



Universidad  
de Alcalá

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y ANÁLISIS  
DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO DE LA  
UNIDAD CEBADAS UBICADA EN LA CUENCA DEL  
RÍO CHAMBO, (ECUADOR) CON EL  
PROGRAMA HYDROBID**

**HYDROLOGICAL CHARACTERIZATION AND  
CLIMATE CHANGE SCENARIO ANALYSIS OF THE  
CEBADAS UNIT, LOCATED IN CHAMBO RIVER  
BASIN, ECUADOR WITH HYDROBID MODEL**

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

**Presentado por:**

**Ing. NELSON ESTUARDO PATIÑO VACA**

**Dirigido por:**

**Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR (Instituto IMDEA-Agua)**

**Alcalá de Henares, a 27 de enero de 2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

Un sincero agradecimiento a los tutores, docentes y compañeros del programa de Maestría en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos por sus valiosos aportes y por los gratos momentos compartidos en la fase presencial, de manera especial al Dr. Antonio Pascual por su colaboración en la realización del trabajo de fin de máster.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. METODOLOGÍA.....	12
3.1. ZONA DE ESTUDIO.....	12
3.2. PROCEDIMIENTO.....	15
3.2.1. Fase 1. Los datos y su tratamiento .....	15
3.2.1.1. Selección de estaciones aledañas.....	15
3.2.1.2. Obtención y llenado de datos. ....	17
3.2.2. Fase 2. Metodología de análisis .....	18
3.2.2.1. Estructuración del modelo .....	18
3.2.2.2. Parametrización y corrida inicial del modelo .....	23
3.2.2.3. Calibración del modelo .....	24
3.2.2.4. Modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático.....	26
4. RESULTADOS .....	28
4.1. TRATAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS .....	28
4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	32
4.3. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	41
4.3.1. Escenario 1 .....	41
4.3.2. Escenario 2 .....	42
5. DISCUSIÓN.....	42
6. CONCLUSIONES.....	46
7. BIBLIOGRAFÍA.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización de la zona de estudio.....	13
<b>Figura 2.</b> Fases metodológicas del estudio .....	15
<b>Figura 3.</b> Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológicas en la Unidad Hidrográfica de estudio .....	17
<b>Figura 4.</b> Delimitación, área y código de identificación de la Unidad Hidrográfica en estudio, con la base de datos LAC-AHD .....	19
<b>Figura 5.</b> División e identificación de los centroides de las subcuencas de la Unidad Hidrográfica de estudio con la base de datos LAC-AHD.....	20
<b>Figura 6.</b> Interfaz de interpolación climática “Climate Data Interpolating Tool” .....	22
<b>Figura 7.</b> Interfaz de inicio Setup, HydroBID.....	23
<b>Figura 8.</b> Interfaz de parametrización del modelo. ....	24
<b>Figura 9.</b> Proyecciones de cambio de temperatura media y precipitación media.....	27
<b>Figura 10.</b> Interfaz de escenarios climáticos, HydroBID.....	28
<b>Figura 11.</b> Línea de tiempo para registros de temperatura y precipitación en las estaciones situadas en la zona de estudio .....	29
<b>Figura 12.</b> Coeficiente de correlación entre las estaciones M1130 – M0395.....	30
<b>Figura 13.</b> Distribución temporal de la temperatura.....	30
<b>Figura 14.</b> Distribución temporal de la precipitación .....	31
<b>Figura 15.</b> Caudales medios mensuales Río Cebadas.....	31
<b>Figura 16.</b> Parámetros iniciales del modelo para primera corrida del programa HydroBID. ....	32
<b>Figura 17.</b> Curva de duración de caudales Modelados y Observados.....	32
<b>Figura 18.</b> Gráfica de Caudales diarios Modelados y Observados.....	33
<b>Figura 19.</b> Datos estadísticos de la primera simulación del modelo.....	34
<b>Figura 20.</b> Parámetros estadísticos del modelo Calibrado y caudales mensuales y anuales medios.....	36
<b>Figura 21.</b> Diagrama de caudales promedios mensuales observados y modelados con HydroBID.....	37
<b>Figura 22.</b> Diagrama de caudales promedios anuales observados y modelados con HydroBID .....	37
<b>Figura 23.</b> Curva de duración de caudales Modelados y Observados del modelo calibrado .....	38

<b>Figura 24.</b> Hidrograma de Caudales diarios Modelados y Observados del modelo calibrado.....	38
<b>Figura 25.</b> Correlación de Caudales Modelados y Observados del modelo calibrado....	39
<b>Figura 26.</b> Balance Hídrico del modelo Calibrado.....	39
<b>Figura 27.</b> Balance de Caudal – Precipitación para la Unidad Hidrográfica Cebadas en su estado actual .....	40
<b>Figura 28.</b> Balance Hídrico, escenario de cambio climático 1.....	41
<b>Figura 29.</b> Balance Hídrico, escenario de cambio climático 2. ....	42
<b>Figura 30.</b> Caudales mensuales simulados con modelos HydroBID y MIKE 11 .....	43
<b>Figura 31.</b> Gráfica de comparación de flujos anuales promedios .....	44
<b>Figura 32.</b> Gráfica de comparación de evaporación en los diferentes escenarios .....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Variables morfométricas de la cuenca de estudio .....	14
<b>Tabla 2.</b> Estaciones climatológicas .....	16
<b>Tabla 3.</b> Estaciones hidrológicas .....	16
<b>Tabla 4.</b> Parámetros de calibración de HydroBID .....	25
<b>Tabla 5.</b> Rangos de parámetros estadísticos para calibración del modelo .....	26
<b>Tabla 6.</b> Escenarios climáticos en la cuenca de estudio .....	27
<b>Tabla 7.</b> Estaciones climatológicas definidas para el modelo.....	29
<b>Tabla 8.</b> Parámetros hidráulico finales obtenido en la calibración del Modelo .....	35
<b>Tabla 9.</b> Parámetros del Balance hídrico .....	41

## **ABREVIATURAS**

BID: *Banco Interamericano de Desarrollo*

CISPDR: *Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research*

CN: *Curve Number*

CNRH: *Consejo Nacional de Recursos Hídricos*

CSV: *Comma Separated Values*

ESRL: *Earth System Research Laboratory –*

GWLF: *Generalized Watershed Loading Function*

HWSD: *Harmonized World Soil Database*

H.C.P.CH: *Honorable Consejo Provincial de Chimborazo*

INAMHI: *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador*

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LAC-AHD: *Latin América and the Caribbean - Analytical Hydrology Dataset*

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce*

PSD: *Physical Sciences Division*

RTI: *Research Triangle Institute*

SCS: *Soil Conservation Service*

SENAGUA: *Secretaría Nacional del Agua*

SIG: *Sistema de Información Geográfica*

SZH: *Subzona hidrográfica*

SQLite: *Structured Query Language lite*

UNDP: *United Nations Development Programme*

USGS: *United States Geological Survey*

QGIS: *Quantum Geographic Information System*

## **RESUMEN**

La presión sobre los recursos hídricos se ha ido incrementando en los últimos años debido al crecimiento poblacional y cambio del uso del suelo, provocando un aumento en la demanda de agua para los diferentes usos. De allí que la planificación de los recursos hídricos y la gestión de los territorios a nivel de cuencas se convierten en aspectos fundamentales para el abastecimiento del agua para consumo humano e industrial, riego, generación hidroeléctrica y preservación de los ecosistemas; además de contribuir a la disminución de la intensidad de eventos extremos como son las inundaciones y sequías.

Por tal razón, resulta conveniente utilizar nuevas herramientas tecnológicas de modelización hidrológica para mejorar la gestión de los recursos hídricos que permitan conocer la disponibilidad del agua ante diferentes escenarios como el cambio climático, crecimiento poblacional, etc. En esa línea el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) desarrolló el modelo de simulación de recursos hídricos denominado HydroBID, cuyo ámbito de cobertura es América Latina y el Caribe.

En el presente estudio se realizó la caracterización hidrológica de la Unidad Hidrográfica Cebadas perteneciente a la cuenca del río Chambo, provincia de Chimborazo, Ecuador, con la utilización del modelo hidrológico HydroBID, para lo cual se empleó distintos tipos de información y con ello explotar el potencial de predicción ante diversos escenarios de cambio climático. Las herramientas informáticas utilizadas fueron el programa HydroBID para el análisis y simulación hidrológica, QGIS para la navegación y procesamiento de información geográfica y la base analítica de Latinoamérica y el Caribe.

El estudio comprendió dos fases metodológicas principales, la primera, contempló la selección y procesamiento de información hidrometeorológica de las estaciones más cercanas a la Unidad Hidrográfica que permitió desarrollar la base de datos de entrada de temperatura, precipitación y caudales a utilizarse en el modelo.

En la segunda fase se realizó la estructuración y parametrización del modelo en base a la información geográfica e hidrometeorológica, luego la calibración manual de los parámetros hidráulicos y ejecución del modelo en condiciones actuales. Posteriormente el trabajo se



complementó con la modelación de dos escenarios del impacto en los flujos diarios por variaciones de temperatura y precipitación relacionados al cambio climático.

Con la aplicación del modelo en la Unidad Hidrográfica Cebadas se obtuvieron resultados de simulación bastante aceptables con respecto a los datos observados de caudales de la subcuenca, ya que se generaron flujos mensuales con un volumen de error de -25,42% y que está dentro del rango recomendado para un modelo bien calibrado que varía entre -30% hasta 30%.

En lo que respecta a los resultados del balance hídrico se observa que en las condiciones actuales se presenta una disminución del flujo total para el período analizado, que se puede traducir en una pérdida de oferta hídrica para los próximos años. Para el escenario 1 de cambio climático en el que se incrementó la temperatura en 2°C y la precipitación en un 20%, los resultados indican que en los próximos 30 años existirá un incremento del flujo en un 19,3 % con respecto al valor modelado para las condiciones actuales. En cambio, para el escenario 2 en el que se mantuvo el incremento de 2°C de temperatura y se disminuyó la precipitación en un 20%, la situación es totalmente distinta ya que se pronostica una disminución del 22,25% del flujo total, situación que es la más crítica ya que disminuirá considerablemente la oferta hídrica con los consecuentes impactos en la población y medio ambiente.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las actuales circunstancias, el agua es un recurso natural indispensable, porque además de las funciones de los ecosistemas, todas las actividades sociales y económicas también dependen de ella. Por tal razón resulta inevitable que se establezcan mecanismos de gestión y planificación que garanticen una adecuada conservación, distribución y optimización del uso del recurso.

En la república de Ecuador existen 37 Unidades de Planificación Hidrográfica, una de las cuales corresponde a la Unidad de Planificación Hídrica Local Pastaza que comprende parte del territorio de 6 provincias que involucran a 28 cantones y cubre una superficie de 32.128 km<sup>2</sup> (CISPDR, 2015). La Unidad Pastaza está constituida por un sistema hidrográfico, cuyo principal drenaje es el río Pastaza; su red inicia en la sierra central del país (provincia de Chimborazo), en las lagunas de Atillo y Ozogoché que al unirse dan origen al río Cebadas, sobre éste desemboca el río Guamote y se forma el río Chambo. (Romero y Carrera, 2018).

En Ecuador los recursos hídricos dependen de la demanda para cubrir las diversas necesidades y de la disponibilidad del agua en las regiones del país. La preservación y gestión sostenible del recurso es fundamental, debido a las diferencias existentes en cantidad y calidad entre las distintas unidades hidrográficas y entre los estratos sociales que están íntimamente ligados con el acceso al agua. (Galárraga R, 2010).

El volumen de agua disponible en Ecuador es variable y va desde 4'320.000 hm<sup>3</sup> en la época de lluvias, a solo 146.000 hm<sup>3</sup> en la época de estiaje. La precipitación media anual es de 2.274 mm sin embargo la distribución espacial y temporal es muy variada. Si bien en Ecuador hay una disminución paulatina de la disponibilidad de agua, hasta el momento existe una importante riqueza hídrica. (SENAGUA, 2017).

Para el año 2000 la dotación de agua en Ecuador alcanzó los 34.161 m<sup>3</sup>/hab/año y para el año 2005 descendió a 32.170 m<sup>3</sup>/hab/año. Pese a esta disminución esos valores superan con cierta amplitud los 7.400 m<sup>3</sup>/hab/año, correspondientes al promedio per cápita mundial calculado para el año 1992 y adicionalmente se estima que se reducirá para el año 2025 a 5100 m<sup>3</sup>. (SENAGUA, 2017).

El cambio climático y otros aspectos distintos al manejo de los recursos hídricos como el crecimiento demográfico, la evolución tecnológica, la política, idiosincrasia social, la gobernanza y el derecho, están experimentando tendencias o crisis cada vez más aceleradas. Sin embargo, pese a estos retos y a la complejidad de abordarlos, cada vez es más necesario disponer de información fidedigna y actualizada sobre los recursos hídricos y cómo se utilizan. Por lo que la posible falta de conocimiento fiable de los recursos hídricos genera nuevos riesgos e incertidumbres para quienes establecen las medidas a tomar en el ámbito del agua.

En este contexto la hidrología juega un papel preponderante en la gestión y planificación de los recursos hídricos, en virtud de que cualquier alteración del ciclo hidrológico incidirá en mayor o menor magnitud tanto en el agua como en los recursos que dependen de ella. Por tanto, las herramientas hidrológicas como los modelos han desempeñado un rol importante en muchos campos de la hidrología desde sus inicios. Por ejemplo, su uso es común en la anticipación de alertas tempranas de riesgos de avenidas e inundaciones, manejo y administración de cuencas, en el desarrollo agrícola, en el diseño de infraestructuras hidráulicas, los estudios de impacto del cambio climático, etc. (Pascual y Díaz, 2016).

Para ayudar a la región de Latinoamérica y el Caribe a abordar el desafío de la gestión del agua, el Banco Interamericano de Desarrollo ha impulsado la construcción de una plataforma de simulación llamada HydroBID que permite una gestión y planificación eficaz de los recursos hídricos al predecir la disponibilidad del agua en una variedad de circunstancias como el cambio climático, crecimiento poblacional y cambio de uso del suelo. (SPOC HydroBID, 2020).

Con el propósito de conocer la disponibilidad del recurso hídrico en la Unidad Cebadas perteneciente a la cuenca del río Chambo, en el presente trabajo de investigación se ha realizado la caracterización hidrológica de dicha Unidad Hidrográfica con el programa HydroBID a fin de generar un modelo a partir de datos de temperatura, precipitación y caudales que permita obtener el balance hídrico para las condiciones actuales y pronosticar balances futuros bajo escenarios de cambio climático.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. GENERAL:**

Caracterizar la unidad hidrográfica 499689 - Cebadas de la cuenca del Río Chambo Ecuador, de acuerdo a parámetros hidrológicos con el programa HydroBID para estimar la disponibilidad de los recursos hídricos en el futuro, que permitirá realizar una adecuada planificación y gestión de los mismos.

### **2.2. ESPECÍFICOS:**

- Procesar los datos hidrometeorológicos de las estaciones más cercanas a la Unidad Hidrográfica para disponer de información de precipitación, temperatura y caudales.
- Parametrizar, calibrar el modelo y realizar una simulación hidrológica con HydroBID considerando las variaciones climáticas, para estimar la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro en la Unidad Hidrográfica.

