	PALETARA	302229800	Limnimétrica	1999-2006	-76.492	2.202
26017030	BOCATOMA-FLORIDA	302151400	Limnimétrica	1999-2006	-76.509	2.414
26017020	JULUMITO	302141600	Limnigráfica	1999-2006	-76.644	2.468

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar la calibración, se debe evaluar la validez de la modelación, para esto HYDROBID tiene una serie de variables estadísticas presentados en la Tabla 6, donde además se presentan los rangos de valores para que se tenga una modelación óptima según lo propuesto por el BID (2022)

**Tabla 6.** Estadísticos de validación de la calibración del modelo

Parámetro	Descripción	Valor óptimo
Overall Volume Error	Indica la media del porcentaje de error entre los valores simulados y los valores observados.	-30% al 30%
Correlation (r)	Analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas.	$\approx 1$
Modified Correlation Coefficient (rmod)	Analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, aplicando un factor que relaciona los valores mínimos y los máximos.	$\approx 1$
Nash- Sutcliffe Efficiency (R <sup>2</sup> )	Analiza la magnitud de la relación entre las varianzas de los flujos simulados y las varianzas de los flujos observados.	$\geq 0,6$

Fuente: (BID, 2022)

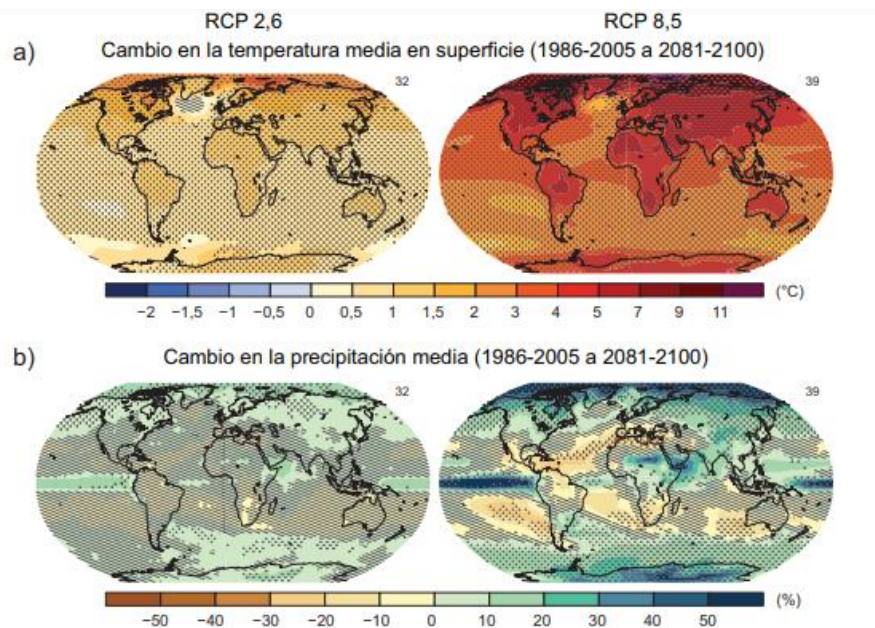
Además de estos parámetros estadísticos se tendrán en cuenta las curvas de duración de caudal e hidrogramas para la evaluación de coherencia entre los volúmenes modelados y los volúmenes observados.

#### **4.5 Fase 5. Escenarios de cambio climático**

Con el fin de evaluar los escenarios de cambio climático en la cuenca de estudio se emplearon tres escenarios contemplados en el proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) del Programa World Climate Research (WCRPs) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Este proyecto se centra en la comprensión de los cambios climáticos que se han presentado y se presentaran, teniendo en cuenta un contexto multimodelo, en donde los diferentes escenarios brindan varios futuros climáticos simulados que se pueden utilizar como base para explorar los impactos del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico. (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2011).

Dentro de este proyecto, para el presente estudio se evaluaron tres escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés): RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, estos escenarios constituyen simulaciones a largo plazo teniendo en cuenta las varias tendencias del Forzamiento radiativo (FR). Este parámetro indica el flujo neto de energía radiativa en la parte superior de la atmosfera, y cuantifica en unidades de vatios por metro cuadrado, la potencia de los procesos naturales y antropogénicos que alteran el balance energético de la tierra impulsando el cambio climático (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022).

Estos escenarios comprenden diferentes medidas en mitigación en la concentración de gases de efecto invernadero, el primero, RCP 2.6 representa un nivel de forzamiento muy bajo, un escenario de estabilización, RCP 4.5 y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases efecto invernadero, RCP 8.5. Como resultado de estos escenarios se tienen los cambios en la precipitación y temperatura como pueden observarse en la Figura 8.



**Figura 8.** Mapas de resultados de modelos múltiples del (CMIP5) de los escenarios RCP 2.6 y 8.5  
Fuente: (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC), 2013)

Para evaluar estos escenarios en HYDROBID se realiza la descarga de la información de precipitación media mensual multianual para el departamento del Cauca para el periodo comprendido entre 1990-2020, como se observa en la Tabla 7, teniendo un valor medio de 219.45 mm.

**Tabla 7.** Precipitación media para el departamento del Cauca en el periodo 1990-2020

Mes	Precipitación (mm)
Enero	181.32
Febrero	185.35
Marzo	232.47
Abril	242.48
Mayo	262.7
Junio	179.97
Julio	143.32
Agosto	131.81
Septiembre	200.82
Octubre	266.53
Noviembre	319.32
Diciembre	287.34
<b>Media</b>	<b>219.45</b>

Fuente: (World Climate Research (WCRPs), 2013)

Además de las precipitaciones medias históricas también se recopiló la información de anomalías de precipitación y temperatura en el departamento del Cauca para los tres escenarios evaluados (Tabla 8). Los valores de temperatura se introducen en el módulo de cambio climático de manera mensual, sin embargo, para los datos de precipitación es necesario hallar un multiplicador el cual se calcula haciendo una relación de la media de las anomalías mensuales, y la media de las precipitaciones históricas, dando como resultado los valores presentados en la Tabla 9.

**Tabla 8.** Anomalías de temperatura y precipitación para el periodo 2020-2039 en el escenario RCP 2.6, 4.5 y 8.5

Mes	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Temperatura	Precipitación (mm)	Temperatura	Precipitación (mm)	Temperatura	Precipitación (mm)
Enero	0.81	-5.69	0.89	-8.13	0.97	-7.82
Febrero	0.82	-4.52	0.91	4.61	0.98	6.87
Marzo	0.69	2.73	0.85	4.36	0.92	3.68
Abril	0.74	5.57	0.79	20.65	0.94	1.1
Mayo	0.78	1.56	0.88	58.08	0.98	13.61
Junio	0.8	-6.79	0.89	58.19	1.02	4.1
Julio	0.91	3.28	0.9	17.02	1.14	1.1
Agosto	0.77	3.94	0.82	13.3	1.04	-1.76
Septiembre	0.73	-11.55	0.91	-8.98	1.08	-6.33
Octubre	0.68	-28.42	0.91	-13.84	0.92	-14.6
Noviembre	0.72	11.83	0.82	16.64	0.92	22.82
Diciembre	0.79	17.8	0.88	11.75	0.97	1.1
	<b>Media</b>	<b>-0.86</b>	<b>Media</b>	<b>14.47</b>	<b>Media</b>	<b>1.99</b>

Fuente: (World Climate Research (WCRPs), 2013)

Como se mencionó con anterioridad al hallar el multiplicador para la modelación de cada uno de los escenarios, también se tiene el cambio porcentual en la precipitación media, en donde para el primer escenario (RCP 2.6) hay una reducción del 0.39%, para el segundo escenario (RCP 4.5) un aumento del 6.59% y por último para el escenario RCP 8.5 un aumento del 0.91% (Tabla 9).



**Tabla 9.** Multiplicador y porcentaje de cambio de la precipitación en los diferentes escenarios

Escenario	Multiplicador	% Cambio en la precipitación
RCP 2.6	1.0	-0.39%
RCP 4.5	1.07	6.59%
RCP 8.0	1.01	0.91%

Fuente: Elaboración propia con base en (World Climate Research (WCRPs), 2013)

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Tratamiento de datos hidrometeorológicos

Como primer paso para el tratamiento estadístico de los datos, se realiza análisis exploratorio de los datos climáticos para identificar la cantidad de datos faltantes, para el caso de los datos de temperatura al ser datos satelitales no presentan datos faltantes. Por otra parte, los datos de precipitación y caudal de las estaciones del IDEAM si presentan datos faltantes en los periodos de tiempo evaluados, es decir 21 y 7 años respectivamente.

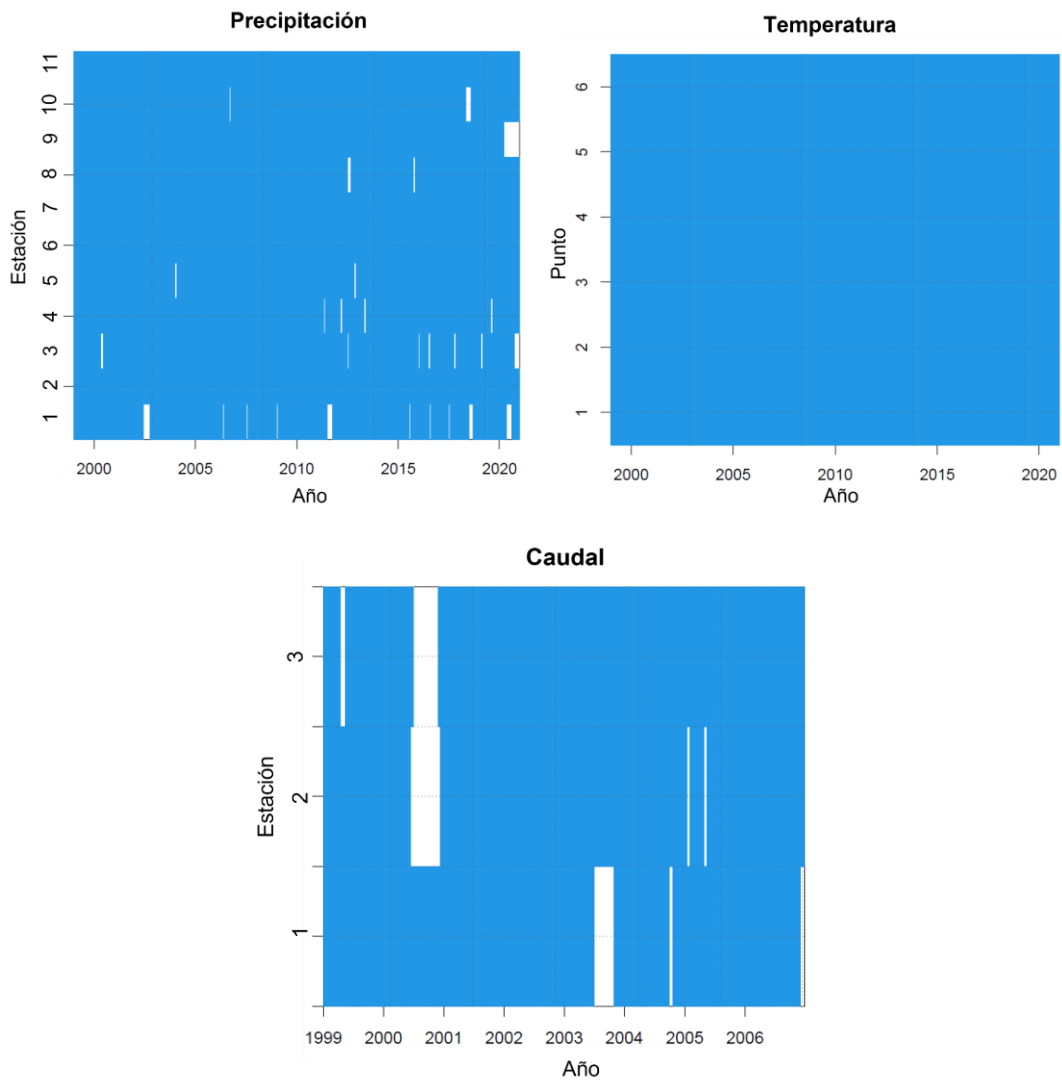
La relación de la cantidad y porcentaje de registros faltantes para cada estación y/o punto se presentan en la Tabla 10 y Figura 9, donde los porcentajes faltantes varían del 0 al 8.3%, siendo la estación PALETARA la que presenta mayor cantidad de datos faltantes y la estación PURACÉ la única estación que posee la serie de datos completa.

**Tabla 10.** Relación de las faltantes en las estaciones y/o puntos de precipitación, temperatura y caudal

ID	Nombre	Cantidad de días faltantes	% de días faltantes	Parámetro
1	AEROPUERTO G L VALENCIA [26035030]	600	7.5	Precipitación
2	COCONUCO [26010020]	5	0.06	Precipitación
3	ESTRELLAS LAS [52010190]	342	4.26	Precipitación
4	HORNITOS [21010250]	145	1.8	Precipitación
5	PAISPAMBA [52015010]	71	0.88	Precipitación
6	POLINDARA [26020460]	4	0.049	Precipitación
7	PURACÉ [26010030]	0	0	Precipitación
8	SALADITO [5201011]	143	1.78	Precipitación
9	SALINAS [5201015]	289	3.59	Precipitación
10	TERMALES PILIMBALA [26020320]	137	1.7	Precipitación
11	ROSARIO EL [26020230]	4	0.05	Precipitación
1	Punto 1	0	0	Temperatura

ID	Nombre	Cantidad de días faltantes	% de días faltantes	Parámetro
2	Punto 2	0	0	Temperatura
3	Punto 3	0	0	Temperatura
4	Punto 4	0	0	Temperatura
5	Punto 5	0	0	Temperatura
6	Punto 16	0	0	Temperatura
1	PALETARA	179	6.13	Caudal
2	BOCATOMA- FLORIDA	243	8.32	Caudal
3	JULUMITO	195	6.67	Caudal

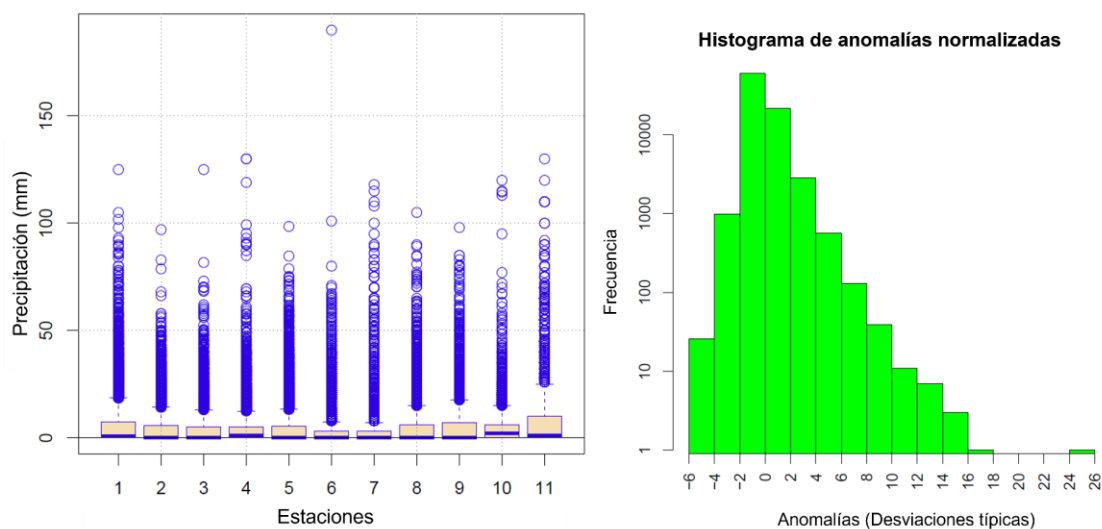
Fuente: Elaboración propia



**Figura 9.** Datos faltantes de las estaciones o puntos de precipitación, temperatura y caudal

Fuente: Elaboración propia

Luego de la identificación de los faltantes se realiza la homogenización y relleno de los datos faltantes realizando la regresión ortogonal y aplicando la prueba SNHT contemplando las anomalías de las desviaciones típicas. Para el caso de las series de precipitación como puede observarse en la Figura 10, los datos mensuales poseen muchos datos anómalos, sin embargo, no todos estos datos son sujetos de modificación o eliminación ya que por las características de la cuenca se han presentado precipitaciones muy altas asociadas a diferentes fenómenos climatológicos; al realizar la parametrización mediante las desviaciones típicas, se decide no considerar los datos que presentan más de 16 desviaciones típicas dada a su poca frecuencia. (Anexo A. Series de datos/ Precipitación)

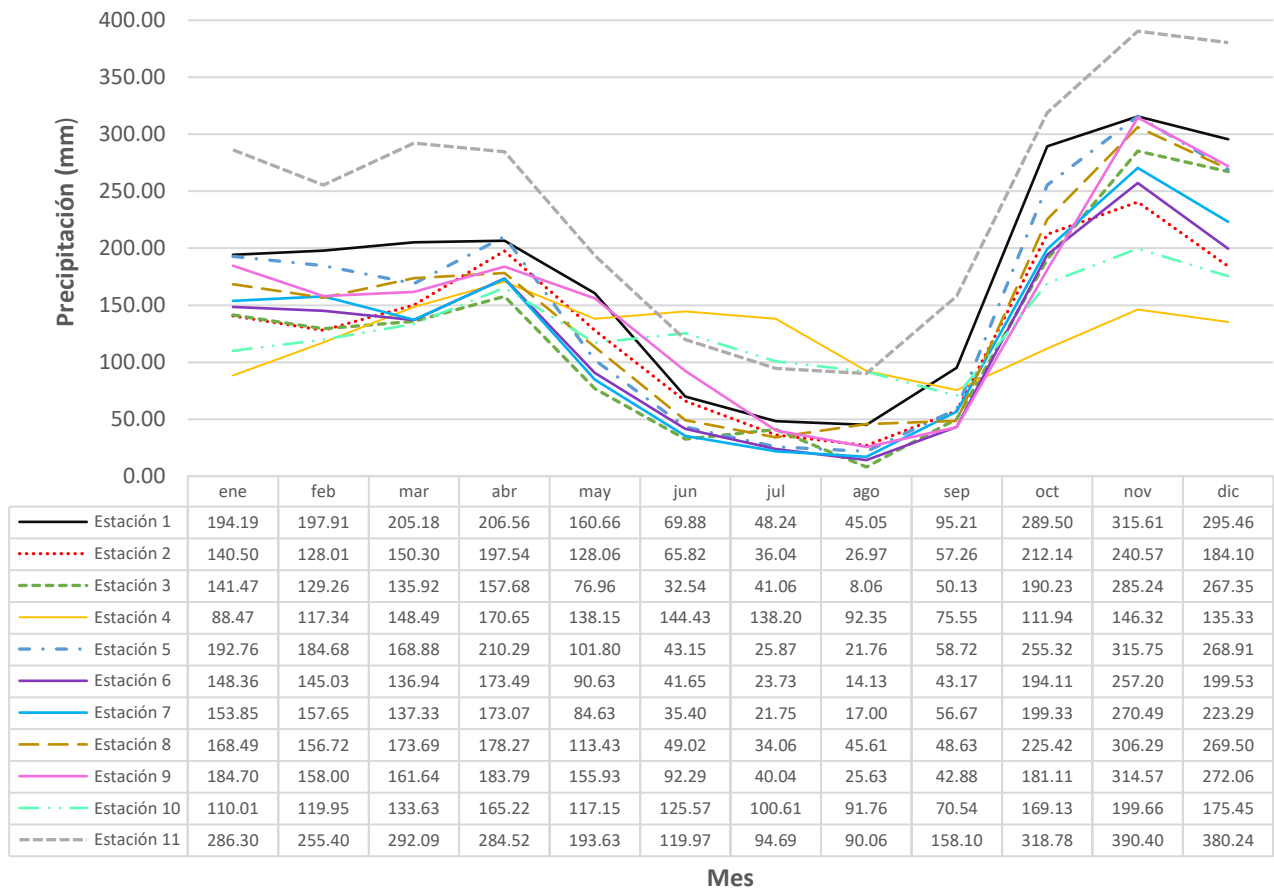


**Figura 10.** Diagrama de cajas de los datos diarios de precipitación y sus respectivas anomalías

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar homogenización de los datos se tienen las series completas de las once (11) estaciones consideradas para la modelación, de lo cual se puede concluir que la cuenca del Río Alto Cauca tiene un comportamiento de lluvias bimodal, donde las temporadas de mayor precipitación corresponden a los meses de febrero - abril y octubre – noviembre; y las temporadas con menores precipitaciones se presentan en los meses de mayo -septiembre y diciembre-enero (Figura 11).

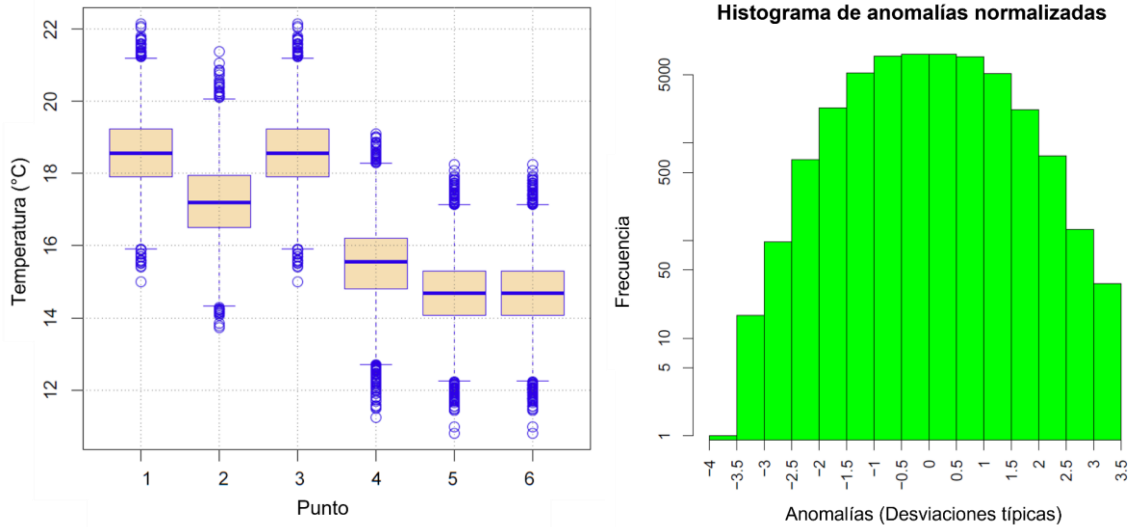
Además de esto también puede evidenciarse que la estación con promedios medios mensuales más altos corresponde a la estación 11 ROSARIO EL, ubicada al noroccidente de la cuenca y la estación con los valores más bajos la estación 10 TERMALES PIMBALA, la cual se encuentra ubicada en el este de la cuenca en la subcuenca 302161800. Y el promedio mensual de todas las estaciones es de 148.37 mm.