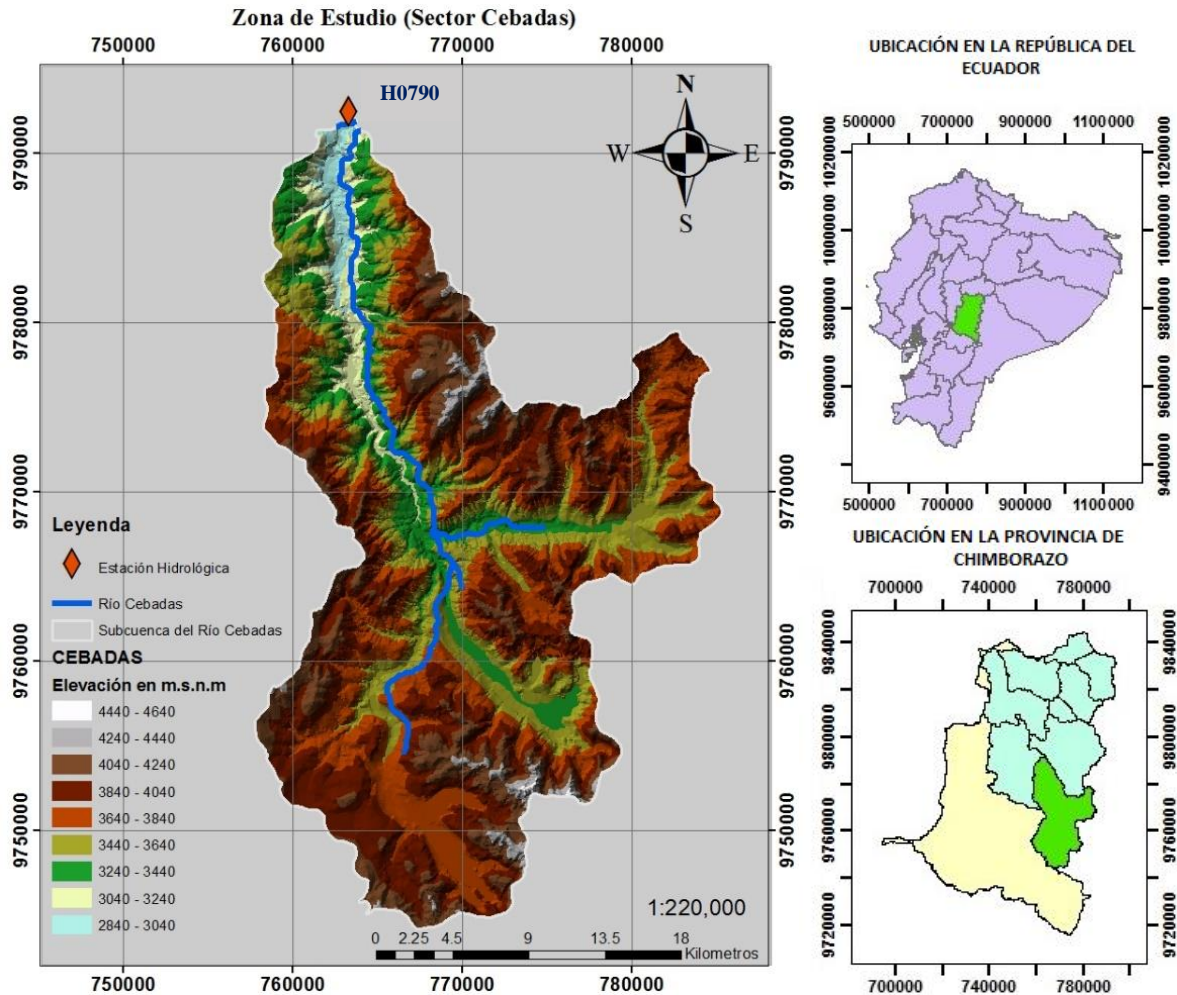
## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. ZONA DE ESTUDIO**

El área de estudio corresponde a la Unidad Hidrográfica 499689 que forma parte de la “Cuenca del Río Chambo”, está localizada al sur de la provincia de Chimborazo, en el callejón interandino en la zona central de la República del Ecuador. La Unidad Hidrográfica tiene una superficie de 710,86 Km<sup>2</sup> y forma parte de la Demarcación Hidrográfica de Pastaza, que pertenece a la vertiente del Amazonas.

El río principal de esta unidad es el Cebadas, que fluye de sur a norte con una longitud de 66,05 km, y nace en la confluencia de las lagunas de Atillo y Ozogoche localizadas en la sierra central del Ecuador. Luego en su recorrido el río Cebadas se une con el río Guamote y forma el río Chambo.

El 75,57% de la superficie de la Unidad Hidrográfica se encuentra en el cantón Guamote y el 24,43 % restante en el cantón Alausí. Ambos cantones pertenecen a la provincia de Chimborazo. En la Figura 1 se muestra la Unidad Hidrográfica georreferenciada.



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio.

El rango de altitud de la cuenca del río Cebadas oscila entre los 2840 y los 4640 metros sobre el nivel del mar, por lo que se encuadra dentro de las formaciones ecológicas: Matorral húmedo montano, Bosque siempre verde montano alto o Ceja de Montaña, Páramo herbáceo, Páramo de almohadilla (Sierra, 1999).

Los suelos son de textura media, arenosos o francos arenosos con bajo contenido de materia orgánica y baja retención de humedad. La textura de los suelos encontrados en la microcuenca está ligada a la pendiente: suelos arcillosos en pendientes inferiores a 12%, arenosos en pendientes de 5% al 70%, franco en pendientes 12% al 60%, franco arenoso < 4% y limosos 5% al 25%. (HCPCH., 2008).

El contenido de materia orgánica corresponde a suelos arcillosos, es decir, en pendientes superiores al 30%, arenosos menos del 1%, arenas finas del 1% al 3%, y limosos del 10% al 20%. (HCPCH., 2008).

El clima es diverso, por lo que en relación a su altitud encontramos dos tipos de climas: templado con una temperatura de 17 °C, ubicado en los lugares que van desde los 2500 hasta los 3500 metros y frío que incluye todos los lugares que van desde los 3500 hasta los 4500 metros, con cambios de temperatura entre 1 y 10 °C. (Portilla, 2018).

La unidad hidrográfica y la red principal tienen la siguiente morfología (Tabla 1):

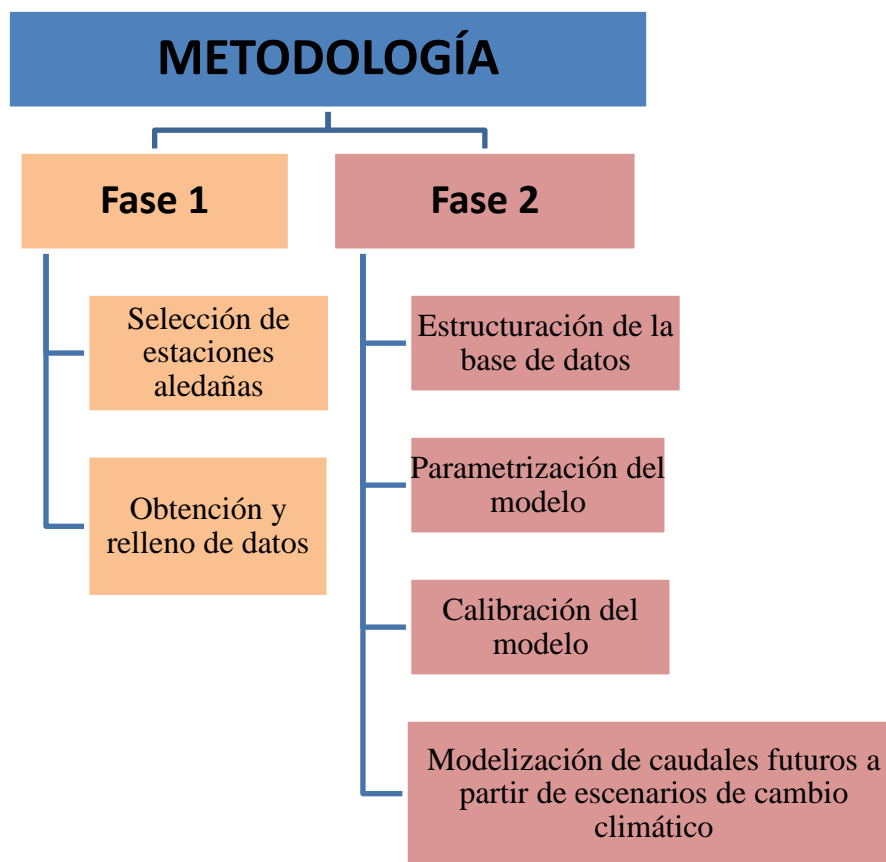
**Tabla 1.** Variables morfométricas de la cuenca en estudio

<b>Parámetro</b>	<b>Características</b>
Nombre de la Unidad	499689 Río Cebadas
Nombre de la cuenca	Río Chambo
Área de drenaje	710,86 km <sup>2</sup>
Perímetro	158,85 km
Longitud del cauce	66,05 km
Factor de forma	0,16
Índice de compacidad	1,67
Densidad de drenaje	1,47 km/km <sup>2</sup>
Índice de sinuosidad	1,40
Pendiente media	0,37%

Según las variables de la tabla 1, la cuenca tiene una forma muy alargada y por tanto menos propensa a crecientes. La densidad de drenaje es relativamente alta por lo que se puede considerar a la cuenca como bien drenada y la red principal tiene una alta sinuosidad en su recorrido.

## 3.2 PROCEDIMIENTO

El estudio comprendió dos fases metodológicas principales, la primera, contempló la selección de las estaciones climatológicas e hidrológicas y la obtención y llenado de datos de temperatura, precipitación y caudales. En la segunda se realizó la estructuración, parametrización, calibración de datos en HydroBID y la modelización de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático. Cada una de estas fases consta de sus correspondientes actividades que se evidencian en la figura 2 y que se describirán a continuación.



**Figura 2.** Fases metodológicas del estudio.

### 3.2.1. Fase 1. Los datos y su tratamiento.

#### 3.2.1.1. Selección de estaciones aledañas.

Para realizar el estudio se necesitó de información climatológica e hidrológica de entrada como es: precipitación media diaria, temperatura media diaria y caudal medio diario. Para lo cual previamente se seleccionaron las estaciones aledañas a la Unidad Hidrográfica.

En base a la disponibilidad de información existente en el Instituto de Meteorología e Hidrología “INAMHI”, se identificaron siete estaciones climatológicas y 4 estaciones hidrológicas existentes en la zona de influencia de la Unidad Hidrográfica en estudio.

En la Tabla 2 se presentan las estaciones meteorológicas seleccionadas para el estudio de la Unidad Hidrográfica.

**Tabla 2:** Estaciones climatológicas

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud S</b>	<b>Longitud W</b>	<b>Elevación (msnm)</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Temperatura</b>
M0133	Guaslán	-1.720833	-78.661111	2850	2004 - 2013	2004 - 2013
M0395	Cebadas	-1.907778	-78.640833	2930	2004 - 2013	-
M0396	Alao	-1.883333	-78.483333	3200	2004 - 2013	-
M0399	Achupallas	-2.280278	-78.768333	3178	2004 - 2013	-
M0405	Guasuntos	-2.229167	-78.810556	2438	2004 - 2013	-
M1209	Totorillas	-2.015000	-78.722222	3210	2004 - 2013	2004 - 2013
M1130	Shiry XII	-1.850000	-78.750000	3028	2004 - 2013	2004 - 2013

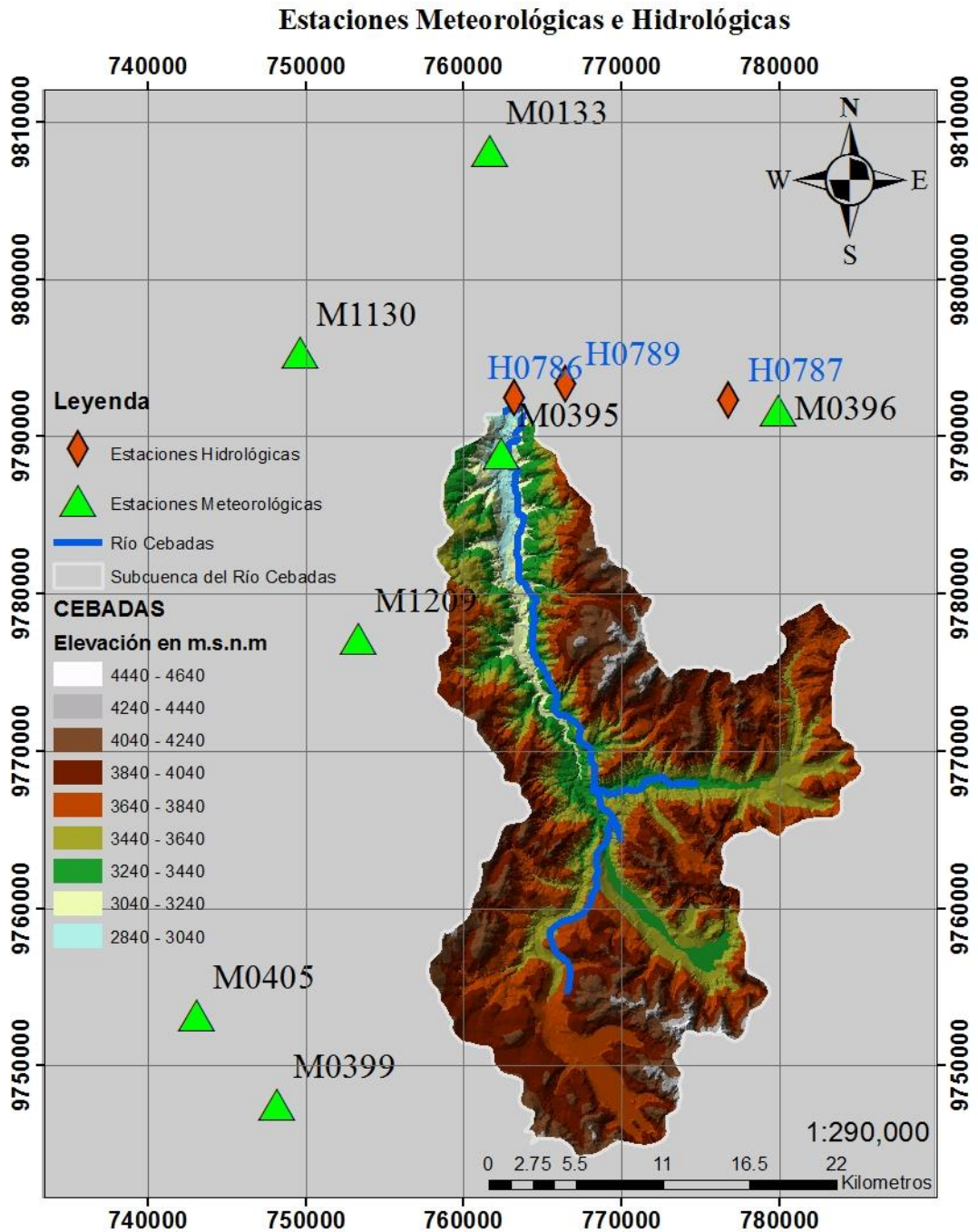
En la Tabla 3 se presentan las estaciones hidrológicas seleccionadas para el estudio de la Unidad Hidrográfica.

**Tabla 3:** Estaciones hidrológicas

<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud S</b>	<b>Longitud W</b>	<b>Precipitación</b>	<b>Periodo de registro</b>
H0786	Guamote AJ Cebadas	-1.879599	-78.635869	2864	2004 - 2013
H0787	Alao en Hda. Alao	-1.896667	-78.641944	3200	2004 - 2013
H0789	Guarguallá AJ Cebadas	-1.523400	-78.380100	2828	2004 - 2013
H0790	Cebadas AJ Guamote	-1.896667	-78.641944	2840	2004 - 2013

La localización de las estaciones meteorológicas e hidrológicas seleccionadas se indican en la figura 3:





**Figura 3.** Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológicas en la Unidad Hidrográfica de estudio.

#### 3.2.1.2. Obtención y llenado de datos.

Una vez identificadas las estaciones climatológicas e hidrológicas en el área de estudio, se recopiló y revisó la información existente en los anuarios meteorológicos e hidrológicos publicada por el INAMHI. Con los datos obtenidos se procedió a realizar una línea de tiempo

para definir las estaciones a ser empleadas en función de la información disponible, así como también el período de tiempo para la modelación.

Luego del análisis de la información y conocido el período para la modelación se realizó el relleno de datos faltantes en las diferentes estaciones climatológicas e hidrológicas, para lo cual se utilizó tanto la media aritmética como el método de Análisis de correlación y regresión.