**Figura 11.** Precipitación media mensual multianual para las estaciones evaluadas

Fuente: Elaboración propia con base en base datos IDEAM

Para los datos de temperatura se realizó el mismo tratamiento estadístico, sin embargo, no se realizó relleno de datos faltantes ya que todas las series estaban completas, pero si se analizaron los datos anómalos. Como puede observarse en la Figura 13 las series de temperatura presentan mucha más homogeneidad con respecto a los datos de precipitación, y que los valores atípicos se encuentran agrupados y muy cerca al valor máximo de la serie, además los valores donde se tienen anomalías de -4 a 3 desviaciones típicas. Teniendo el histograma de estas anomalías no se tienen en cuenta los valores menores a -3.5. (Anexo A. Series de datos/ Temperatura)



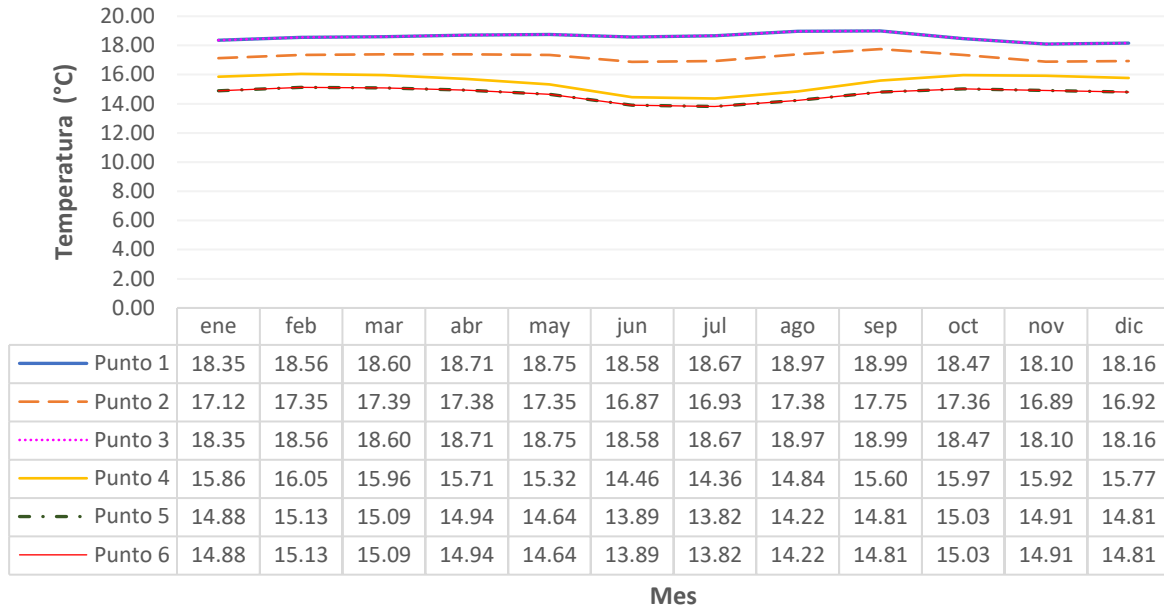
**Figura 12.** Diagrama de cajas de los datos diarios de temperatura y sus respectivas anomalías

Fuente: Elaboración propia

Paso seguido, se obtienen la serie de datos homogenizada lista para ser ingresada en la modelación de HYDROBID; como se observa en la Figura 13 dos pares de estaciones presentan un comportamiento muy similar: las número 1 y 3 siendo estas la ubicadas más al norte de la cuenca con un promedio mensual de 18.35 °C, presentando los valores más altos para toda la cuenca.

En contraste el otro par de estaciones que presentan el mismo comportamiento son las número 5 y 6, las cuales tienen los valores más bajos de la cuenca con un promedio mensual de 14.68 °C. estas se encuentran ubicadas hacia el este del área de estudio sobre las subcuencas 302161800 y 302142400 respectivamente.

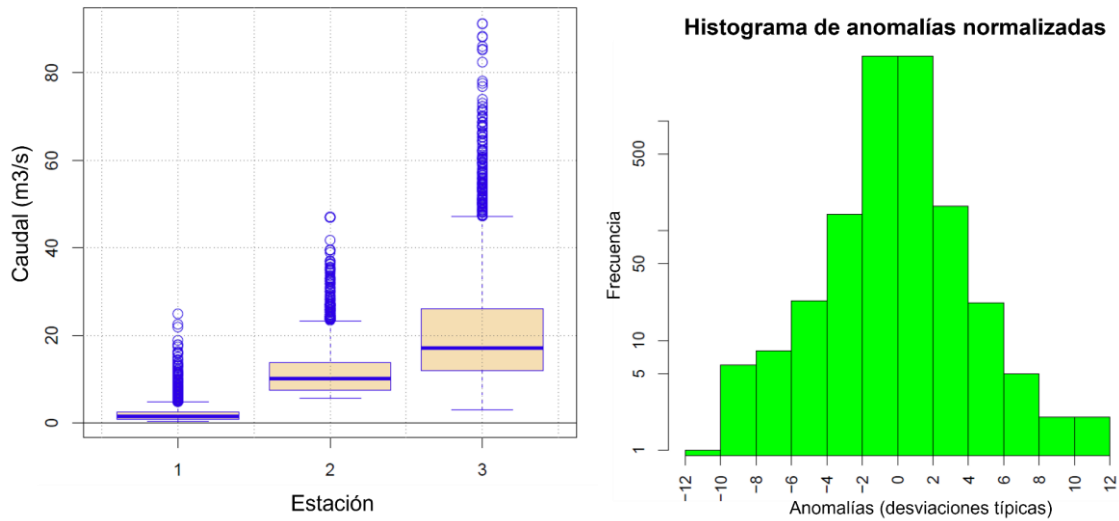
En cuanto al comportamiento temporal se evidencia que las estaciones presentan similitudes, en donde las temporadas más cálidas se asocian a los meses de enero-abril y septiembre-diciembre.



**Figura 13.** Temperatura media mensual multianual para las estaciones evaluadas

Fuente: Elaboración propia con base en base datos de la NASA

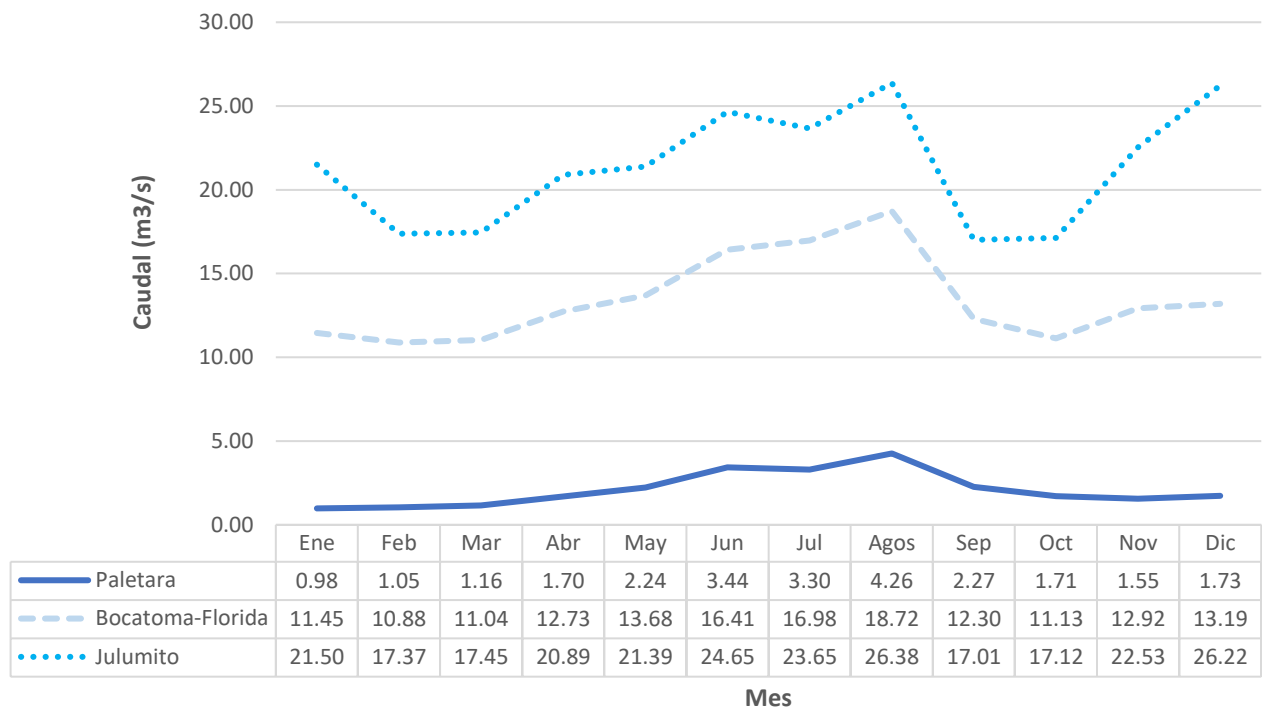
Por último, para realizar la calibración del modelo se utilizan los datos de caudal disponibles para cada cuenca, como se mencionó en el numeral 4.4 Fase 4. Calibración del modelo. Estos datos comprenden el periodo de 1999 a 2006 para tres (3) estaciones ubicadas a lo largo de la cuenca, Paletara, Bocatoma- Florida y Julumito implementando los datos climatológicos, realizando la homogenización y relleno de datos faltantes de cada estación. Como se presenta en la Figura 14 las series de caudal presentan muchos valores altos anómalos además de incrementar sus valores en función de su ubicación en la cuenca, la estación 1 – Paletara siendo la estación que se encuentra en la parte alta de la cuenca, la estación 2 – Bocatoma Florida ubicada en la parte media de la cuenca y la estación 3 Julumito la cual corresponde a la estación ubicada en la cuenca del punto de descarga. Para estos datos se tomaron anomalías de hasta 10 desviaciones típicas (Anexo A. Series de datos/ Caudal)



**Figura 14.** Diagrama de cajas de los datos diarios de caudal y sus respectivas anomalías

Fuente: Elaboración propia

La Figura 15 muestra el comportamiento de los datos después de realizar el tratamiento estadístico, se puede observar que los datos aumentan en función de la ubicación de las estaciones en la cuenca, donde en la estación Paletara se presentan los valores más bajos y los más altos en la estación Julumito. Las tres estaciones presentan un comportamiento similar teniendo un incremento de los caudales medios mensuales en los meses de agosto y junio y los valores más bajos en los meses de septiembre a noviembre y febrero a marzo. Los valores medios de caudal anual son de 2.11 m<sup>3</sup>/s para la estación 1 – Paletara ubicada en la parte alta del área sobre la subcuenca 302229800, para la estación 2- Bocatoma-Florida ubicada en la parte media sobre la subcuenca 302151400 es de 13.45 m<sup>3</sup>/s, y por último la estación 3 – Julumito ubicada en la parte baja de cuenca sobre la subcuenca de descarga 302141600 con un promedio de 21.35 m<sup>3</sup>/s (Anexo A. Series de datos/ Caudal)



**Figura 15.** Caudales medios mensuales multianuales para las estaciones de calibración

Fuente: Elaboración propia con base en base datos IDEAM

## 5.2 Construcción, parametrización y calibración del modelo

Al tener las series climáticas debidamente completadas y homogenizadas se realiza la interpolación climática para realizar las modelaciones, como se mencionó anteriormente en la descripción de la metodológica, seguido a esto se realiza la parametrización de las modelaciones ajustando los valores definidos por defecto en HYDROBID de las variables presentadas en el numeral 4.3 Fase 3. Construcción y parametrización del modelo hasta a llegar a el mejor ajuste posible. Junto a esto se realizó la calibración con la serie de datos homogenizadas y completad de las tres (3) estaciones de caudal presentadas en la Figura 7 ubicadas sobre el Río Cauca.

A continuación, se presenta la calibración de cada una de las estaciones, teniendo en cuenta su ubicación presentándolas desde la parte alta a la parta baja de cuenca, iniciando con la estación Paletara (ubicada sobre la subcuenca 302229800), seguida por la estación Bocatoma-Florida (ubicada sobre la subcuenca 302151400), y terminando en la estación Julumito (ubicada sobre la subcuenca 302141600).



### 5.2.1 Calibración subcuenca 302229800 - Estación Paletara

La primera calibración realizada se realizó teniendo en cuenta los datos de la estación Paletara ubicada en la parte alta de la cuenca sobre la subcuenca 302229800 para esto se realiza la construcción y parametrización del modelo con los valores presentados en la Tabla 11 logrando un ajuste gráfico aceptable. Los parámetros que fueron modificados fue el número de curva, el coeficiente de recesión y el de percolación.

**Tabla 11.** Valores de los parámetros de calibración definidos para la calibración subcuenca 302229800

Parámetro	Valor
Número de curva (NC)	1.6
Contenido disponible de agua (CDA)	0.6
Coefficiente de recesión	0.0099
Coefficiente de percolación	0.003
Factor ET de la estación de cultivo	1
Factor ET de la estación de latencia	1

Fuente: Elaboración propia

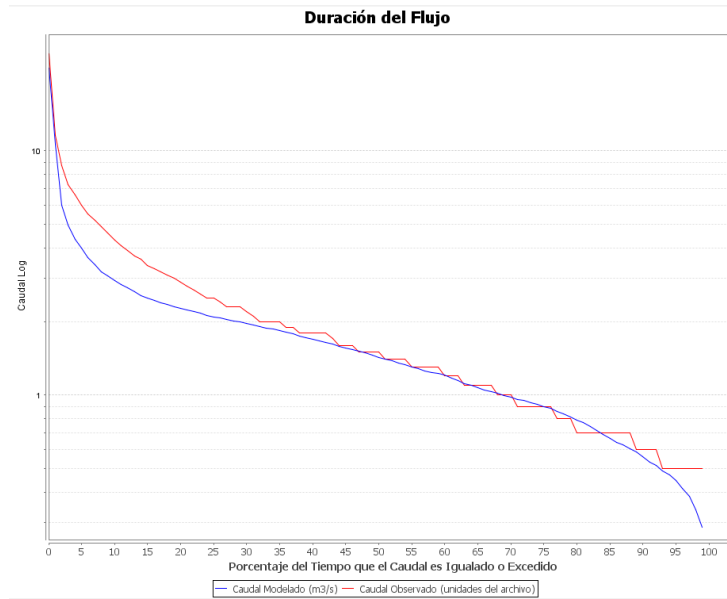
Para evaluar un ajuste adecuado de los caudales modelados se comparan los valores óptimos propuestos por el BID (2022) de los estadísticos de validación, presentados en la Tabla 12, donde se evidencia que estos no alcanzan estos valores propuestos ni a nivel diario, ni a nivel mensual.

**Tabla 12.** Estadísticos de validación del modelo para la subcuenca 302229800

Parámetro	Valor diario	Valor mensual
Overall Volume Error	-23.22	-23.77
Correlation (r)	-0.05	-0.25
Modified Correlation Coddicient (rmod)	-0.03	-0.14
Nash- Sutcliffe Efficiency (R <sup>2</sup> )	-0.6	-0.76

Fuente: Elaboración propia

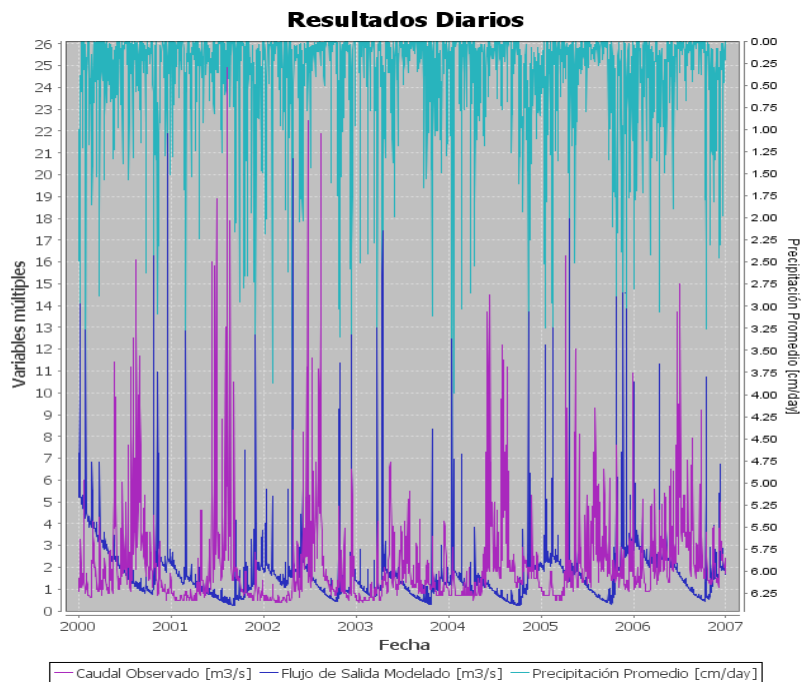
Aunque esta modelación no se cumple con los parámetros estadísticos de validación de manera gráfica en la curva de duración de caudales (Figura 16) donde se muestra el flujo modelado vs el observado, evidenciando una calibración aceptable, en cuanto al volumen y pendiente de la curva, sin embargo, en los valores menores de 5% al 30% del tiempo no se logró un ajuste tan bueno como en resto de la curva.



**Figura 16.** Curva de duración de caudal cuenca 302229800

Fuente: Elaboración propia

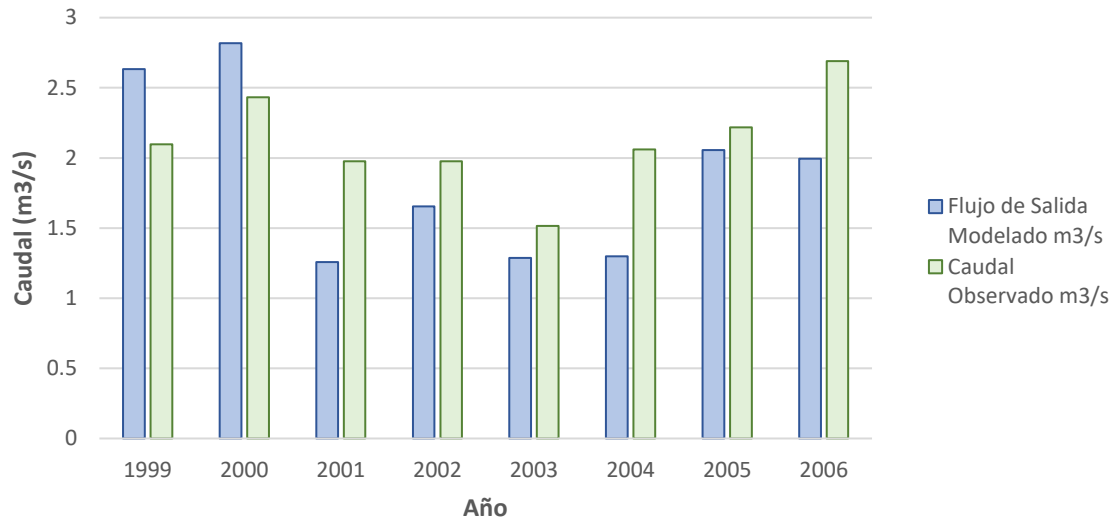
En cuanto a los registros diarios de caudal se evidencia una buena calibración en los caudales más altos, pero se sobreestiman los caudales más bajos como se observa en la Figura 17



**Figura 17.** Caudales diarios modelados vs observados

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los volúmenes anuales modelados la Figura 18 muestra una discrepancia con respecto a los caudales observados, siendo los dos primeros años 1999 y 2000 sobreestimados en un 25% y 15% respectivamente, aunque cabe aclarar que el primer año de la modelación se establece como año de calentamiento. En los años restantes se observa una subestimación del volumen de hasta el 36% en los años 2001 y 2004.



**Figura 18.** Comparación de caudales anuales modelados vs observados  
Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2 Calibración subcuena 302151400 – Estación Bocatoma Florida

Teniendo en cuenta los valores de la calibración anterior se ejecuta la segunda modelación con los datos de la estación Bocatoma Florida ubicada sobre la subcuena 302151400, modificando los valores definidos por defecto para cada uno de los parámetros presentados en la Tabla 13, modificando los valores de CDA, el coeficiente de percolación, el coeficiente de recesión este último fue el que influyó más en la calibración de manera gráfica.

**Tabla 13.** Valores de los parámetros de calibración definidos para la calibración subcuena 302151400

Parámetro	Valor
Número de curva (NC)	1.5
Contenido disponible de agua (CDA)	0.1
Coeficiente de recesión	0.0099
Coeficiente de percolación	0.004
Factor ET de la estación de cultivo	1
Factor ET de la estación de latencia	1

Fuente: Fuente: Elaboración propia

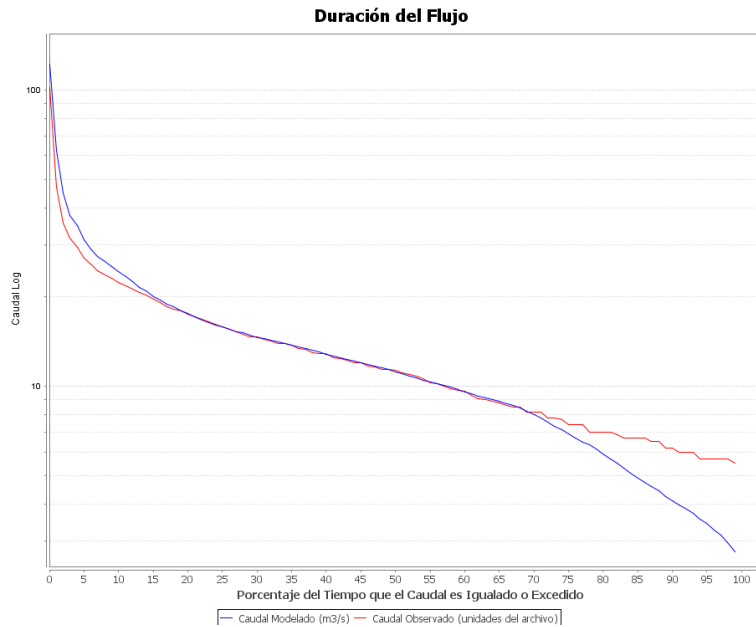
Aunque este fue el mejor ajuste logrado para esta modelación los estadísticos de validación diarios y mensuales presentados en la Tabla 14 no se encuentran dentro de los valores óptimos

**Tabla 14.** Estadísticos de validación del modelo para la subcuenca 302151400

Parámetro	Valor diario	Valor mensual
Overall Volume Error	2.08	1.43
Correlation (r)	0.06	-0.05
Modified Correlation Coefficient (rmod)	0.04	-0.04
Nash- Sutcliffe Efficiency (R <sup>2</sup> )	-1.87	-2.05

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, de manera gráfica se puede evidenciar un mejor ajuste en relación con el volumen total del flujo, como se muestra en la Figura 19, la calibración logro ajustar la pendiente de la curva, exceptuando los porcentajes de tiempo mayores al 70% en donde no pudo lograrse un ajuste optimo.