El análisis de correlación y regresión consiste en determinar una regresión lineal con una estación base con datos fijos mediante una ecuación lineal expresada a través de la siguiente ecuación:

$$y = a + bx$$

Dónde:

y: Precipitación, temperatura o caudal estimado.

x: Precipitación, temperatura o caudal de estación base

a y b: Constantes de regresión

### 3.2.2. Fase 2. Metodología de análisis.

#### 3.2.2.1. Estructuración del modelo.

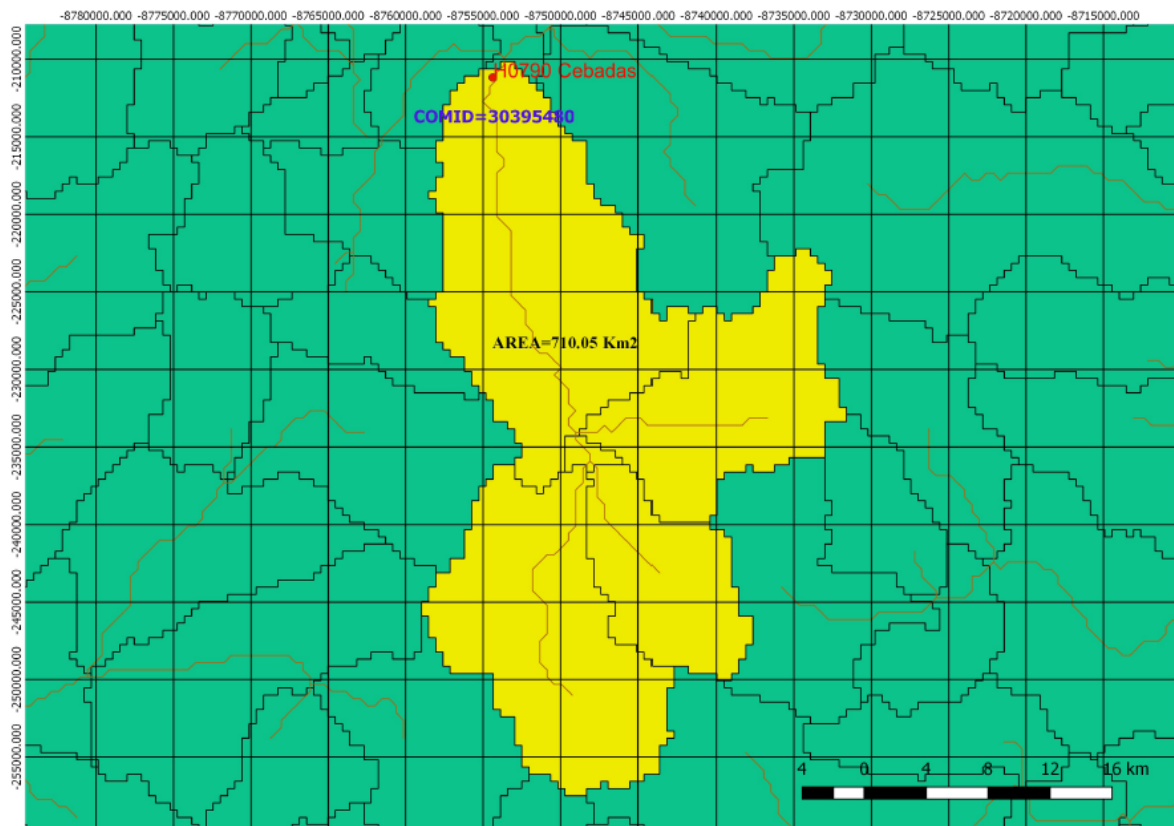
HydroBID, trabaja con un componente que da soporte al funcionamiento matemático del software, llamado modelo hidrológico lluvia-escorrentía cuyo algoritmo permite generar caudales diarios. El modelo se fundamenta en el método de la función generalizada de carga de cuencas, conocido como “Factor de carga de cauces generalizados” o “GWLF”. (Moreda et al., 2014)

HydroBID emplea un segmento del modelo GWLF vinculado con “lag-routing” conocido como método retardo-enrutamiento, que según Moreda et al. (2014), determina la escorrentía a partir de la información de precipitación y temperatura que el modelador introduce en cada unidad o subcuenca, luego determina la evapotranspiración e infiltración de la capa no saturada, para tener un caudal base por cada cuenca, a continuación hace un ajuste por percolación y determina el volumen almacenado de agua en las capas del suelo, proporcionando en última instancia un balance en cero.

Para la estructuración del modelo, previamente se debe disponer de información relacionada a la identificación o COMID de la Unidad, número de subcuencas drenantes o CATCHMENTS y también verificar el área de la unidad y la longitud del cauce. Información que se obtuvo siguiendo el procedimiento que se menciona a continuación:

Tomando como base la información de la estación hidrológica Cebadas H0790, utilizando el programa QGIS y con la ayuda de la base de datos LAC-AHD se delimitó el área de la Unidad Hidrográfica, obteniéndose el número de subcuencas drenantes o catchments y el código de identificación COMID de la Unidad que se utilizará en la modelización de caudales.

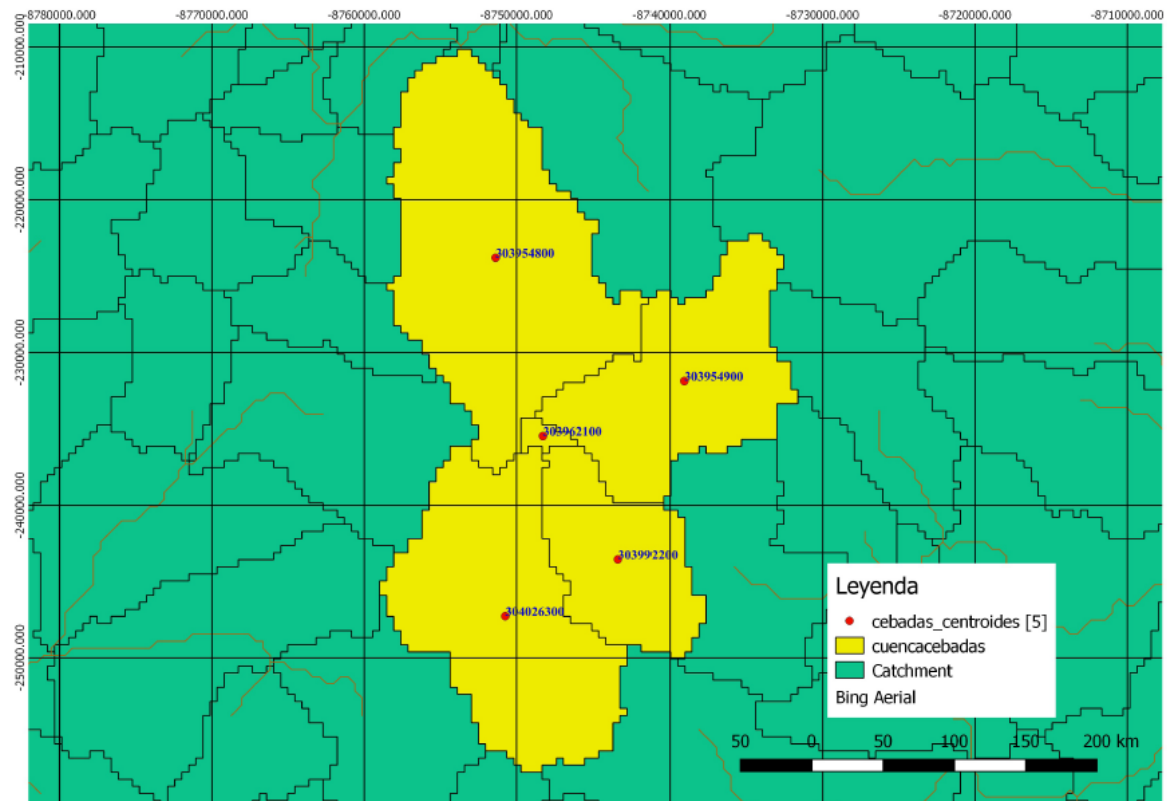
Para la Unidad Hidrográfica de estudio la base geográfica LAC-AHD cuenta con una división de 5 subcuencas drenantes, cubre un área total de 700,05 Km<sup>2</sup> y el COMID es 303954800. En la figura 4 se indica la delimitación de la Unidad Hidrográfica, el área, número de subcuencas y el código de identificación COMID de la Unidad.



**Figura 4.** Delimitación, área y código de identificación de la Unidad Hidrográfica en estudio, con la base de datos LAC-AHD.

Luego de identificadas las subcuencas drenantes de la Unidad Hidrográfica Cebadas con la ayuda del programa QGIS y de la base de datos LAC-AHD se determinaron los centroides de cada una de las subcuencas y se importó la información a un archivo con extensión csv, la misma que será utilizada para la interpolación de datos climáticos.

En la figura 5 se muestra la división e identificación de los centroides de las subcuencas de la Unidad Hidrográfica de estudio con la base de datos LAC-AHD.



**Figura 5.** División e identificación de los centroides de las subcuencas de la Unidad Hidrográfica de estudio con la base de datos LAC-AHD.

Con la información de los centroides, estaciones meteorológicas e hidrológicas y con los datos de temperaturas en °C, precipitaciones en cm y caudales en m<sup>3</sup>/s, todos en archivos individuales con formato csv, se procedió a estructurar la base de datos la misma que debe estar organizada en subcarpetas en forma secuencial dentro de la herramienta y que adicionalmente debe contener la base analítica de Sudamérica para poder incorporarla al SQLite en la corrida del modelo.

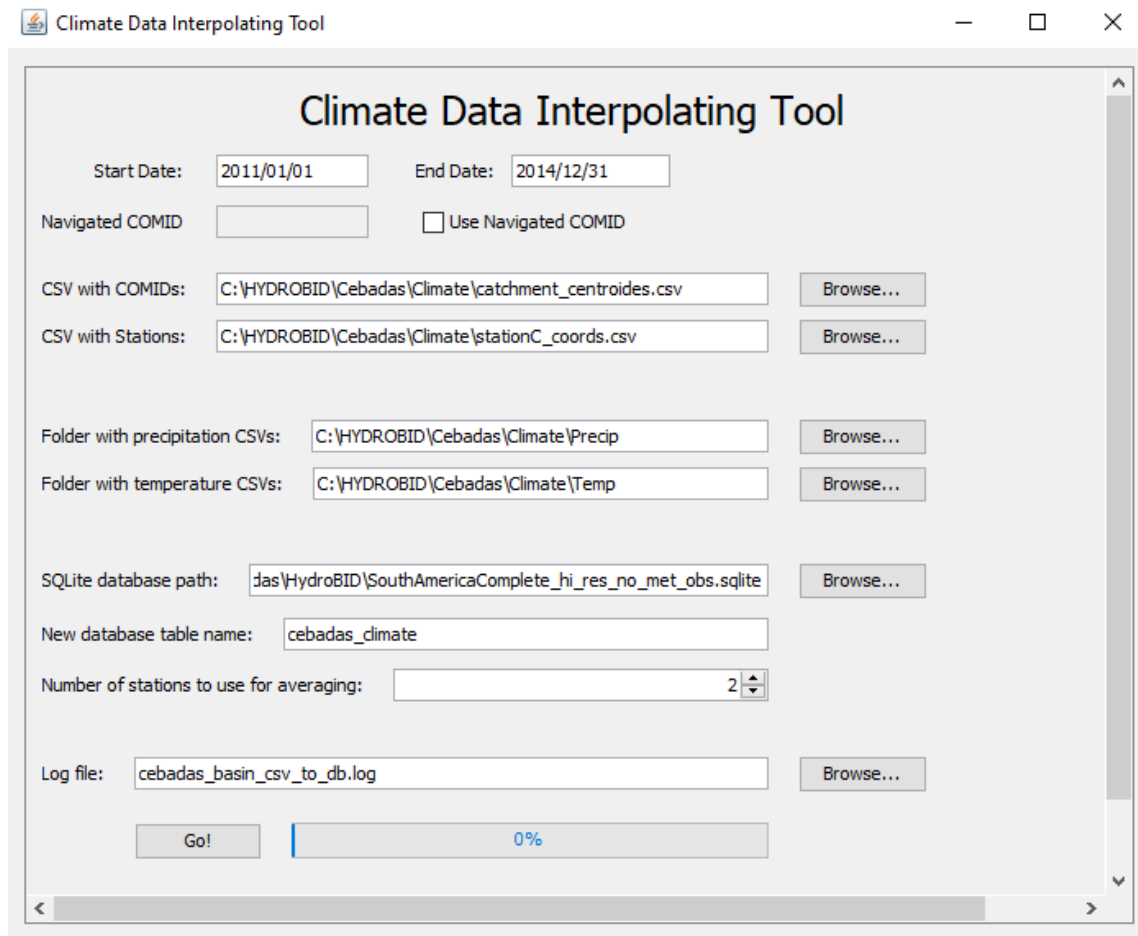
La secuencia de la disposición de las carpetas, subcarpetas y archivos del modelo se detallan a continuación.

- HydroBID
  - AHD\_2015
  - AHDTtools
  - UNIDAD HIDROGRÁFICA
    - Climate
      - Archivos Precipitación.csv
      - Archivos Temperatura.csv
      - Archivo Centroides.csv
      - Archivo Coordenadas estaciones.csv
    - Flow
      - Archivos Caudales.csv
    - GIS
      - Shapes centroides, polígonos, estaciones
    - HydroBID
      - Ejecutable
      - Settings
      - Base de Sudamérica.
    - Out
      - Carpeta de almacenamiento de resultados

Una vez que se definieron las carpetas y bases de datos del modelo, para completar la información se efectuó la interpolación de los datos de clima a cada una de las subcuencas que están delineadas por el AHD mediante el algoritmo Climate Data Interpolating Tool.

Esta herramienta de HydroBID trae la información precisa de las estaciones meteorológicas y la almacena en una base de datos para cada subcuenca que han sido definida por el AHD.

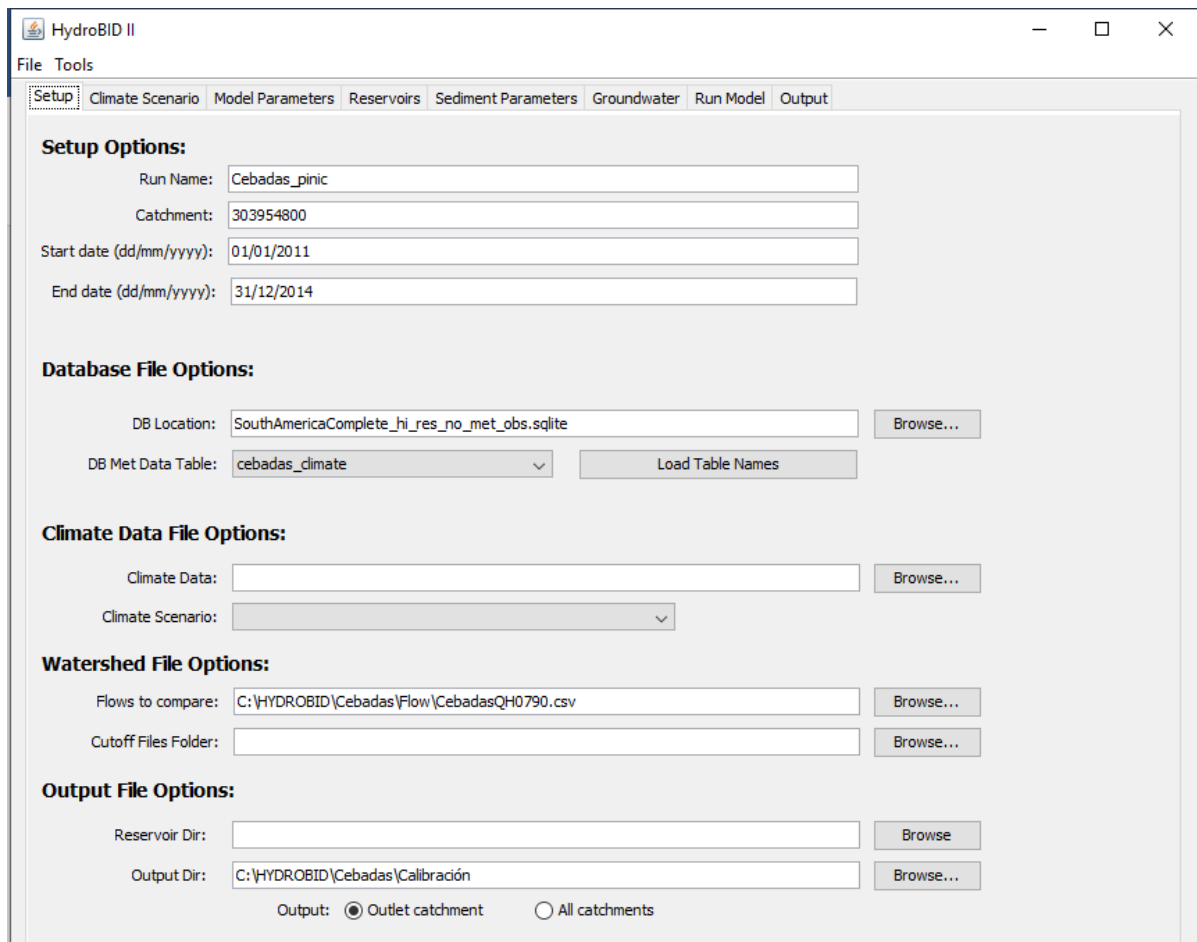
Para desarrollar esta actividad se utilizaron los archivos de las coordenadas de los centroides y de las estaciones; así como la información de la temperatura media diaria y precipitación media diaria que fue estructurada en el modelo. Una vez procesada la interfaz se obtuvo una nueva base de datos climática (Cebadas\_climate) que se puede observar en la figura 6.