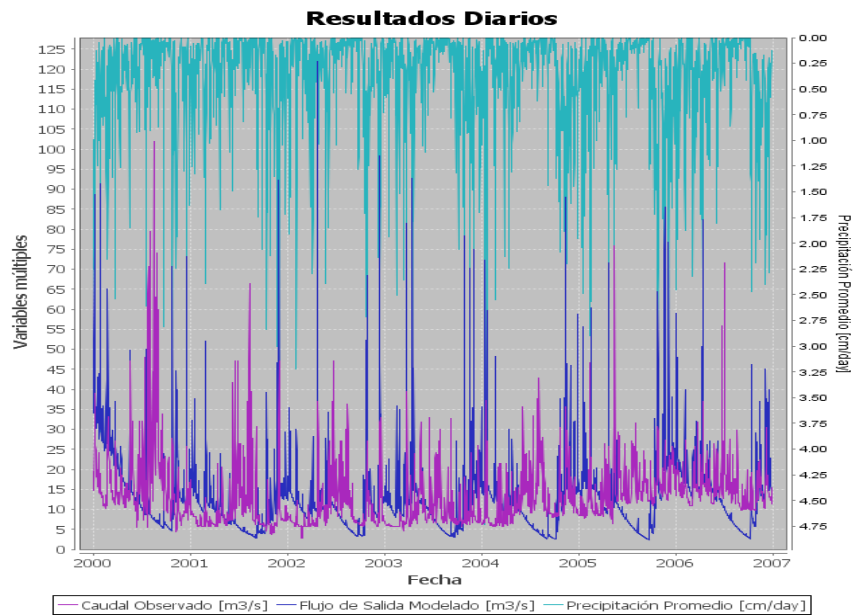


**Figura 19.** Curva de duración de caudal cuenca 302151400

Fuente: Elaboración propia

Además de esto en cuanto a las distribuciones diarias en la Figura 20 se ve una discrepancia entre el caudal modelado y observado, sobre todo en los caudales bajos los cuales son subestimados, los caudales altos son mejor representados en esta modelación al igual que

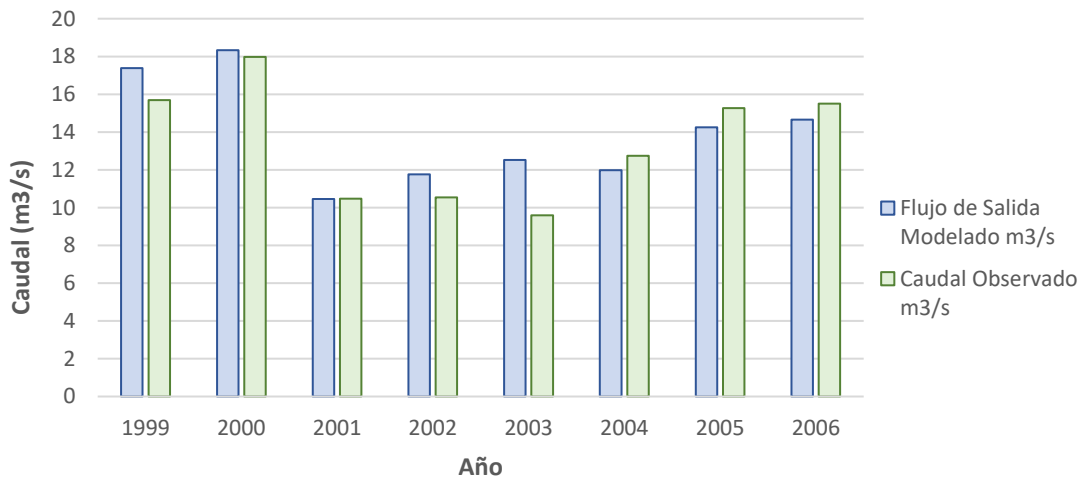
en la calibración de la estación aguas arriba, Paletara.



**Figura 20.** Caudales diarios modelados vs observados

Fuente: Elaboración propia

Esta discrepancia también puede verse a nivel anual (Figura 21) sobre todo en los años 2003 donde el caudal observado es sobrestimado en  $\approx 30\%$ , 2002 donde el caudal es sobrestimado en  $\approx 11\%$  y el año 1999 donde el caudal es sobrestimado en  $\approx 10\%$ . Los años restantes presentarán discrepancias de subestimación de los caudales observados de hasta un 6%, en el año 2005.



**Figura 21.** Comparación de caudales anuales modelados vs observados

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3 Calibración subcuenca 302141600 – Estación Julumito

La última calibración corresponde a la estación Julumito ubicada sobre la subcuenca 302141600, siendo la cuenca de descarga del área evaluada; esta se realiza teniendo en cuenta las dos calibraciones realizadas anteriormente. Al realizar las modificaciones a los valores establecidos por defecto de los parámetros, se logró un buen ajuste gráfico de la curva de duración. Los parámetros que fueron modificados fue el número de curva, el coeficiente de recesión y el de percolación, sus respectivos valores se presentan en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Valores de los parámetros de calibración definidos para la calibración subcuenca 302141600

Parámetro	Valor
Número de curva (NC)	1.2
Contenido disponible de agua (CDA)	0.6
Coefficiente de recesión	0.009
Coefficiente de percolación	0.0025
Factor ET de la estación de cultivo	1
Factor ET de la estación de latencia	1

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en las anteriores calibraciones los estadísticos de validación no superan los valores óptimos propuestos (Tabla 16), ni a nivel diario, ni a nivel mensual, exceptuando el Overall Volume Error donde los valores se encuentran dentro del rango óptimo, siendo esto congruente con la validación gráfica donde los volúmenes totales presentan una calibración muy buena con respecto al flujo observado

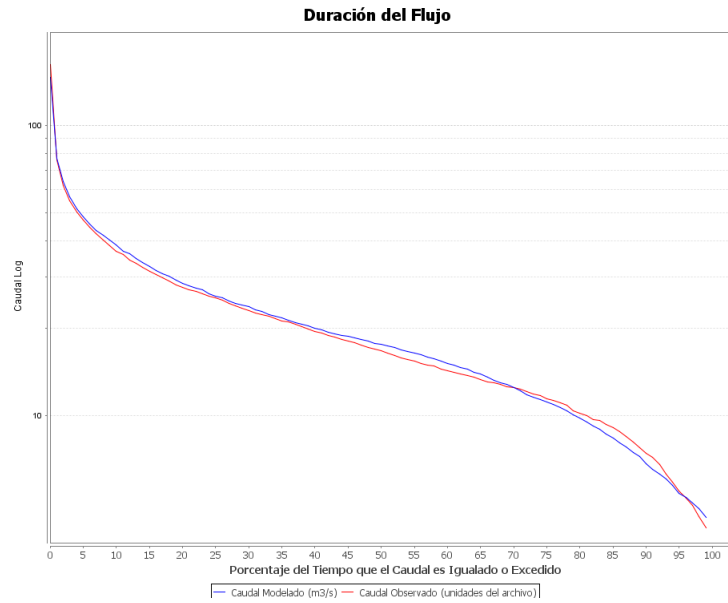
**Tabla 16.** Estadísticos de validación del modelo para la subcuenca 302141600

Parámetro	Valor diario	Valor mensual
Overall Volume Error	0.74	0.19
Correlation (r)	0.26	0.36
Modified Correlation Coefficient (rmod)	0.24	0.31
Nash- Sutcliffe Efficiency (R <sup>2</sup> )	-0.6	-0.5

Fuente: Elaboración propia

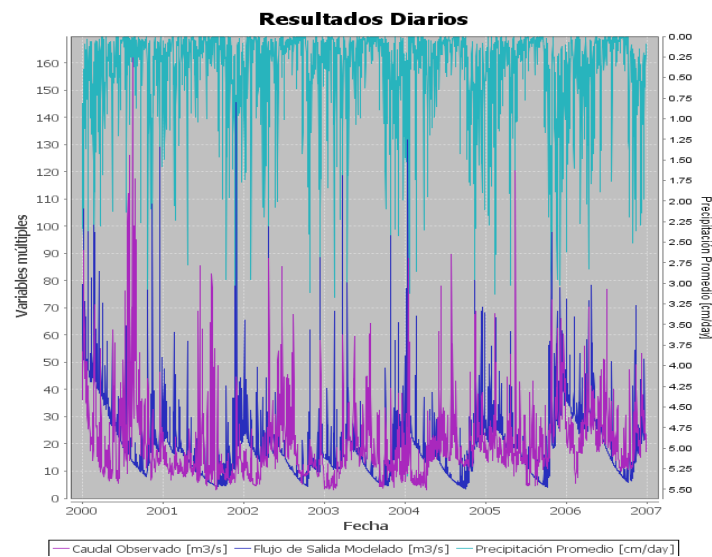
Como se mencionó anteriormente, aunque no todos los estadísticos de validación presentan valores óptimos, calibración gráfica presento un buen ajuste como lo muestra la Figura 22,

en donde la curva de duración de caudal del flujo modelado vs el observado, presentan el mismo comportamiento evidenciando un buen ajuste, en cuanto al volumen y pendiente de la curva a lo largo de todo el tiempo.



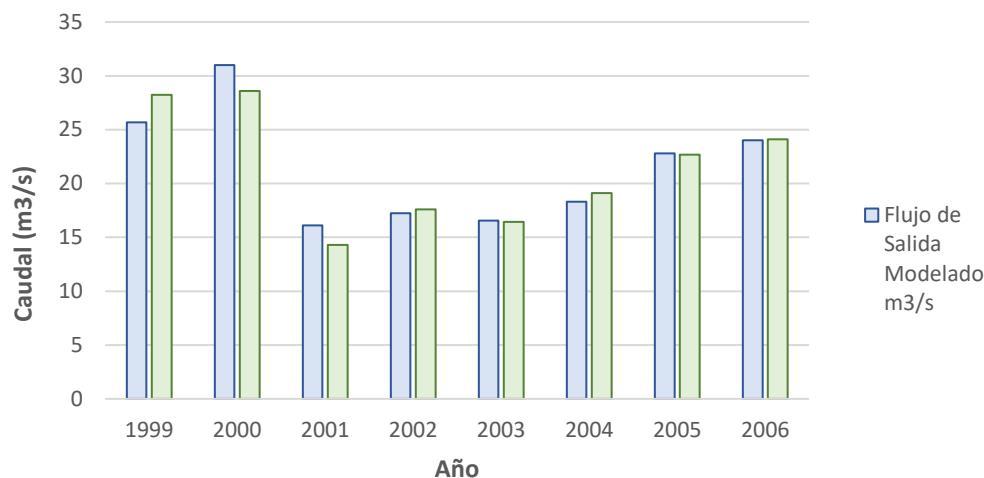
**Figura 22.** Curva duración de caudales  
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las distribuciones diarias (Figura 23) se logró un mejor ajuste de los caudales bajos, pero en algunas temporalidades los caudales máximos son sobreestimados. Además de esto en algunos sectores no se evidencia el mismo comportamiento.



**Figura 23.** Caudales diarios modelados vs observados  
Fuente: Elaboración propia

A nivel de series anuales (Figura 24), con respecto a la modelación anterior, las discrepancias entre el flujo observado y modelados son menores, donde solo se encuentran diferencias significativas en los años 1999 a 2001, sobreestimando el flujo aproximadamente en un 8% y 12% para los años los años 2000 y 2001 y subestimando el primer año (1999) en un 9% con respecto a los caudales observados. Esto evidencia la disminución en el porcentaje del error en los volúmenes anuales modelados con respecto a las calibraciones anteriores.



**Figura 24.** Comparación de caudales anuales modelados vs observados

Fuente: Elaboración propia

Después de realizar las diferentes ejecuciones del modelo y encontrar los valores adecuados para el ajuste de cada estación de caudal, se evidencia que los parámetros que más influyeron en la modelación del Río Alto Cauca son el número de curva (CN) ajustando el valor de los caudales máximos, el coeficiente de recesión ayudando a ajustar la pendiente de la curva de duración y el coeficiente de percolación el cual regula el volumen de escorrentía el cual influye directamente en el volumen en el flujo de salida.