**Figura 6.** Interfaz de interpolación climática “Climate Data Interpolating Tool”

El modelo HydroBID, por medio de la función Watershed Loading Function, extraerá la información interpolada para generar los caudales diarios en cada una de las subcuencas.

Una vez que se dispuso de toda la información previa se procedió a introducir los datos en la interfaz de usuario de HydroBID; dicha información contempló: Nombre de la modelización, identificación de la cuenca (Catchment), fechas de inicio y fin de la modelación, localización de la base de datos de la LAC-AHD que para este caso fue la base completa de Sudamérica, tabla de datos de interpolación climática, archivo de datos de caudales a comparar y la carpeta de salida de resultados. En la Figura 7 se presenta la interfaz inicial de HydroBID, donde se realizó el ingreso de los datos para la ejecución del modelo.



**Figura 7.** Interfaz de inicio Setup, HydroBID

### 3.2.2.2. Parametrización y corrida inicial del modelo.

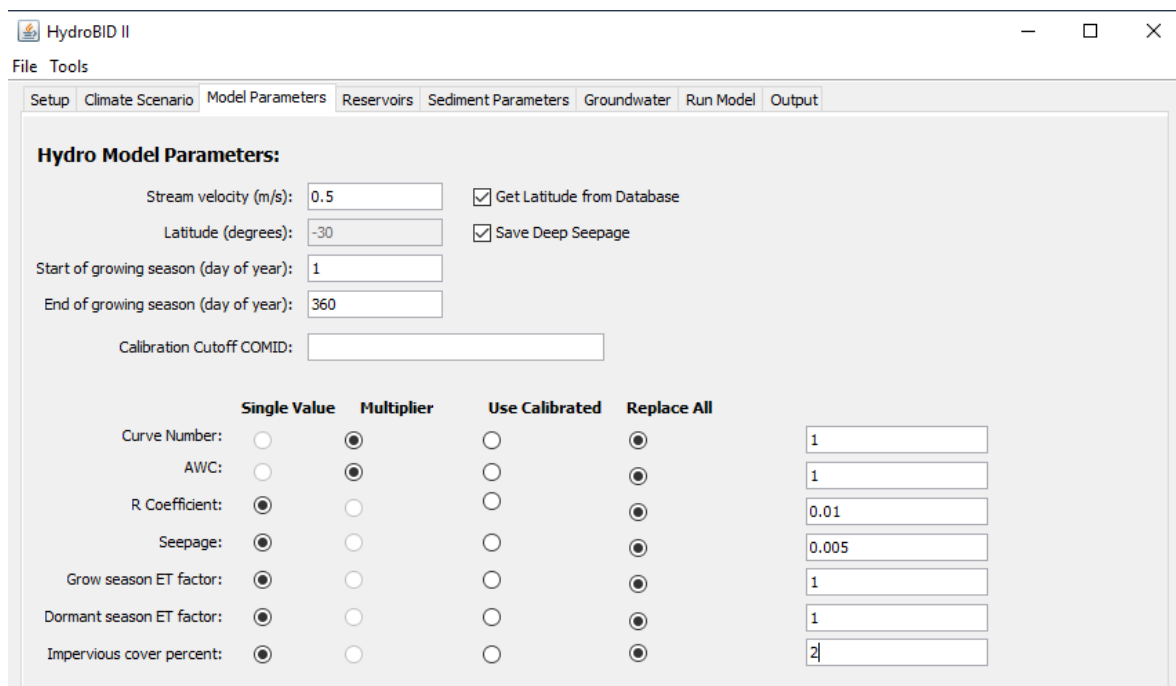
Como actividad previa a la primera implementación del modelo se ingresaron los parámetros hidrológicos e hidráulicos en la interfaz “Models parameters”, que correspondieron a:

Velocidad media de flujo correspondiente al caudal relacionado con el tiempo de recorrido del agua desde un punto aguas arriba, hasta otro punto, aguas abajo de la cuenca. En la LAC, se establece un valor por defecto de 0,5 m/s, y el modelador puede reemplazarlo por la velocidad promedio como un parámetro de calibración (Moreda et al., 2014).

La latitud que representa la localización del centroide de la Unidad geográfica que, para esta situación especial, el modelo la recupera automáticamente de la base de datos previamente colocada una vez que el modelo se alinea con las subcuencas de la AHD.

Los períodos de inicio y finalización de los cultivos, que para la unidad en estudio se consideró todo el año, ya que los cultivos en la zona son permanentes.

Adicionalmente por defecto aparecieron valores para los parámetros: Número de Curva Contenido de agua, Coeficiente de recesión, Permeabilidad, Factores de evapotranspiración de la estación de cultivo y de latencia y porcentaje de cobertura impermeable; los cuales luego de la corrida inicial fueron sometidos a un proceso de calibración y ajuste. En la figura 8 se presenta la interfaz de parametrización del modelo.



**Figura 8.** Interfaz de parametrización del modelo.

### 3.2.2.3. Calibración del modelo.

Una vez definidos los parámetros se procedió a realizar la corrida inicial del modelo HydroBID, en la subcuenca número 303954800, correspondiente a la estación H0790 Cebadas, ya que es la estación de caudales más próxima al punto final de salida de la cuenca del río Cebadas, obteniéndose los primeros resultados que fueron sometidos a un proceso de ajuste o calibración.

La implementación de modelos hidrológicos tiene como objetivo simular eventos que realmente están sucediendo. Sin embargo, pese a los avances científicos y tecnológicos, no existe un modelo que simule perfectamente los complejos procesos involucrados en la



hidrología debido a la existencia de errores de diferente índole, los mismos que se pueden minimizar con un proceso adecuado de calibración (Cabrera, 2012).

La calibración de la Unidad Hidrográfica se realizó manualmente, ajustando los valores de los parámetros hidráulicos del modelo hasta optimizar la relación entre la información observada y los resultados de la simulación del modelo.

La descripción de los parámetros que fueron calibrados se detalla en la tabla 4.

**Tabla 4:** Parámetros de calibración de HydroBID

Parámetro	Descripción
Número de curva (NC)	Caracteriza el tipo de suelo de la cuenca y su hidrología; oscila entre 0 y 1, en donde un valor de 1 representa que toda el agua que llueve se convierte en escorrentía y 0 representa una completa infiltración.
Contenido de agua en el suelo (AWC)	Representa la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo para ser usada por las plantas, afectando la infiltración hacia el agua subterránea. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa.
Coefficiente de Recesión (R)	Evidencia cómo el agua subterránea que se encuentra cerca de la superficie contribuye a los caudales de los ríos o corrientes superficiales después de un evento de lluvia. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.
Seepage o coeficiente de permeabilidad	Representa el intercambio entre las aguas subterráneas cerca de la superficie con los cuerpos de agua más profundos, en donde la cantidad de agua que se le atribuye a este parámetro se considera como una salida de la modelación. También puede ser ingresado como un multiplicador o en un valor directo.
Factor ET de la estación de cultivo	Caracteriza el factor de evapotranspiración de las plantas durante la etapa de cultivo. Se puede ingresar como multiplicador o como un valor directo.
Factor ET de la estación de latencia	Corresponde al factor de evapotranspiración en la etapa de latencia o en la etapa en la que no se encuentra cultivada la zona. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.
Porcentaje de la cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca y está disponible en algunas de las versiones del programa.

*Fuente:* (Nalesso y Coli, 2017)

Para valorar la eficiencia de la simulación, HydroBID cuenta con una serie de parámetros estadísticos partiendo de la premisa de que tanto en la serie generada como en la histórica están organizadas en una temporalidad diaria y que no hay ausencia de datos en el periodo de modelación; información que servirá para comprobar si el modelo está correctamente calibrado. En la tabla 5 se indican los parámetros estadísticos de desempeño y los rangos de valores recomendados.

**Tabla 5:** Rangos de Parámetros estadísticos para calibración del Modelo

<b>Parámetro estadístico de desempeño</b>	<b>Valor recomendado en un modelo</b>
Volumen general de error (Overall volumen error)	Entre – 30% a 30%
Número de correlación (Correlation, r-)	Cercano a 1
Correlación del modelo (Modified Correlation, Rmod)	Cercano a 1
Nash – Sutcliffe Efficiency, R <sup>2</sup>	Mayor a 0,60

Fuente: SPOC HydroBID, 2020

Luego de diferentes simulaciones y ajustes de los parámetros se obtuvo un modelo adecuadamente calibrado y con medidas estadísticas de desempeño dentro de los rangos recomendados, los cuales se especifican en la parte de resultados.

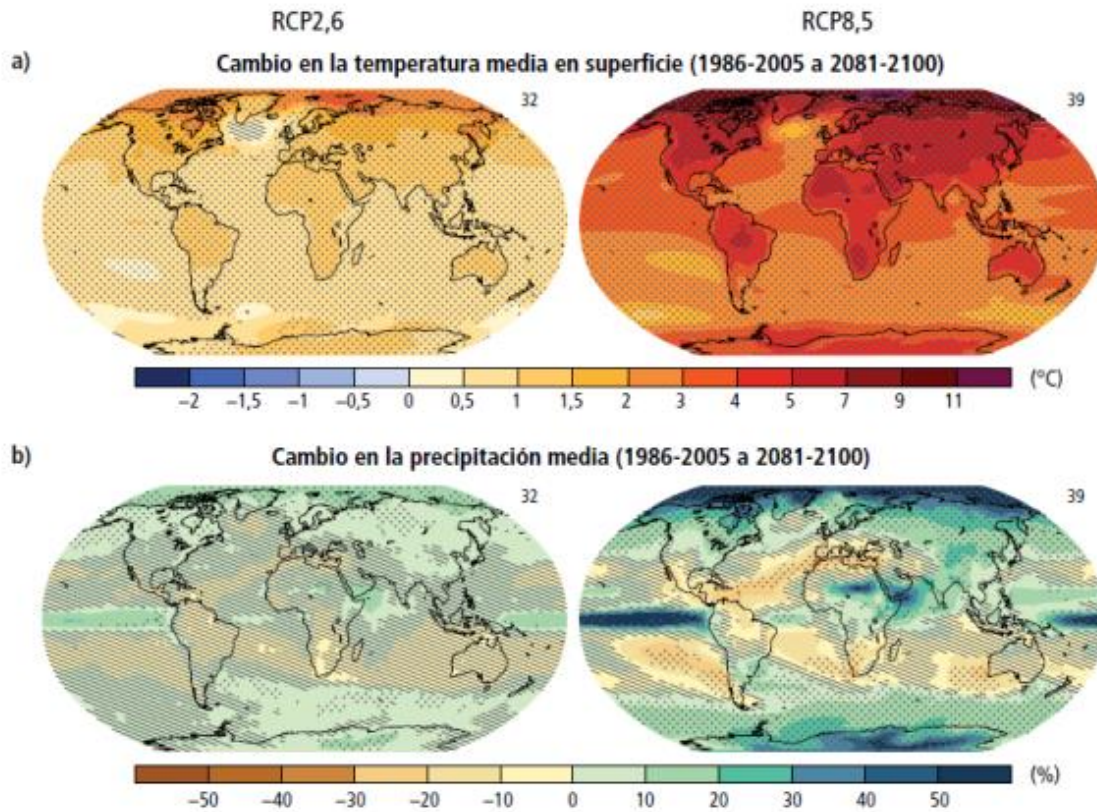
#### 3.2.2.4. Modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático

El componente de cambio climático, que forma parte de HydroBID, posibilita simular el impacto en los flujos diarios por variaciones de temperatura y precipitación relacionados al cambio climático.

Estas predicciones de variabilidad climática se encuentran en los modelos de circulación global divulgados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, conocido por sus siglas en inglés como IPCC (Figura 9).

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, existen pronósticos de un aumento de la temperatura media global en la superficie terrestre para el periodo entre el 2015 a 2035 entre 0,3°C a 0,7°C, y para el periodo 2081 a 2100 aumentando a casi 2°C (IPCC, 2014).

Para el caso de la precipitación, se espera que varíe entre el 10% y el 20% para las regiones de latitudes medias y las regiones tropicales (IPCC, 2014).



**Figura 9.** Proyecciones de cambio de temperatura media y precipitación media

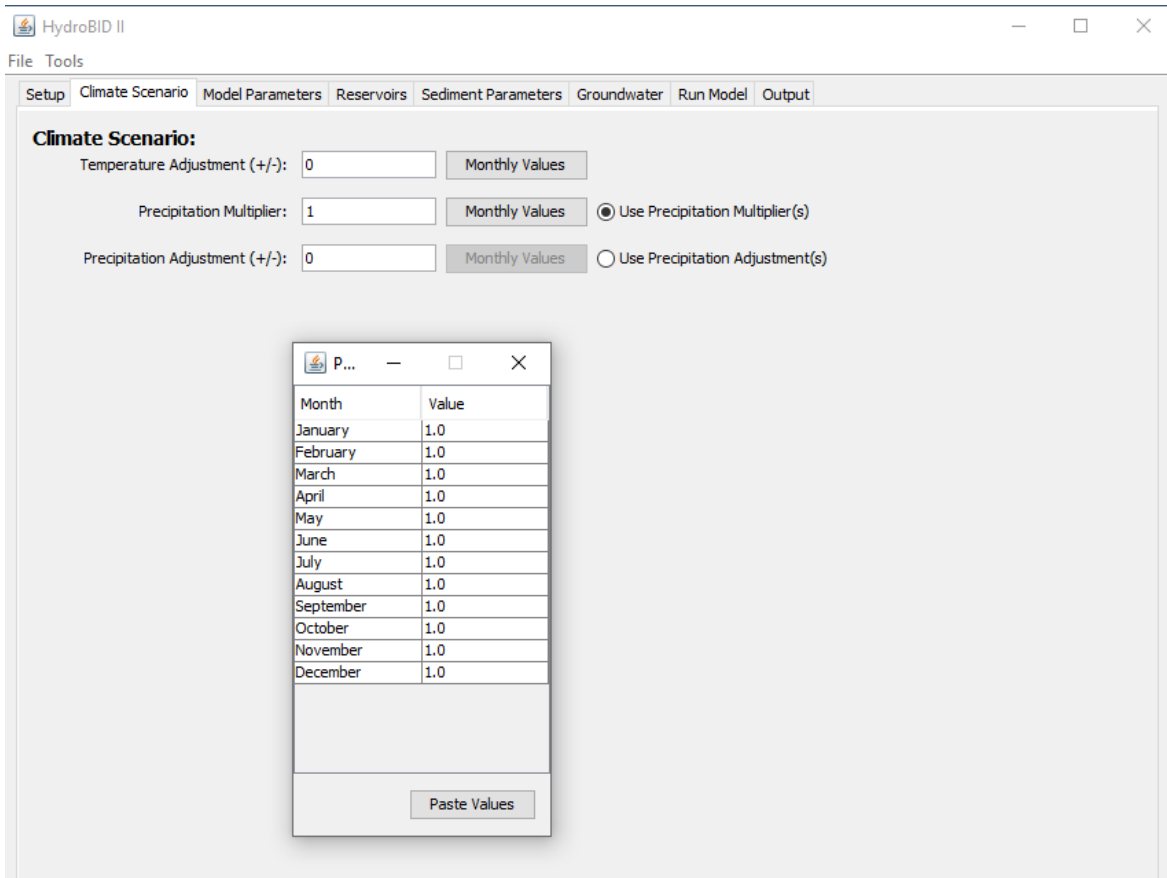
Fuente: IPCC, 2014

Con base en la información del IPCC y los posibles impactos del cambio climático sobre la Unidad del río Cebadas, se consideraron dos escenarios de estudio para la modelación: Escenario 1 con un incremento del 20% de la precipitación media actual sumado a la variación de temperatura de 2°C y un escenario 2 con un descenso en la precipitación del 20% manteniendo el incremento de la temperatura media de 2°C; ambos escenarios para los próximos 30 años. La tabla 6 resume los parámetros para los dos escenarios climáticos.