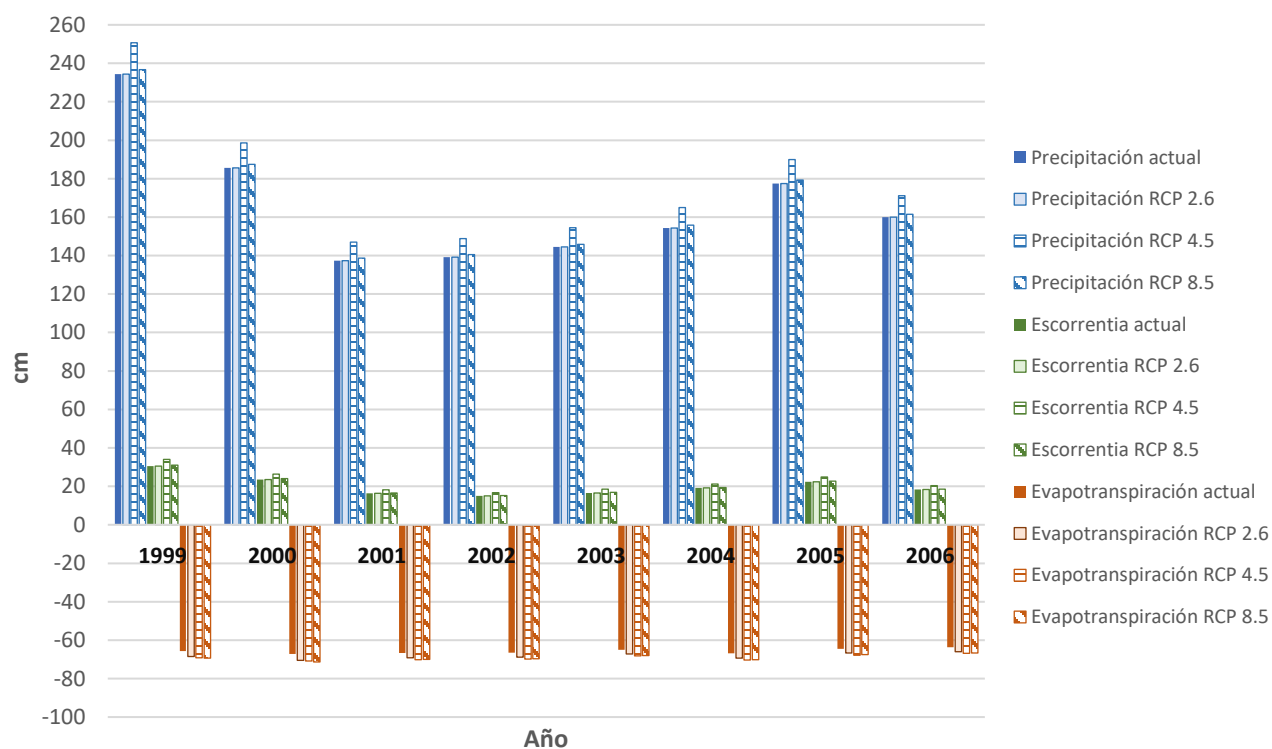
### 5.3 Escenarios de cambio climático

Para la modelación de los escenarios de cambio climático se consideraron los valores de anomalías mensuales de temperatura y el multiplicador para la precipitación mostrados en la Tabla 8 y Tabla 9. Estos escenarios presentan tres posibles futuros, el primero (RCP 2.6) donde el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo de  $3 \text{ W}\cdot\text{m}^2$  antes de 2100 y posteriormente disminuye, el segundo, RCP 4.5, el cual corresponde a un futuro donde



el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente a  $4,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  y  $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  después de 2100. Y por último un escenario pesimista (RCP 8.5) donde el forzamiento radiativo alcanza valores superiores a  $8,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  en 2100 y sigue aumentando durante un lapso. (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC), 2013).

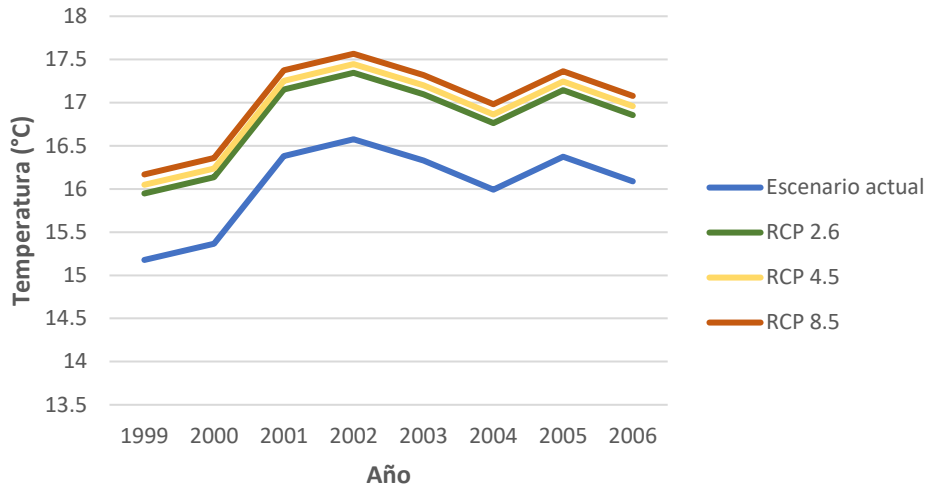
Como resultado de la iteración de estos escenarios se tienen los diferentes valores que constituyen el balance hídrico, la Figura 25 muestra los resultados de precipitación, evapotranspiración y escorrentía para los tres escenarios evaluados (y los compara con el escenario actual) donde la precipitación cambia en un  $-0.39\%$ ,  $6.59\%$  y  $0.91\%$ . Al aumentar la precipitación se ve un aumento de la escorrentía total en los escenarios 4.5 y 8.5.



**Figura 25.** Balance hídrico de los diferentes escenarios de cambio climático modelados vs el escenario actual

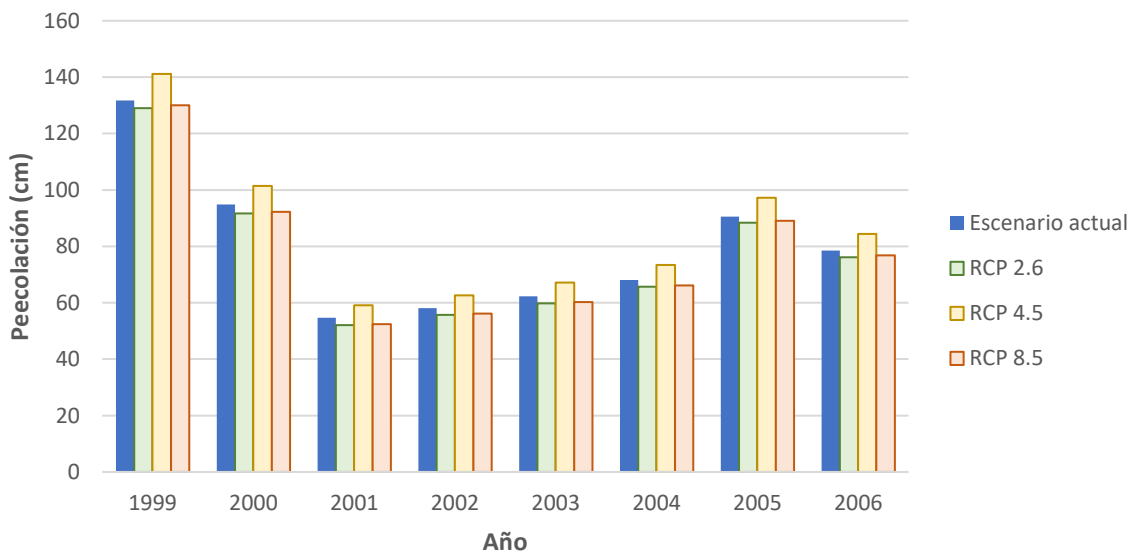
Fuente: Elaboración propia

Además de esto, en los diferentes escenarios se ve un aumento sutil en la evapotranspiración como consecuencia del aumento gradual de la temperatura en cada escenario evaluado (Figura 26) la cual sufre un aumento con respecto al escenario actual de  $0.8^\circ\text{C}$  en el escenario más optimista (2.6) a  $1.2^\circ\text{C}$  en el escenario más pesimista (8.5). Los promedios multianuales de estos escenarios van de  $16.805$  a  $17.02^\circ\text{C}$ .



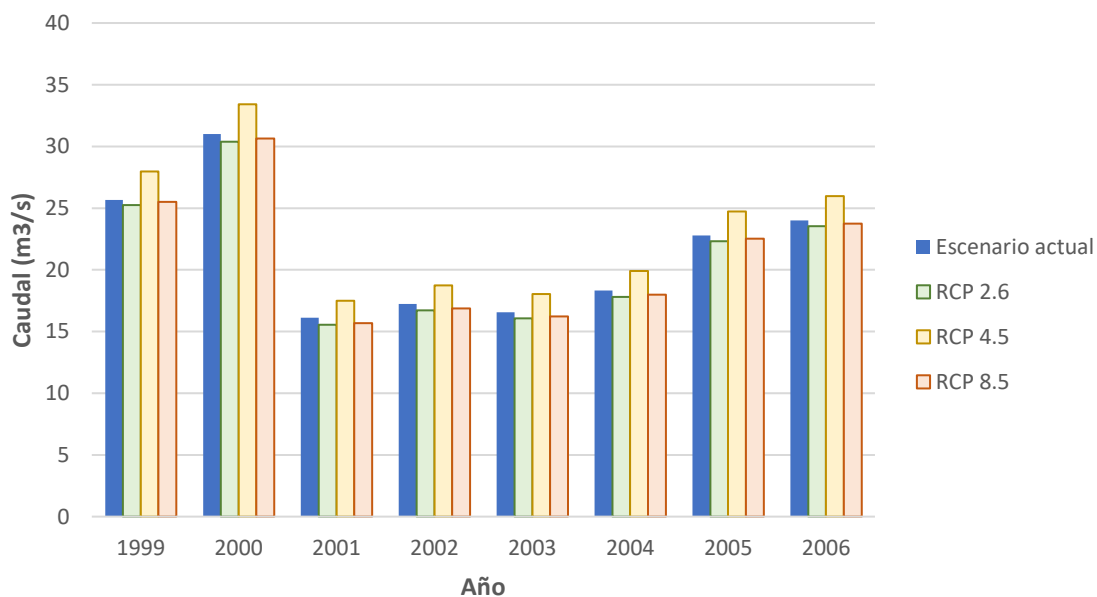
**Figura 26.** Temperatura en los diferentes escenarios modelados  
Fuente: Elaboración propia

También se ve la relación directamente proporcional que tiene la infiltración con el aumento de la precipitación, teniendo en cuenta que en ninguno de los escenarios modelados se realizaron cambios en la información de las características y el uso del suelo consignados en la base de datos LAC-AHD. La Figura 27, muestra que el escenario de estabilización (4.5) presenta un aumento significativo en estos valores de percolación, en contraste con los escenarios 2.6 y 8.5 que se comportan muy similar al escenario actual.



**Figura 27.** Percolación en los diferentes escenarios modelados  
Fuente: Elaboración propia

Por último, se obtienen como resultados los flujos totales para cada escenario (Figura 28) los cuales responden directamente al comportamiento del aumento de la precipitación ya que en los escenarios donde se tiene un mayor aumento de la precipitación se evidencian mayores caudales simulados, como en el escenario 4.5 con un valor promedio de 23.28 m<sup>3</sup>/s. Los dos escenarios restantes, 2.6 y 8.5 presentan una leve disminución del flujo total ya que su variación en el volumen de precipitación es menor al 1% teniendo valores promedio de caudal de 20.95 m<sup>3</sup>/s y 21.15 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

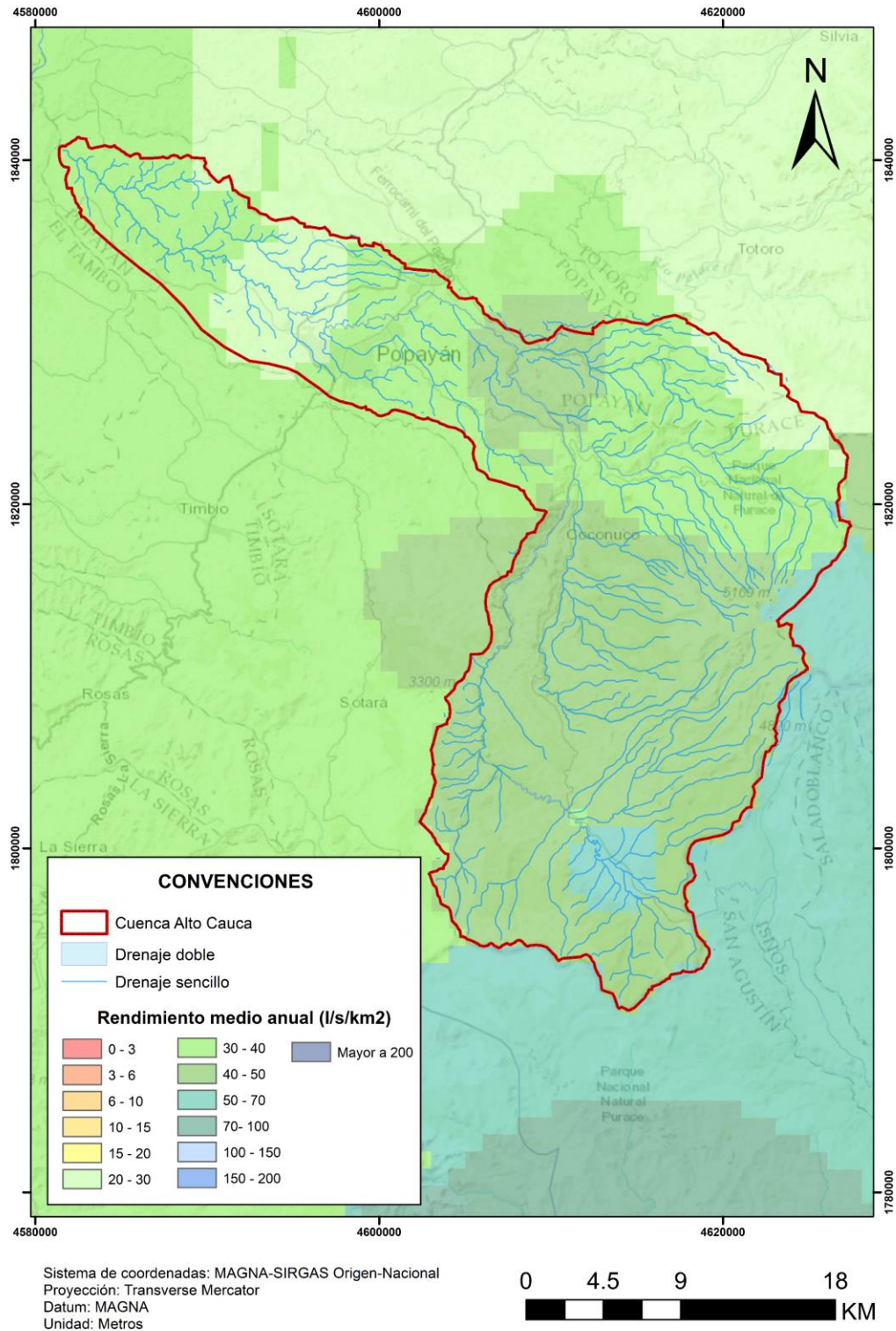


**Figura 28.** Caudales en los diferentes escenarios modelados

Fuente: Elaboración propia

## 6. DISCUSIÓN

Con el fin de analizar los resultados obtenidos en mediante la modelación en HYDROBID se consultaron estudios realizador en cuanto a oferta hídrica a nivel regional enfocado en la cuenca del Río Alto Cauca. El primer estudio consultado fue el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2014) donde se tiene que el rendimiento anual para la cuenca se encuentra en el rango de 20 a 50 l/s/km<sup>2</sup> (Figura 29). Además, en la actualización de este estudio “Estudio Nacional del Agua” (IDEAM, 2018) se reporta que para la subzona hidrográfica Alto Río Cauca una oferta total de 791 hm<sup>3</sup> equivalentes a 27,9 l/s/ km<sup>2</sup>.

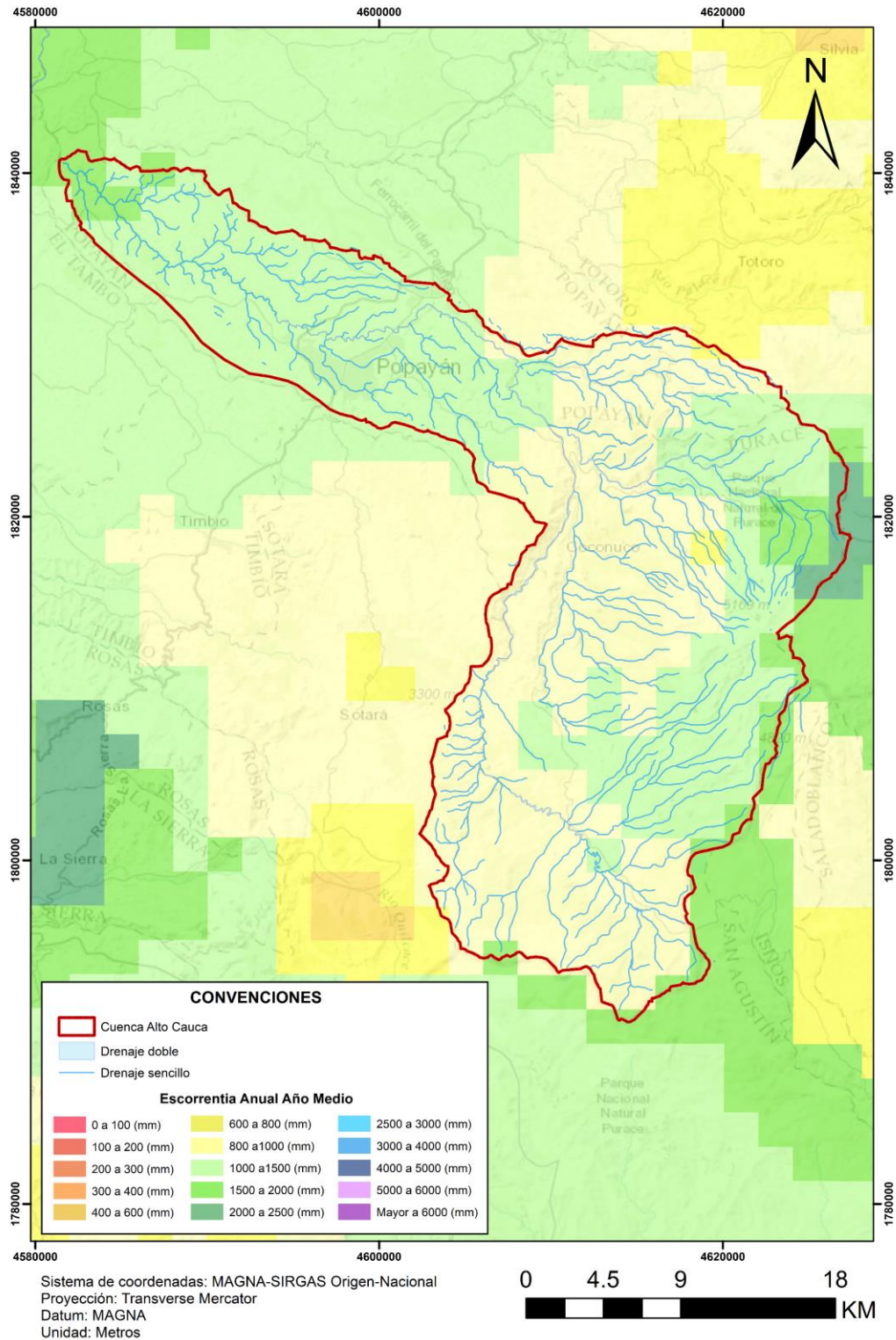


**Figura 29.** Rendimiento hídrico anual para la cuenca del Río Alto Cauca  
 Fuente: (IDEAM, 2014)

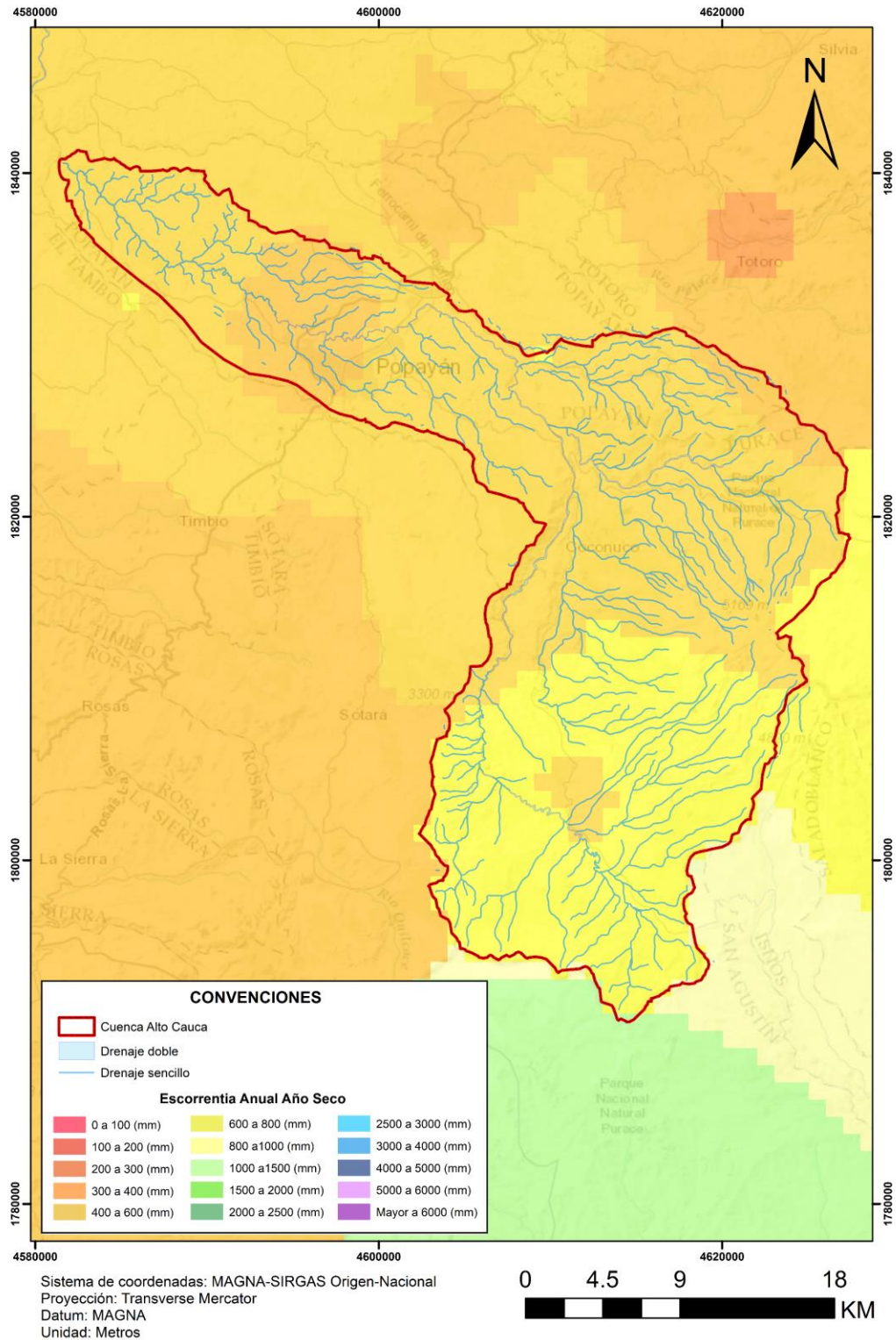
Estos volúmenes son cercanos a los valores modelados en HYDROBID ya que se tiene un flujo total medio anual de 21,26 m<sup>3</sup>/s que es equivalente a 25,11 l/s/km<sup>2</sup> de lo cual puede afirmarse que esta herramienta logra caracterizar de una manera adecuada el área de estudio.

Además de los valores de oferta hídrica anual, el estudio del IDEAM (2014), también presenta la caracterización de la escorrentía media anual en mm para el año medio y año seco (Figura 30 y Figura 31); se presentan estos dos escenarios ya que el valor obtenido en la modelación es de 202.15 mm/anuales, se encuentra muy por debajo del valor reportado para el año medio que varía de 800 a 2000 mm/año.