**Tabla 6:** Escenarios climáticos en la cuenca de estudio.

Escenario	1	2
Año	2050	2050
Temperatura	+2°C	+2°C
Precipitación	+20%	-20%

Para la modelación se utilizó la interfaz Climate Scenario de HydroBID que se muestra en la figura 10, en la que se ingresaron los datos de incrementos mensuales de temperatura y precipitación de acuerdo a lo establecido por el IPCC.



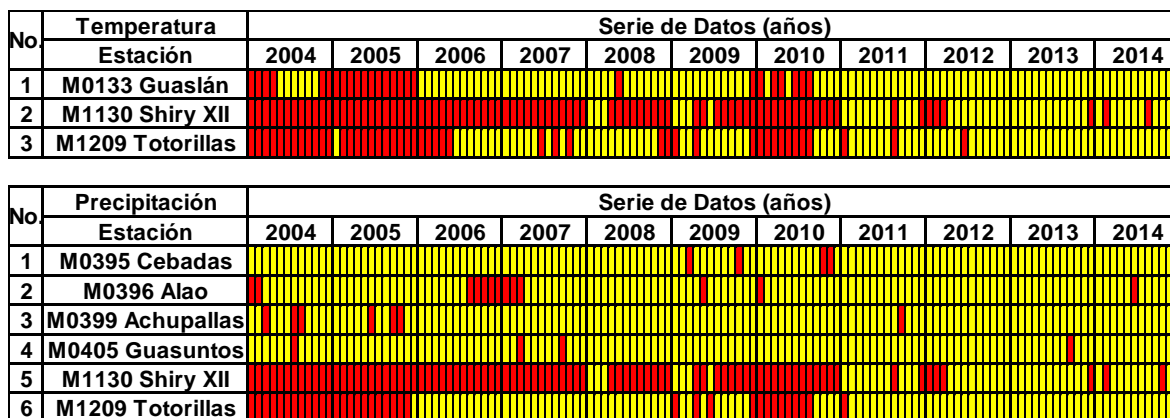
**Figura 10.** Interfaz de escenarios climáticos, HydroBID

## 4. RESULTADOS

### 4.1. TRATAMIENTO DE DATOS METEOROLÓGICOS E HIDROLÓGICOS.

Con la información meteorológica e hidrológica recabada del INAMHI se realizó la línea de tiempo para el análisis de los datos de las estaciones de la unidad en estudio.

En la figura 11 se muestra la línea de tiempo y se puede apreciar en color amarillo aquellos meses en que se dispone de información, y en color rojo los meses en donde no existen datos. Pudiéndose constatar que en el período 2011 – 2014 se presenta la mayor disponibilidad de información de temperatura y precipitación en las estaciones.



**Figura 11.** Línea de tiempo para registros de temperatura y precipitación en las estaciones situadas en la zona de estudio.

Luego del análisis realizado se definieron las estaciones climatológicas que se muestran en la tabla 7, de las cuales se obtuvo la información de temperatura y precipitación como datos de entrada para el modelo.

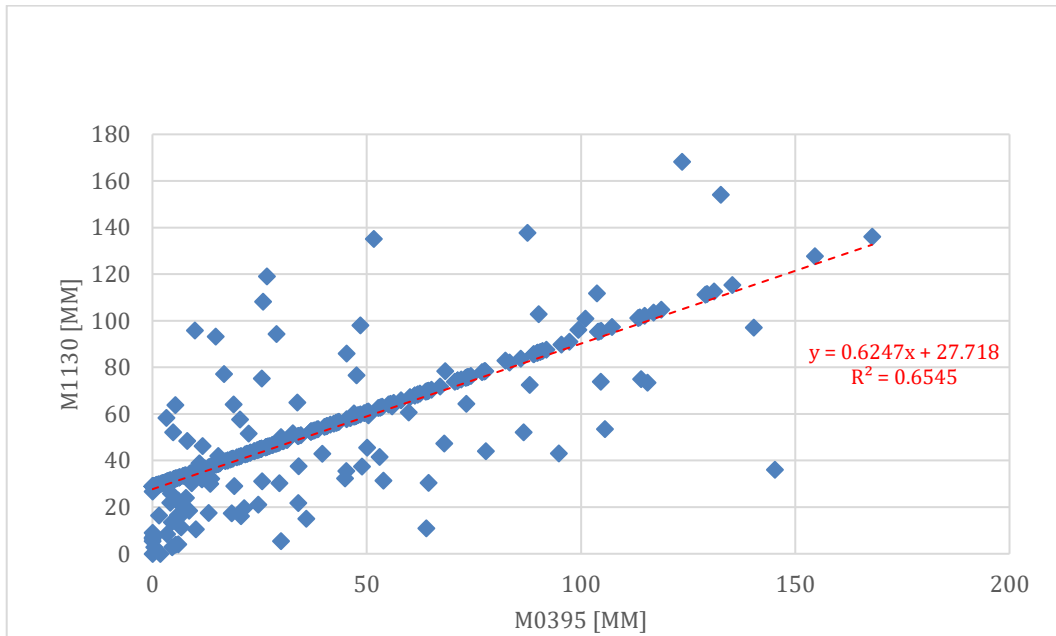
**Tabla 7:** Estaciones climatológicas definidas para el modelo

Parámetro	Estación
Precipitación	M0395 Alao
	M0396 Cebadas
	M0399 Achupallas
Temperatura	M1130 Shiry XII
	M1209 Totorillas

Para el procesamiento de los datos de caudales se seleccionó la estación hidrológica H0790 Cebadas AJ Guamote ya que está localizada en la desembocadura del cauce principal.

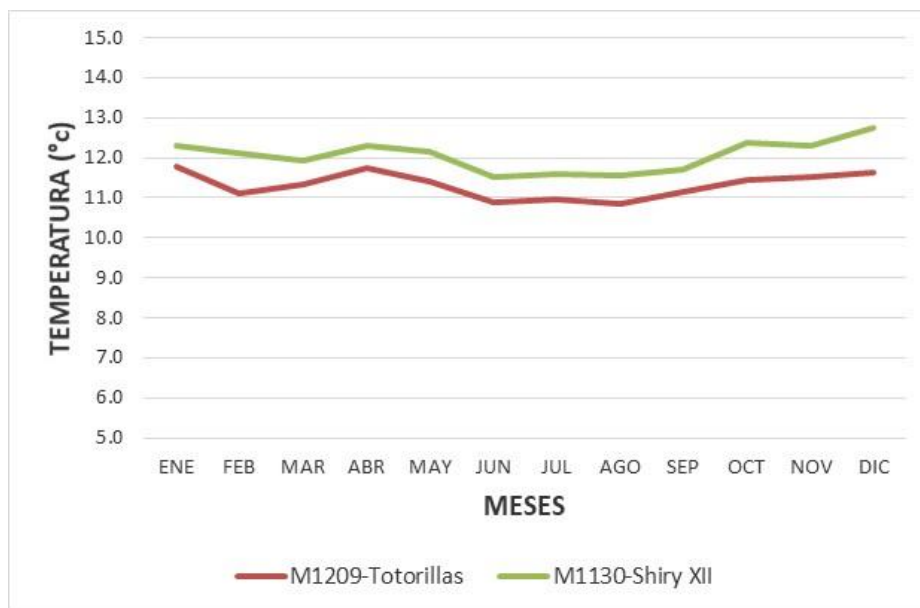
En base a la información existente en las estaciones seleccionadas se consideró un período de análisis comprendido entre el 01 de enero del 2011 al 31 de diciembre del 2014 para la ejecución del modelo. Una vez definida toda la información previa se procedió al relleno de datos faltantes de precipitaciones, temperaturas y caudales en el período establecido.

Para el caso de la estación M0395 Cebadas, el llenado de datos faltantes se efectuó tomando como base la información de la estación M1130 Shiry XII. El coeficiente de correlación se puede observar en la figura 12.



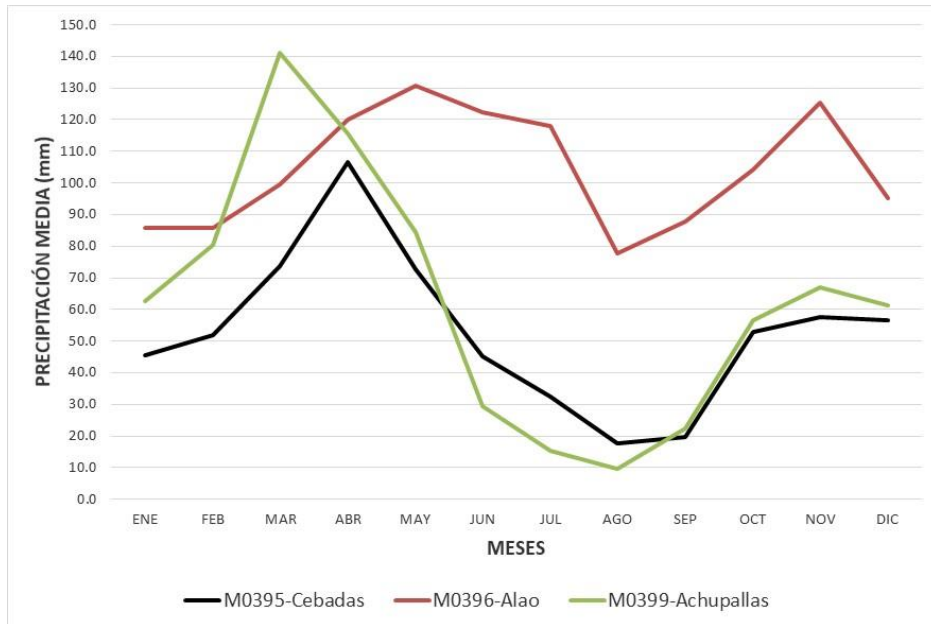
**Figura 12.** Coeficiente de correlación entre las estaciones M1130 – M0395

De la información climatológica procesada tenemos que la temperatura media anual para la estación M1209 Totorillas es de 11,3 °C y para la estación M1130 Shiry XII alcanza 12 °C. En la figura 13 se muestra la distribución temporal de la temperatura de las estaciones.



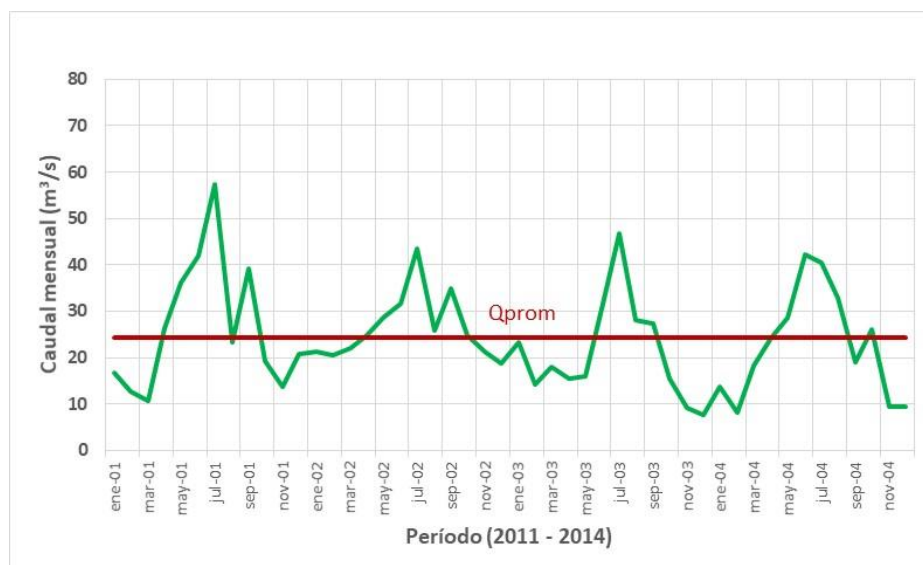
**Figura 13.** Distribución temporal de la temperatura.

Para el caso de la precipitación tenemos que el promedio anual obtenido para la estación M0395 Cebadas es de 632 mm, para la estación M0399 Achupallas el valor asciende a 746 mm y para el caso de la estación M0396 Alao el valor promedio es de 1261 mm. En la figura 14 se muestra la distribución temporal de la precipitación para las 3 estaciones.



**Figura 14.** Distribución temporal de la precipitación.

En la figura 15 se muestran los caudales medios mensuales del río Cebadas correspondientes a la estación H0790 Cebadas AJ Guamote para el período 2011 – 2014. El caudal promedio mensual asciende a 24,23 m<sup>3</sup>/s.

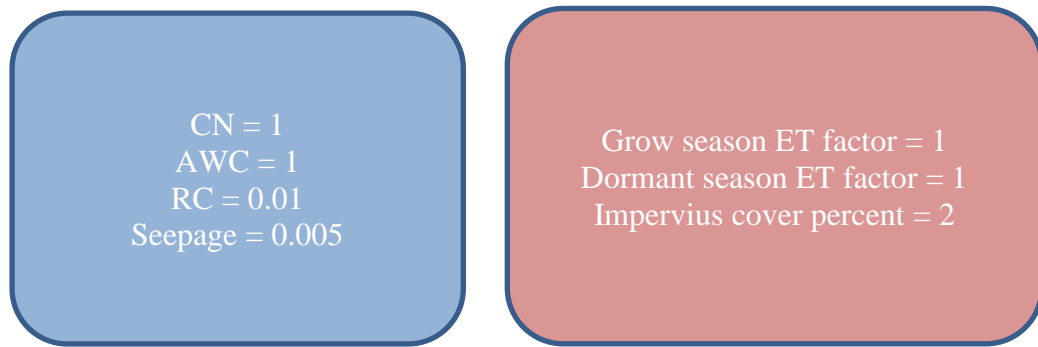


**Figura 15.** Caudales medios mensuales Río Cebadas

## 4.2.- CALIBRACIÓN DEL MODELO

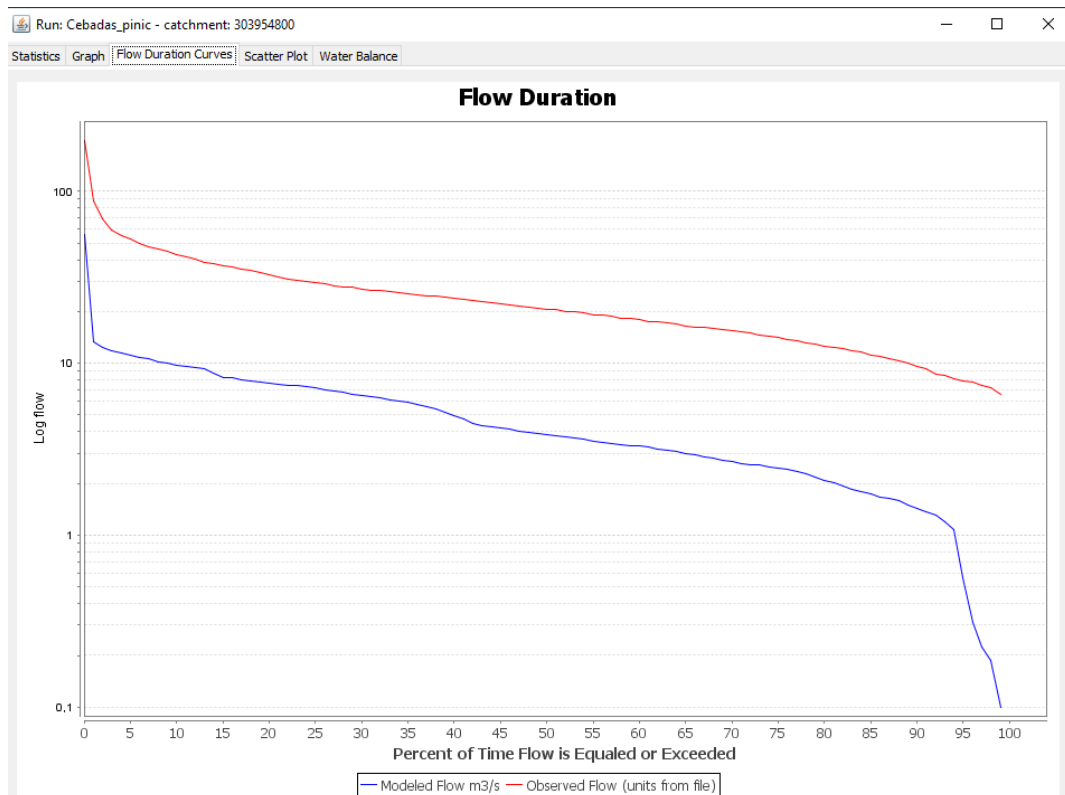
La modelación inicial con los parámetros por defecto del programa, arrojaron los siguientes resultados:

- **(Parámetros de entrada del modelo).**



**Figura 16.** Parámetros iniciales del modelo para primera corrida del programa HydroBID

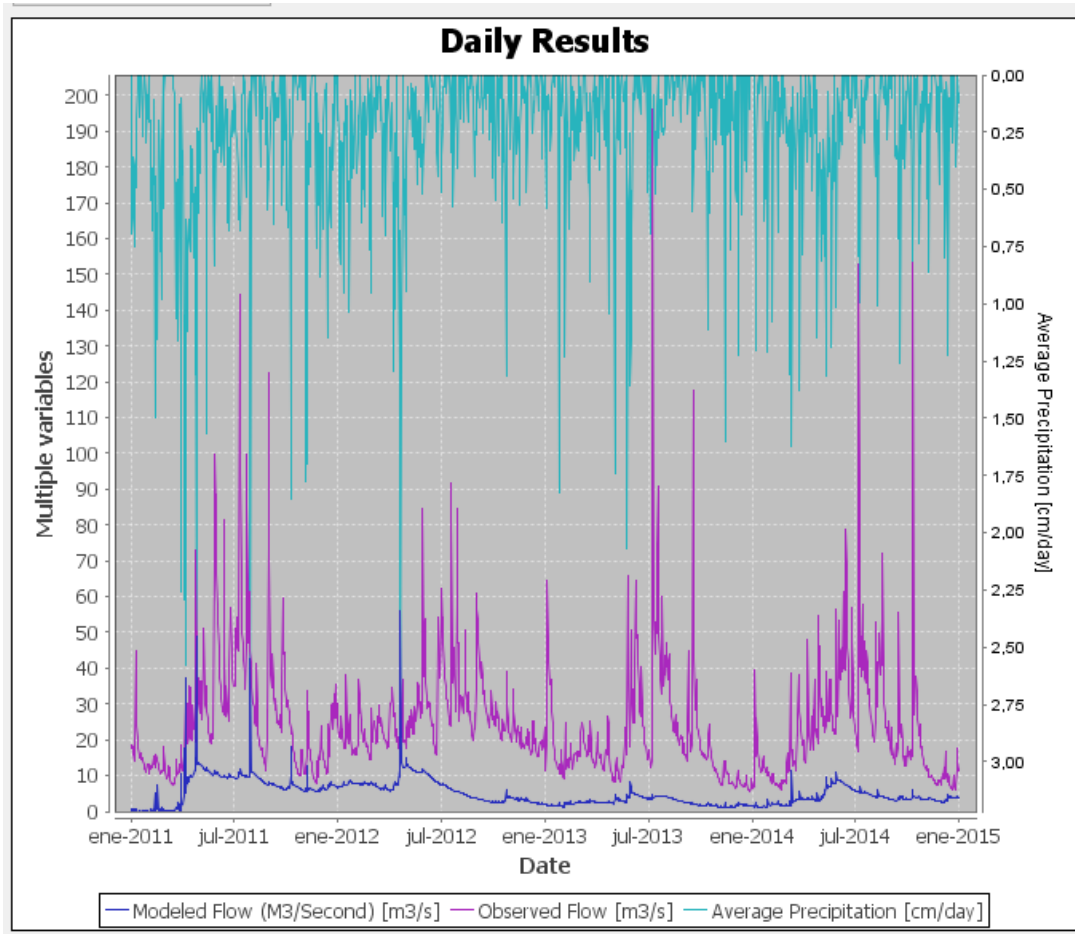
Los diagramas obtenidos con la primera simulación en el programa HydroBID se indican en las figuras 17 y 18.



**Figura 17.** Curva de duración de caudales Modelados y Observados



En la gráfica de duración de flujo de la modelación inicial se puede observar que el caudal observado está muy por debajo (-81.75%) con respecto al caudal simulado.

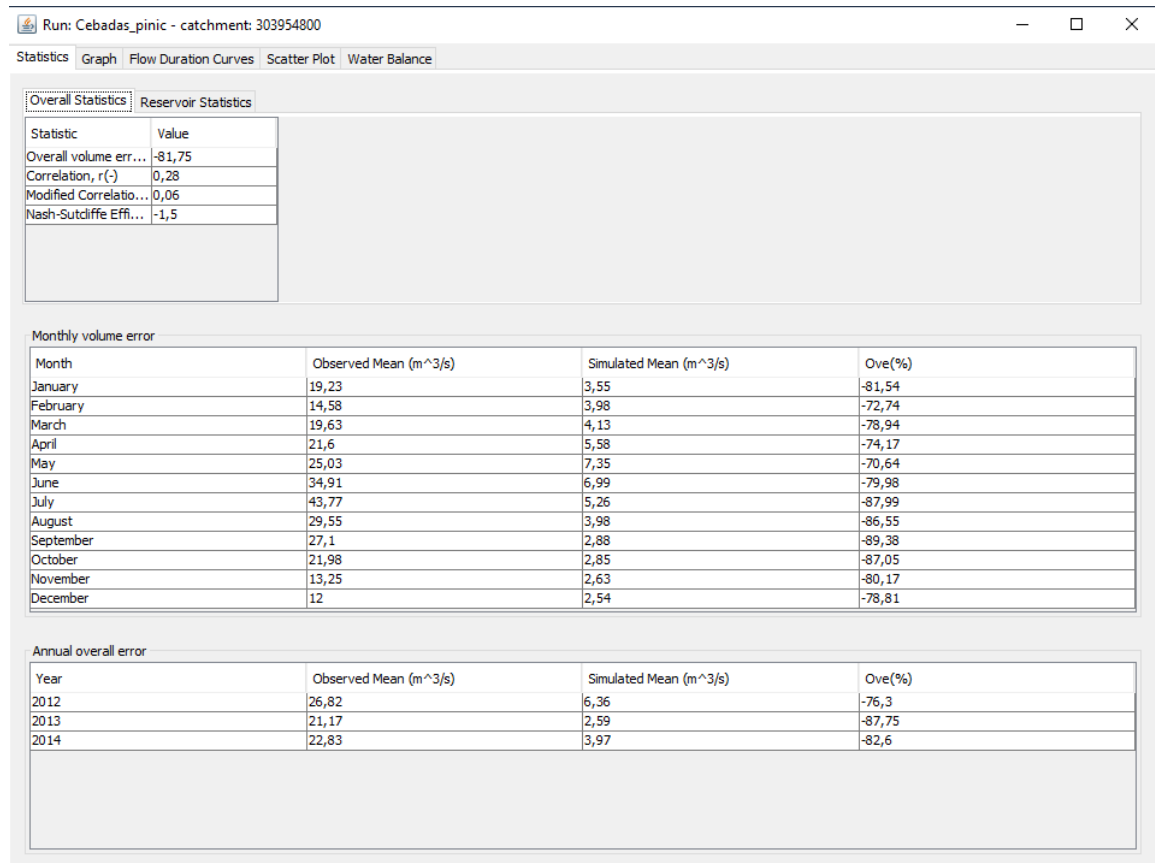


**Figura 18.** Gráfica de Caudales diarios Modelados y Observados

En la gráfica de hidrograma medio diario se puede ver que existen grandes discordancias en los picos de los caudales observados y simulados, evidenciándose que existe una subestimación de los caudales modelados.

En cuanto a las medidas estadísticas, todos los parámetros están fuera de los rangos de valores adecuados en un modelo calibrado como se puede ver en la figura 19; el Volumen general de error "Overall volumen error" posee un valor de -81,75% que está por debajo del valor mínimo establecido que es -30%, el Número de correlación "Correlation (r-)" y la Correlación del modelo "Modified Correlation, Rmod" tienen valores de 0,28 y 0,06 respectivamente y están lejos del umbral recomendado que es cercano a 1.

De igual manera el valor del índice Nash – Sutcliffe Efficiency,  $R^2$ , está por debajo del rango recomendado que es mayor a 0,60; por lo que fue necesario realizar un ajuste a los parámetros iniciales del modelo.



**Figura 19.** Datos estadísticos de la primera simulación del modelo.

Con el propósito de lograr una representación real del comportamiento hidrológico del modelo durante el proceso de calibración en varias iteraciones se fueron ajustando los parámetros hidráulicos y simultáneamente se iba revisando que las curvas de duración de caudales observadas y simulados se solapen de la mejor manera y que los parámetros estadísticos estén dentro los rangos aceptables para un modelo calibrado.

El proceso de calibración se realizó de acuerdo a la siguiente secuencia:

Para reducir la brecha del volumen total como primer paso se disminuyó el valor del Coeficiente de Permeabilidad “Seepage” (de 0,005 a 0,00001) para de esta manera disminuir la infiltración y aumentar el volumen de escorrentía.

También se disminuyó el Coeficiente de recesión “R” a 0,008, para de esta manera forzar a que los caudales más altos tengan una mayor repetitividad y del mismo modo se reduzcan los caudales menores, también se busca aumentar la pendiente de la curva ya que hay mayor pérdida de escorrentía.

Luego se disminuyó el factor de ET para Temporada latente a 0,01; con lo que se aumentará el volumen de escorrentía.

Para ajustar los picos se disminuyó el Número de curva (CN) a 0,80; lo cual incrementa la escorrentía y la sensibilidad a los eventos de precipitación.

Finalmente, para complementar el ajuste tanto de las curvas de duración y del hidrograma diario, se aumentó el Contenido disponible de agua AWC a 1,20.

Con todos los ajustes realizados, los parámetros hidráulicos finales del modelo se muestran en la tabla 8.

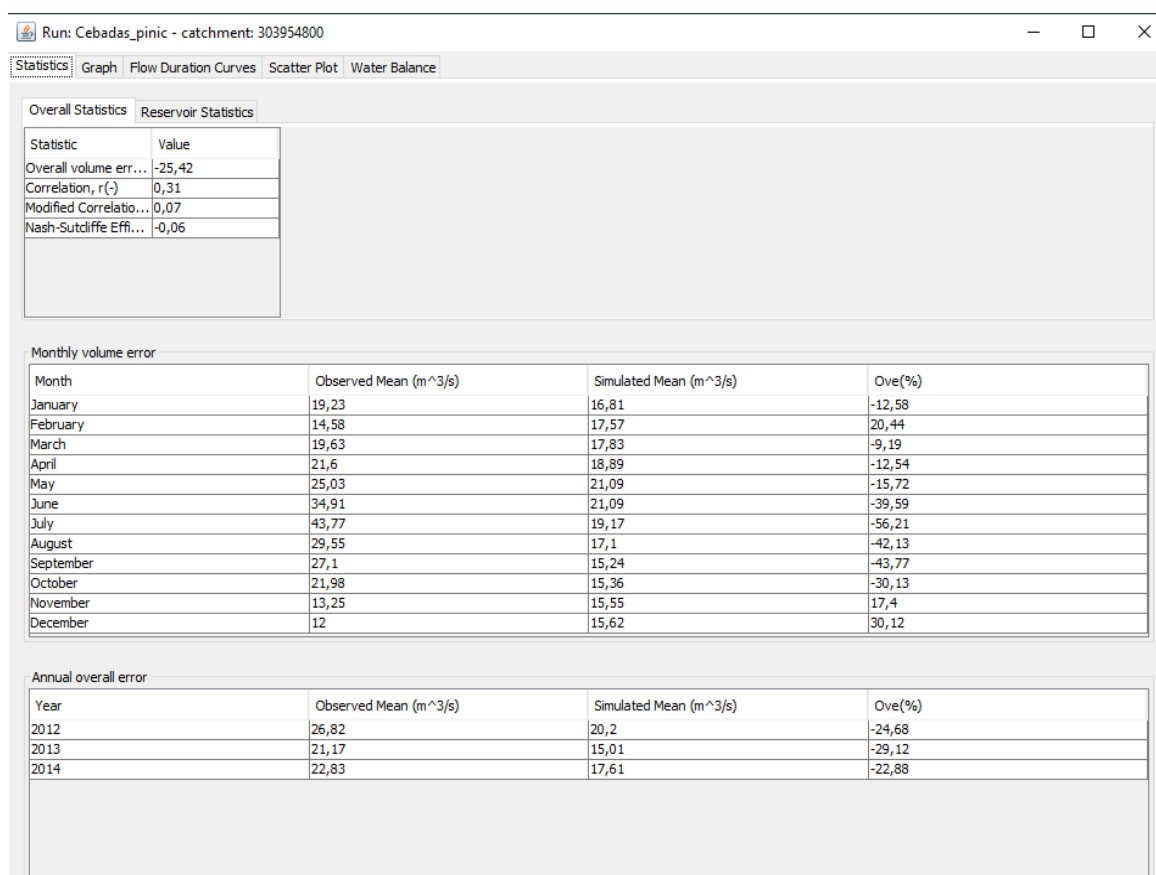
**Tabla 8.** Parámetros hidráulico finales obtenidos en la calibración del Modelo

<b>Parámetro del modelo</b>	<b>Valor final</b>
CN	0,80
AWC	1,20
R Coefficient	0,008
Seepage	0,00001
Grow season ET Factor	1
Dormant season ET Factor	0,01
Impervious cover percent	1

Con los valores de los parámetros hidráulicos definidos en la calibración, se ejecutó el modelo, obteniéndose la información que se detalla a continuación.

## Parámetros estadísticos y caudales observados y simulados.

En lo referente a las medidas estadísticas de desempeño, tres de los parámetros están dentro de los rangos de valores adecuados en un modelo calibrado como se puede ver en la figura 20; el Volumen general de error “Overall volumen error” posee un valor de -25,42% que está por encima del valor mínimo establecido que es -30%, el Número de correlación “Correlation (r-)” y la Correlación del modelo “Modified Correlation, Rmod” tienen valores de 0,31 y 0,07 respectivamente.



**Figura 20.** Parámetros estadísticos del modelo Calibrado y caudales mensuales y anuales medios.

En la figura 20 a más de los parámetros estadísticos, se presentan caudales mensuales de descarga de la cuenca, y una comparación en porcentaje del error entre los resultados observados y los simulados dentro del modelo. Se puede observar que, en los meses de junio (-39,99%), julio (-56,21%), agosto (-42,13%) y septiembre (-43,77%) el modelo genera mayor subestimación de caudales y la sobrestimación mayor se presenta en los meses de

noviembre (+17,14%) y diciembre (+30,12%). En la figura 21 se puede evidenciar las diferencias entre los caudales mensuales observados y simulados.



**Figura 21.** Diagrama de caudales promedios mensuales observados y modelados con HydroBID

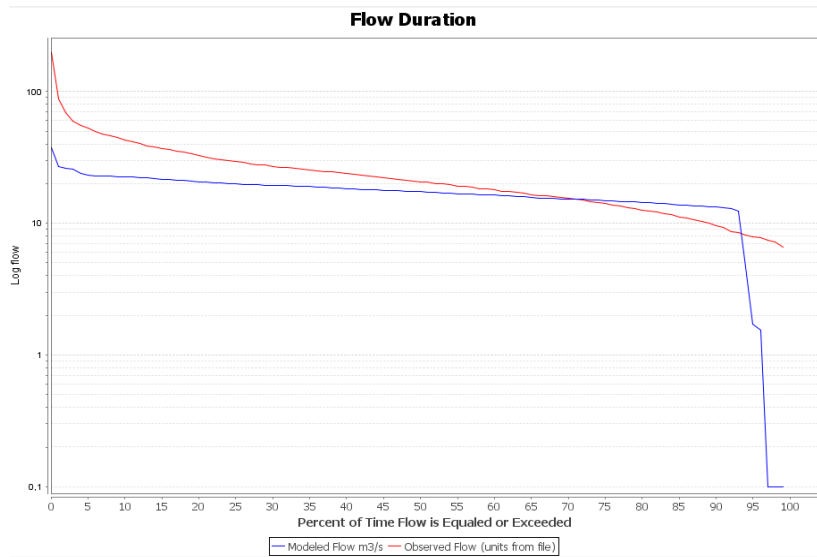
En cuanto a los caudales promedios anuales para los tres años se observa una subestimación del caudal modelado que bastante similar y corresponde al error promedio de -25,42%. El caudal medio anual simulado para el período 2011 – 2014 es de 17,61 m<sup>3</sup>/s. La figura 22 muestra las diferencias entre los caudales promedios anuales observados y simulados.



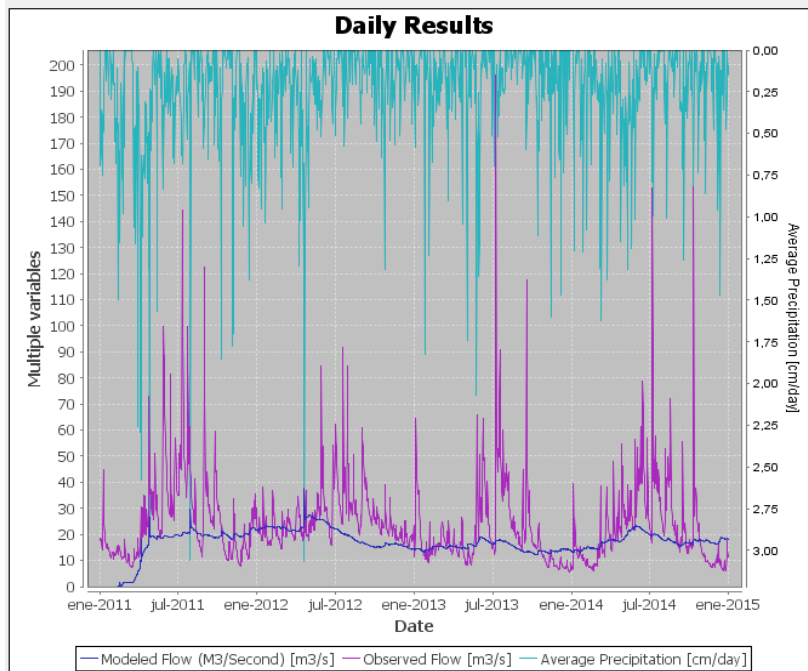
**Figura 22.** Diagrama de caudales promedios anuales observados y modelados con HydroBID.

## Gráficas de la interfaz.

En las Figuras 23 y 24 se observa la curva de duración de caudales ya calibrados, así como el hidrograma de caudales modelados y observados. Se puede apreciar en la curva de duración de caudales que los valores simulados están por debajo de los observados. En estas condiciones, la calibración se centra en elevar el caudal base. Los caudales simulados igualan a los observados en un 70% de tiempo.

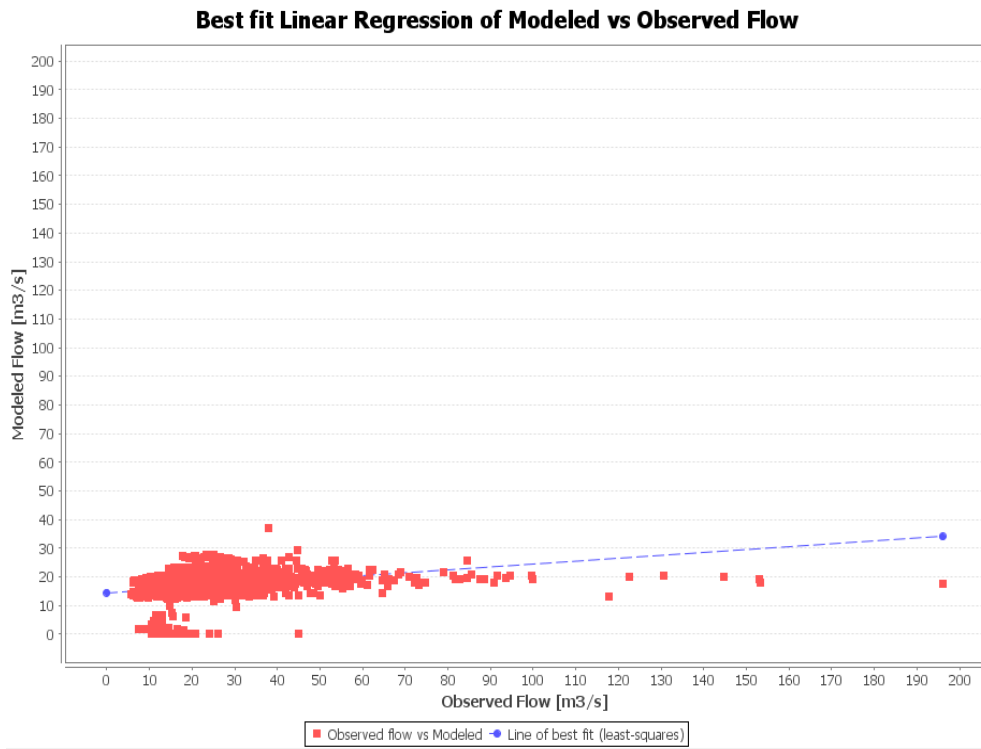


**Figura 23.** Curva de duración de caudales Modelados y Observados del modelo calibrado



**Figura 24.** Hidrograma de Caudales diarios Modelados y Observados del modelo calibrado

En la Figura 25 se presenta la correlación de los datos de caudales observados con los modelados, pudiéndose evidenciar que la correlación es baja.



**Figura 25.** Correlación de Caudales Modelados y Observados del modelo Calibrado

### Balance hídrico.

En la figura 26, se observan valores anuales en millones de metros cúbicos para todas las variables estimadas por el modelo tales como: precipitación, evapotranspiración, escorrentía (Runoff), volumen de aguas subterráneas hacia el cauce (Shallow GW), caudal total generado por la cuenca (Total Flow), almacenamiento no saturado, aporte de aguas subterráneas, almacenamiento saturado y recarga.

Run: Cebadas\_pinic - catchment: 303954800

Statistics | Graph | Flow Duration Curves | Scatter Plot | **Water Balance**

Units: Millions m3 | Aggregate to: Year

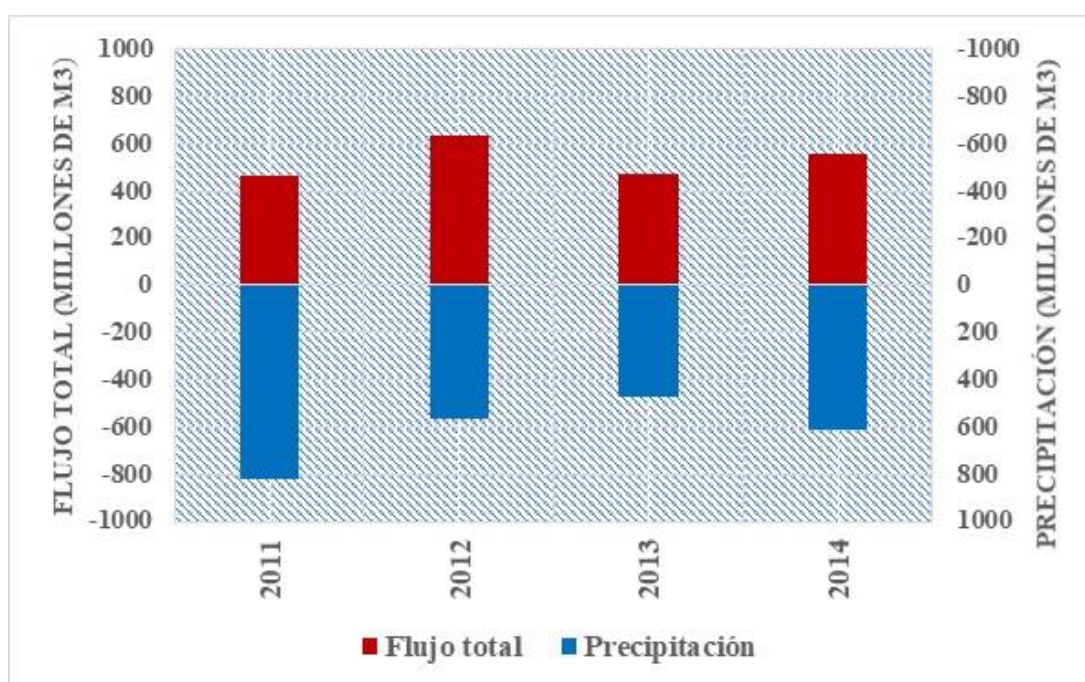
Surface Water Balance

Date Range	Precipitation	Evapotranspi...	Runoff	Shallow GW ...	Total Flow	Δ Unsaturat...	Δ Saturat...	Net GW Cont...	Recharge	Volume Balan...
2011	8,21512E2	3,48096E0	2,90006E0	4,64748E2	4,67648E2	1,18747E2	2,3106E2	0	5,76287E-1	-2,54659E-13
2012	5,64898E2	3,61753E0	1,19801E0	6,37039E2	6,38237E2	9,11339E-3	-7,77548E1	0	7,89928E-1	-3,00133E-13
2013	4,69508E2	3,61346E0	2,93753E-2	4,74418E2	4,74447E2	-4,66528E-2	-9,09364E0	0	5,88278E-1	4,02451E-13
2014	6,10367E2	3,68708E0	2,08498E-1	5,55153E2	5,55362E2	5,93706E-2	5,05701E1	0	6,8839E-1	-9,09495E-14

**Figura 26.** Balance Hídrico del modelo Calibrado

Como el análisis del balance hídrico de esta investigación es solo superficial, los valores de la contribución de aguas subterráneas (Net GW Contribution), son cero en todas las ejecuciones del modelo.

Del balance de la cuenca se puede resaltar la correlación directa de la variación de precipitación con respecto al flujo total de la cuenca, tal y como se evidencia en la Figura 27, en donde se representan los años con mayores incrementos de precipitación y por tanto de flujo. Para el modelo calibrado el flujo total promedio es de  $534 \text{ Mm}^3 / \text{año}$  y con una precipitación media por año de  $617 \text{ Mm}^3$ .



**Figura 27.** Balance de Caudal – Precipitación para la Unidad Hidrográfica Cebadas en su estado actual

Otro resultado importante de la modelación es que para los años 2012 y 2013 que tienen la menor precipitación, existe estrés hídrico en la cuenca, alcanzando el agua superficial valores inferiores a cero, como se muestra en la tabla 9; interviniendo el almacenamiento durante estos años para atender las demandas del recurso hídrico. La tabla 9 muestra los parámetros del balance hídrico.



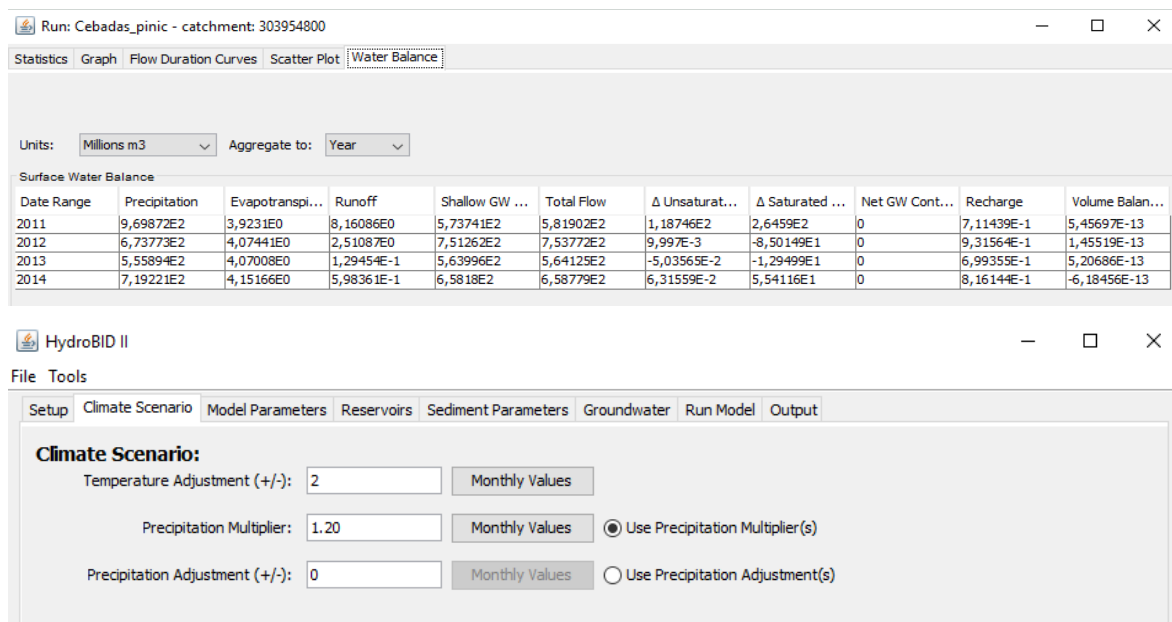
**Tabla 9.** Parámetros del balance hídrico

Rango de datos	Precipitación	Evapotranspiración	Escurrimiento	Volumen de aguas subterráneas hacia el cauce	Flujo total	Balance	Almacenamiento no saturado	Almacenamiento saturado	Aguas subterráneas	Recarga	Error en el balance hídrico
2011	821.51	3.48	2.90	464.75	467.65	350.38	118.7470	231.06	0	0.5763	0.00
2012	564.90	3.62	1.20	637.04	638.24	-76.96	0.009	-77.75	0	0.7899	0.00
2013	469.51	3.61	0.03	474.42	474.45	-8.55	-0.047	-9.09	0	0.5883	0.00
2014	610.37	3.69	0.21	555.15	555.36	51.32	0.0594	50.57	0	0.6884	0.00

### 4.3. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

#### 4.3.1. Escenario 1.

Para el análisis del cambio climático, se realizaron dos modelaciones, el escenario 1 considerando un aumento de la temperatura en los próximos años de 2°C y al mismo tiempo un incremento de la precipitación en un 20%. La figura 28 muestra los resultados del modelo correspondiente al escenario 1.



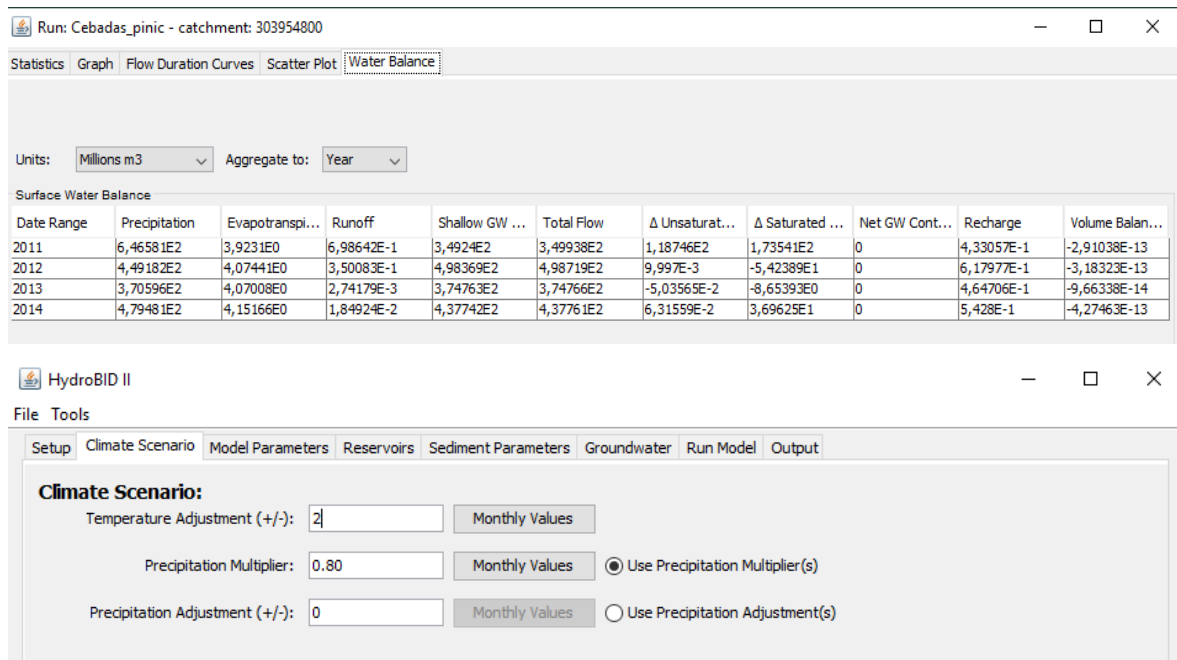
**Figura 28.** Balance Hídrico, escenario de cambio climático 1.