Por esta razón se presenta también el escenario en año seco, donde los valores están en el rango de 300 a 1000 mm/año, aunque el límite inferior de estos valores es cercano al volumen resultado del modelo, se debe tener en cuenta que no es el escenario usual de la cuenca, por lo que en esta modelación se subestimó la generación de escorrentía teniendo en cuenta los reportes presentados. Esta subestimación de la escorrentía puede estar relacionada a la caracterización de los suelos y usos de suelo de la cuenca, las cuales dan lugar al número de curva, parámetro que representa la capacidad del suelo para generar escorrentía, donde posiblemente los suelos pueden presentar mayor permeabilidad que la reportada en la base de datos AHD-LAC

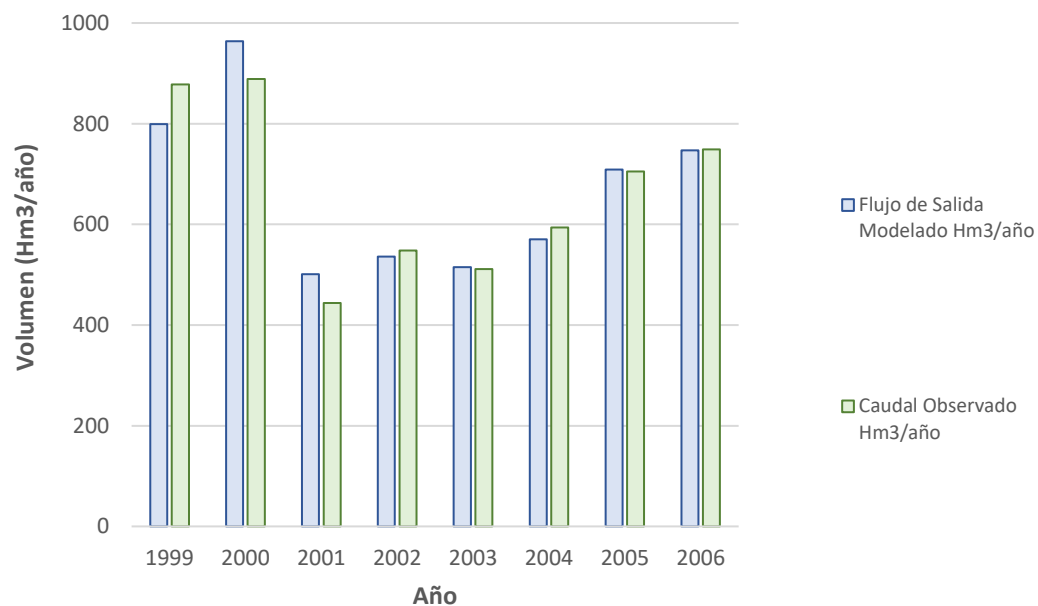


**Figura 30.** Escorrentía media anual en año medio para la cuenca del Río Alto Cauca  
 Fuente: (IDEAM, 2014)



**Figura 31.** Escorrentía media anual en año seco para la cuenca del Río Alto Cauca  
 Fuente: (IDEAM, 2014)

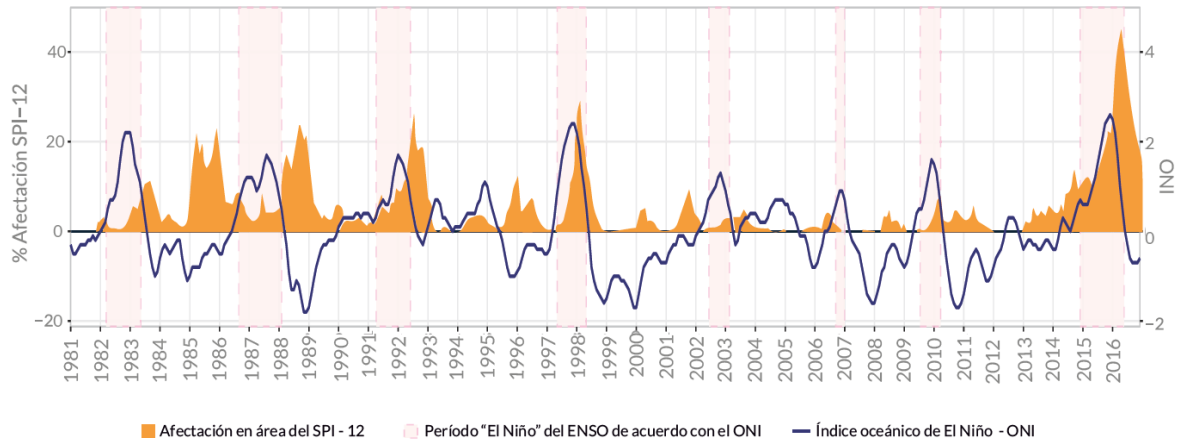
También se encuentran diferencias con respecto a los volúmenes anuales se encuentran varias discrepancias con respecto a los caudales observados ya que, para uno de los años modelados, 2001, excede en aproximadamente 12% el volumen observado (Figura 32), esto puede darse como consecuencia del proceso natural de saturación, drenaje de los suelos entre temporadas de lluvias y la geomorfología de la cuenca, ya que los periodos de mayor precipitación no coinciden con los de mayor caudal (CVC, Universidad del Valle, EIDENAR, 2007). Por otra parte, también se debe tener en cuenta la información limitada de caudal observado encontrada en la cuenca ya que se limita a siete (7) años factor que dificulta el correcto ajuste de las modelaciones.



**Figura 32.** Comparación de volúmenes anuales modelados vs observados  
Fuente: Elaboración propia

Por último, el comportamiento del flujo modelado puede relacionarse con fenómenos de variabilidad climática como El Niño Oscilación del Sur, en donde los años de menor flujo coinciden con los periodos de influencia de este fenómeno (Figura 33) como lo son los años 2001 a 2003.





**Figura 33.** Relación del índice estandarizado de precipitación y los periodos de sequía o “Niño” para el territorio colombiano

Fuente: (IDEAM, 2018)

En cuanto a los resultados obtenidos para los escenarios de cambio climático, se evidencia el impacto de los tres escenarios seleccionados, en donde para todas las variables del balance hídrico los escenarios menos críticos con respecto al estado actual de la cuenca son el RCP 2.6 y 8.5 presentando aumentos medios anuales de temperatura de menos de 1°C, además las precipitaciones y caudales no varían de una manera considerable con respecto a las condiciones actuales

En cuanto al escenario más crítico (4.5) es muy probable que para el final de este siglo sean más intensos y frecuentes los fenómenos de precipitación extrema en la mayoría de las masas térricas de latitud media y en las regiones tropicales húmedas, conforme vaya aumentando la temperatura media global en superficie (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC), 2013). Este aumento en la precipitación genera excesos convertidos en flujos de salida por lo cual ya se evidencian incrementos considerables en los caudales simulado llegando a superar en aproximadamente 12% el volumen actual.

Estos posibles cambios en la precipitación, temperatura y oferta hídrica pueden desencadenar fenómenos amenazantes, como inundaciones, movimientos en masa, avenidas torrenciales, vendavales ya que un aumento de las lluvias puede ocasionar más inundaciones, inestabilidad de las laderas por movimientos en masa.

Además, estos escenarios no contemplan cambios en el uso del suelo, cobertura vegetal, ampliación de centros urbanos entre otros ya que un suelo sin vegetación está expuesto a

ser arrastrado por el agua, y si a ello se le suman las pérdidas de capacidad de infiltración debido a las actividades antrópicas, se pueden provocar incrementos en los cursos temporales del agua, los cuales es posible que generen inundaciones y avenidas torrenciales (Banco Mundial, 2012), siendo este fenómeno muy recurrente en el área de estudio por las características de pendiente de los cauces de montaña, además de albergar a la ciudad de Popayán, capital del departamento del Cauca con una población aproximadamente 300.000 personas las cuales podrían verse afectadas por estos fenómenos.

## **7. CONCLUSIONES**

La subcuenca 302141600 posee nueve (9) subcuencas aferentes según la base de datos AHD-LAC, estas conforman la unidad de estudio, cuenca Alto Río Cauca, teniendo un área de 854.61 km<sup>2</sup>, en donde como su nombre lo indica el drenaje principal es el Río Cauca con una extensión de 99.51 km desde su nacimiento hasta el punto de salida en la unión con el Río Hondo.

Los parámetros más importantes al momento de realizar la calibración fueron el número de curva, el coeficiente de recesión y el de percolación, ayudando de una manera muy adecuada al ajuste gráfico de la curva de duración y a disminuir la subestimación de los caudales bajos.

Se encontraron algunas diferencias en el comportamiento de los volúmenes anuales modelados con respecto a los caudales observados ya que se tiene discrepancias de hasta el 12% del volumen anual específicamente para el año 2001, pero de manera gráfica se logró un buen ajuste con respecto a la curva de duración de caudales.

La modelación hidrológica realizada mediante el programa HYDROBID permitió obtener resultados bastante aceptables en cuanto al balance de volumen en la cuenca, sin embargo, a nivel de flujos diarios no se logró una buena calibración.

Se identificó una subestimación de los valores de escorrentía con respecto a los reportados por el IDEAM (IDEAM, 2014), esta discrepancia podría ajustarse si se tuviese una caracterización detallada y actualizada de la cuenca de estudio, con respecto a la textura de los suelos, cobertura vegetal, pendiente y uso del suelo, para así hallar de manera detallada el número de curva.

El escenario de cambio climático que presenta valores más extremos con respecto a la realidad actual corresponde al RCP 4.5 el cual se prevé que generara un aumento de la precipitación y del flujo disponibles, lo cual podría generar excesos que serían detonantes de eventos de origen natural como inundaciones, avenidas torrenciales y deslizamiento, afectando a los habitantes de esta región

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Alexandersson, H. (1986). *A homogeneity test applied to precipitation data*. Jour. of Climatol.
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*.
- BID. (06 de 12 de 2022). *Banco Interamericano de Desarrollo*. Obtenido de Iniciativa: HYDROBID: <https://www.iadb.org/es/agua-y-saneamiento/about-hydro-bid>
- BID. (Marzo de 2022). Taller conociendo Hydro BID. BID.
- CVC. (2015). *Plan de Gestión Ambiental Regional del Valle del Cauca 2015-2036*. Cali.
- CVC. (26 de Octubre de 2022). Expendición Río Cauca. Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- CVC, Universidad del Valle, EIDENAR. (2007). *El río Cauca en su valle alto: Un aporte al conocimiento de uno de Los ríos más importantes de Colombia*. Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC - Dirección Técnica Ambiental.
- Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). (2013). *Cambio climático: Bases físicas 2013*.
- Guijarro, J. A. (2019). *Homogeneización de series climáticas con Climatol*. Islas Baleares: Agencia Estatal de Meteorología (AMET).
- Halh, D. A., Mandel, R., & Shyan Wu, R. (1992). *GWLF Generalized Watershed Loading Functions*. Ithaca: Department of Agricultural & Biological Engineering Cornell University.
- IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia*. Bogotá.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.
- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.
- Menzel, L., & Burger, G. (2002). Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment. *J Hydrol*, 53-64.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Ministerio de Hacienda y Crédito Público; Departamento Nacional de Planeación. (2009). *Programa para el*

*saneamiento, manejo y recuperación ambiental de la cuenca Alta del Río Cauca.*  
Bogotá: CONPES 3624.

Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz Castillo, R. (2014). *Hydro-BID: Un sistema integrado para la simulación de impactos de cambio climático sobre los recursos hídricos. Parte 2.* BID.

Pauhus, J., & Kohler, M. A. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Month Weath., Rev.*, 80:129-133.

Pérez Valbuena, G. J., Arrieta Arrieta, A. M., & Contreras Amaya, J. G. (2015). *Río Cauca: la geografía económica de su área de influencia.* Bogotá: Banco de la Republica.

Pontificia Universidad Católica de Chile. (29 de 11 de 2022). *Glosario de terminos - Forzamiento radiativo.* Obtenido de Cnetro cambio global : <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/recursos/glosario/forzamiento-radiativo>

Reyes, A. (2012). *Cuencas hidrográficas: guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas.* Cali: Universidad del Valle.

Rinner, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz Castillo, R. (2014). *Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe Parte 1.* Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Sedano Cruz, R. K. (Septiembre de 2015). Influencia de la variabilidad climática y factores antrópicos en los extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca. *Tesis doctoral.* Valencia, España: Universitat Politècnica de valència.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2011). *An Overview of CMIP5 and The Experiment Desing.* Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory.

World Climate Research (WCRPs). (2013). *CMIP5.* Lawrence: Lawrence Livermore National Laboratory.