Para el escenario 1 de cambio climático, el flujo total promedio es de 637 Mm<sup>3</sup> / año, con una precipitación media anual de 730 centímetros. En comparación con la información obtenida en el modelo inicial (534 Mm<sup>3</sup> / año) con este escenario, el flujo total promedio

aumentó en un 19,3 %. Es decir, existe una relación directa entre el incremento de precipitación con el aumento del caudal total.

#### 4.3.2. Escenario 2

En el segundo escenario, se consideró un aumento de la temperatura en los próximos años de 2°C y una disminución de las precipitaciones del 20%. La figura 29 muestra los resultados del modelo correspondiente al escenario 2.



**Figura 29.** Balance Hídrico, escenario de cambio climático 2.

Para el escenario 2 de cambio climático, se obtuvo un flujo total promedio de 415 Mm<sup>3</sup> / año, con una precipitación media anual de 487 centímetros. En comparación con la información obtenida en la modelación inicial (534 Mm<sup>3</sup> / año) con este escenario existe una disminución del caudal total promedio en un 22,2 %.

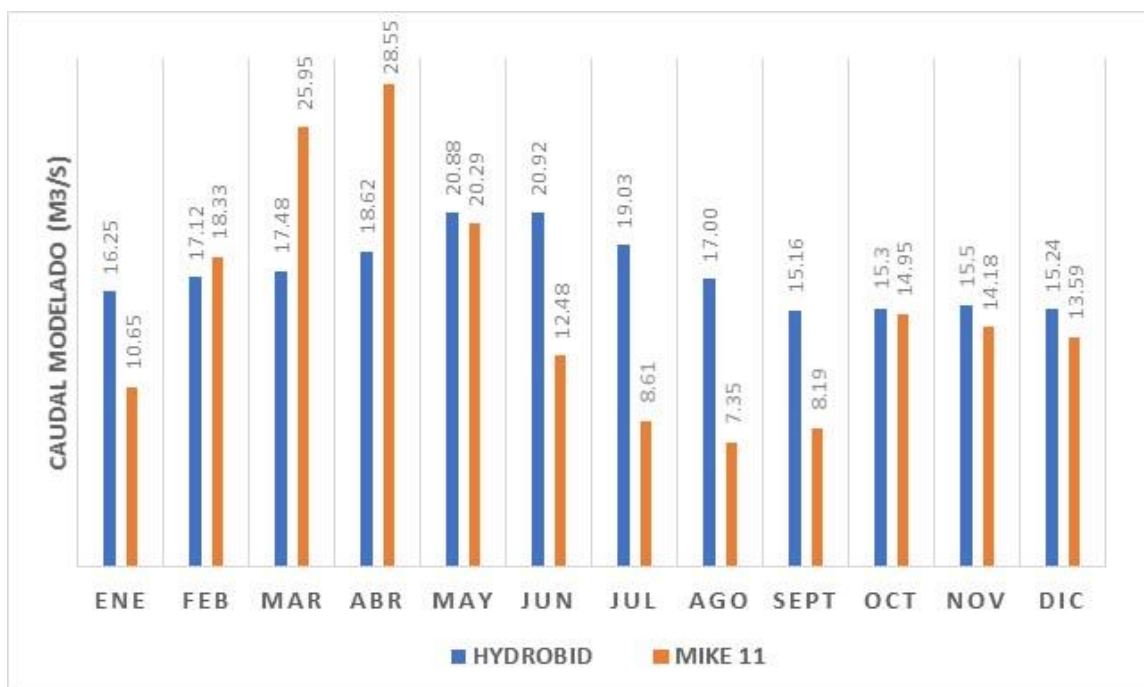
## 5.- DISCUSIÓN

Para verificar los resultados alcanzados, se analizaron los estudios realizados con el modelo HydroBID por la Secretaría Nacional del Agua SENAGUA en la cuenca del Río Pastaza y con el modelo hidrológico MIKE 11 efectuado por el Consejo Nacional de Recursos Hídricos en la subcuenca del Río Chambo, dentro del territorio ecuatoriano.

## Balance Hídrico:

Los resultados obtenidos en la modelación del estado inicial (actual) del balance hídrico, determinaron una oferta hídrica media para la Unidad de Cebadas de  $751.168 \text{ m}^3/\text{km}^2$  /año equivalente a  $23,82 \text{ l/s/km}^2$ , valor que difiere en un 12,7% con lo establecido por el CNRH para la Unidad Hidrográfica del Río Cebadas con el modelo MIKE 11 con un valor equivalente a  $21,14 \text{ l/s/km}^2$ . De igual manera también difiere en un 5,9% con respecto al aporte específico medio de  $22,5 \text{ l/s/Km}^2$  calculado por el modelo MIKE 11 para la subcuenca del río Chambo (CNRH, 2007) de la cual es parte la Unidad Hidrográfica del Río Cebadas; con lo cual se puede indicar que el modelo HydroBID arroja resultados bastante aceptables, la diferencia podría obedecer a que para la simulación se utilizó información de un período reducido de 4 años.

En figura 30 se pueden observar los caudales modelados por HydroBID y MIKE 11, donde HydroBID sobreestima los valores para los meses de julio (121%), agosto (131%) y septiembre (85%) con respecto al modelo MIKE 11 y hay una subestimación de caudales para los meses de marzo (-48%) y abril (-53%).



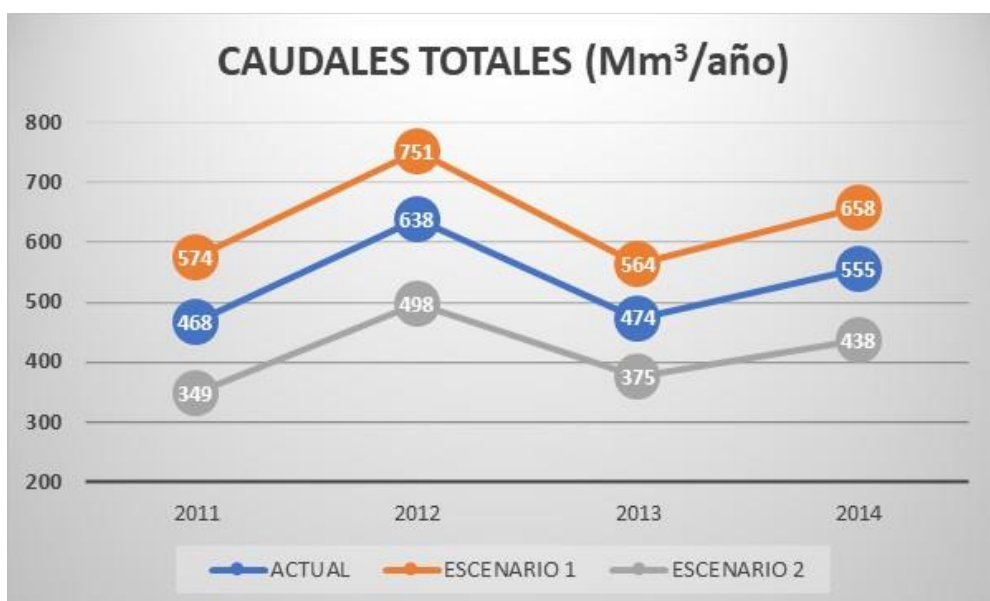
**Figura 30.** Caudales mensuales simulados con modelos HydroBID y MIKE 11.

La precipitación, la temperatura y caudal constituyen datos fundamentales para la aplicación del modelo HydroBID, de allí que dicha información debe ser lo más confiable posible para garantizar resultados óptimos de los balances hídricos de las cuencas de análisis. Lamentablemente las estaciones utilizadas para el estudio presentan inconsistencias en el registro tales como: días de medición incompletos, datos de precipitación y temperatura faltantes, o datos de lectura erróneas. Estas inconsistencias dificultaron el proceso adecuado de relleno de datos; razón por la cual se estableció el período de análisis de 4 años (2011 al 2014), debido que en ese período se contó con información homogénea de los datos.

### Escenarios de cambio climático.

Al comparar los valores de flujo total promedio de la Unidad de Cebadas en los tres estados analizados: actual, escenario climático 1 y escenario climático 2, se puede constatar que con el aumento de la temperatura y precipitación (escenario 1) el valor del flujo total se incrementó en un 19,3 % con respecto al valor actual es decir en un valor casi similar al incremento de la precipitación considerado para este escenario. De allí que en esas condiciones la oferta hídrica alcanzará un valor de  $896.124 \text{ m}^3/\text{km}^2 / \text{año}$  equivalente a  $28,42 \text{ l/s}/\text{km}^2$ , situación que debería ser tomada en cuenta ya que podría traer consigo eventos de desbordamientos o inundaciones en las zonas de ribera.

La figura 31 muestra una comparación de los caudales actuales y los obtenidos en los escenarios 1 y 2.



**Figura 31.** Gráfica de comparación de flujos anuales promedios.

En lo que respecta al escenario 2 (aumento de temperatura +2°C y disminución de precipitación – 20%), el flujo total disminuyó en un 22,25% con respecto al valor actual. En estas condiciones la oferta hídrica para los próximos años descenderá a un valor de 584.046 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> /año equivalente a 18,52 l/s/km<sup>2</sup>; situación que coincide con el estudio realizado en la Unidad Hidrográfica del Pastaza (Romero y Carrera, 2018) en la que ante un escenario de aumento de 1°C y disminución de un 15% de precipitación la oferta hídrica para el año 2060 disminuyó en un 23,42 %. Cabe mencionar que la Unidad Hidrográfica Cebadas forma parte de la Unidad Hidrográfica del Pastaza.

En los dos escenarios de cambio climático considerados para la Unidad Hidrográfica Cebadas se incluyeron aumentos de la temperatura en 2°C y lo que difirió fue que en el escenario 1 se incrementó la precipitación en un 20% y en el escenario 2 se redujo la precipitación en un 20%; con los datos de flujo promedio se puede evidenciar que para este caso la precipitación influye en una relación directamente proporcional ya que se obtuvieron porcentajes de incremento y reducción de flujo en porcentajes bien parecidos a los asumidos para la precipitación en los dos escenarios de análisis.

En lo referente a la evapotranspiración para los 2 escenarios se produce un incremento del 12,58 %, lo que confirma que la evapotranspiración está relacionada directamente con el incremento de la temperatura. En la figura 32 se muestra una comparación de los valores de evapotranspiración actuales y los obtenidos en los escenarios 1 y 2.



**Figura 32.** Gráfica de comparación de evapotranspiración en los diferentes escenarios.

## 6. CONCLUSIONES

La unidad del río Cebadas según la base analítica AHD consta de 5 subcuencas drenantes y tiene una extensión de 700,5 km<sup>2</sup>, existiendo una diferencia mínima con la superficie calculada con GIS que es 710,86 km<sup>2</sup>. En lo referente a los parámetros morfométricos la unidad tiene una forma muy alargada, posee una densidad de drenaje de 1,47 km/km<sup>2</sup> por lo que se puede considerar a la cuenca como bien drenada y la red principal por el coeficiente  $S = 1,40$  tiene una alta sinuosidad en su recorrido.

El proceso de estructuración y calibración del modelo para la Unidad Hidrográfica de Cebadas basado en la información climatológica e hidrológica disponible permitió obtener resultados bastante aceptables en cuanto a los parámetros observados y simulados y con valores que están dentro las medidas estadísticas recomendadas para un modelo adecuadamente calibrado. Esto se puede ratificar con el volumen de error alcanzado de -25,42 % que está dentro del rango establecido por HydroBID que va de -30% a 30%.

En la calibración del modelo, el coeficiente de recesión fue el parámetro más influyente, ya que, al utilizar un valor bajo de este coeficiente, se incrementaron los caudales mínimos, reduciendo así la diferencia entre los caudales modelados y observados.

La implementación del modelo HydroBID ha arrojado resultados favorables en la simulación de flujos de salida de la Unidad del río Cebadas, ya que los caudales simulados por el modelo son suficientemente representativos de los caudales reales generados en la cuenca tanto en época seca como en época lluviosa. Sin embargo, una buena simulación tiene una aplicación limitada, ya que depende principalmente de la calibración, es decir si se presenta cierta incertidumbre en los datos de entrada su aplicación puede propiciar una reproducción de esa incertidumbre.

El balance hídrico de la unidad hidrográfica del río Cebadas muestra un superávit en los años lluviosos 2011 y 2014, y un déficit en los años secos 2013 y 2014, alcanzando el agua superficial valores por debajo de cero, llegando a intervenir el almacenamiento durante estos años para atender las demandas del recurso hídrico.

El escenario de cambio climático al que se debe prestar mayor atención, es el relacionado con la disminución de la precipitación (escenario 2) ya que provocará una reducción de la oferta hídrica en un 22,2% que podría generar un déficit del recurso con los consiguientes impactos a la población y al medio ambiente.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede mencionar que el modelo hidrológico HydroBID simula de buena manera los caudales medios; sin embargo, los caudales mínimos y máximos, no son bien representados por el mismo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.
- CISPDR. (2015). Plan Hidráulico Regional de la Demarcación Hidrográfica Pastaza, Memoria versión definitiva, Quito, Ecuador.
- CNRH (2007). Estudio Hidrológico de la Subcuenca del Río Chambo e implementación de un Modelo Hidrológico. CNRH, Quito.
- Galárraga, R. (2010): Estado y Gestión de los Recursos Hídricos en el Ecuador. Departamento de Ciencias del Agua. Escuela Politécnica Nacional Quito, Ecuador.  
<http://tierra.rediris.es/hidrored/basededatos/docu1.html>
- HCPCH (2008). Proyecto de manejo de recursos naturales de Chimborazo. Riobamba.
- INAMHI (2011). Anuario meteorológico 2011. INAMHI, Quito
- INAMHI (2012). Anuario meteorológico 2012. INAMHI, Quito
- INAMHI (2013). Anuario meteorológico 2013. INAMHI, Quito
- INAMHI (2014). Anuario meteorológico 2014. INAMHI, Quito
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Moreda F., Miralles -Wilhelm F.,Muñoz R.,(2014). Hydro-BID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Parte 2. Nota Técnica del BID, Banco Interamericano de Desarrollo, División de Agua y



Saneamiento. Washington, DC. Estados Unidos. RTI Internacional.

Nalesso, M., Coli, P. (2017). Guía paso a paso Manual del Hydro -BID. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Agua y Saneamiento. Washington, DC. Estados Unidos.

Pascual, J., Diaz, M. (2016). Guía Práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. Centro para el Conocimiento del Paisaje, CIVILSCAPE, Instituto IMDEA Agua. Madrid España.

Portilla, F., (2018). Agroclimatología del Ecuador. Quito, Ecuador. Editorial Universitaria Abya-Yala.

Romero, C., Carrera, W. (2018). Análisis hidrológico utilizando la herramienta de simulación Hydro-BID para una unidad hidrográfica contenida en la Unidad de Planificación Hidrográfica Local Pastaza. Demarcación Hidrográfica de Pastaza. Riobamba, Ecuador.

SENAGUA (2017). Boletín de la estadística sectorial del agua 2017. Quito, Ecuador.

Sierra, R. 1999. Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y EcoCiencia. Quito, Ecuador.

SPOC HydroBID. (2020) Curso HydroBID: Herramienta para el manejo y planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe Recuperado de: [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)