

**USO DEL MODELO HYDRO-BID PARA LA  
CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA Y  
EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO  
DE LA CUENCA DEL RÍO PORCE  
(COLOMBIA)**

**USE OF THE HYDRO-BID MODEL FOR  
THE HYDROLOGICAL  
CHARACTERIZATION AND  
EVALUATION OF CLIMATE CHANGE OF  
THE RIVER PORCE BASIN, COLOMBIA**

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

**Presentado por:  
GLORIA ALEJANDRA ROLDÁN BEDOYA**

**Dirigido por:  
Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR**

**Alcalá de Henares, a 3 de febrero de 2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a Dios por darme la oportunidad de realizar el máster y la sabiduría para ejecutar el TFM, a mi familia por motivarme y apoyarme constantemente, a la empresa Pi épsilon por todo el apoyo para estudiar y finalmente al doctor Juan Antonio Pascual Aguilar por su orientación durante la ejecución del TFM.

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	9
1.1	Objetivo General .....	11
1.2	Objetivos específicos .....	11
2	METODOLOGÍA .....	12
2.1	Zona de estudio .....	12
2.2	Recopilación y análisis de la información existente .....	16
2.2.1	Análisis de datos anómalos .....	21
2.2.2	Análisis grafico.....	23
2.2.3	Llenado de series .....	25
2.3	Modelación en Hydro-BID .....	25
2.3.1	Cálculos del modelo del GWLF .....	27
2.3.2	Calibración e implementación del modelo .....	30
2.4	Escenarios de cambio climático .....	34
3	RESULTADOS.....	37
3.1	Calibración del modelo.....	37
3.2	Evaluación de escenarios climáticos.....	41
4	DISCUSIÓN .....	43
5	CONCLUSIONES .....	48
6	BIBLIOGRAFÍA .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio .....	12
Figura 2. Distribución temporal de la precipitación.....	14
Figura 3. Distribución espacial de la precipitación.....	15
Figura 4. Localización de las estaciones hidro-meteorológicas (precipitación, temperatura y caudales) utilizadas en el estudio.....	18
Figura 5. Datos faltantes de las estaciones A. Olaya Herrera, Apto JM Cordov, Astilleros, Belmira, Concepción, El Chuscal, Guayabito y Gómez Plata. ....	19
Figura 6. Datos faltantes de las estaciones La Cuchilla, La Oculta, La Salada, Llanos de Cuiba, Meseta San Pedro, Progreso el HDA, San Isidro y San Pablo. ....	20
Figura 7. Datos faltantes de las estacione Santa Helena, Sto Domingo, Tulio Ospina y Yolombo. ....	21
Figura 8. Análisis grafico de detección de errores en las estaciones de precipitación. ....	23
Figura 9. Serie de precipitación estación San Isidro .....	24
Figura 10. Curvas de doble masa estación Llanos de Cuiba y Meseta San pedro .....	24
Figura 11. Representación esquemática del modelo GWLF. Tomada de (Fekadu Moreda, 2014).....	26
Figura 12. Subcuencas de la base de datos LAC-AHD.....	31
Figura 13. Cambio en la precipitación. ....	35
Figura 14. Cambio en la temperatura.....	36
Figura 15. Curva de duración de caudales simulados y observados, estación RMS-22. ....	38
Figura 16. Series de caudales medios mensuales, estación RMS-22.....	38
Figura 17. Curva de duración de caudales simulados y observados RMS-15 Gabino. ....	40
Figura 18. Serie de caudales medios de la estación RMS-15 Gabino. ....	40
Figura 19. Caudales medios mensuales para los escenarios de cambio climático. ....	41
Figura 20. Balance hídrico mensual, estado actual.....	42
Figura 21 Balance hídrico mensual, escenario 1.....	42

Figura 22 Balance hídrico mensual, escenario 2.....	43
Figura 23 Caudales observados y simulados estación RMS-22. ....	45
Figura 24. Caudales observados y simulados estación RMS-15 Gabino.....	45
Figura 25. Rendimiento hídrico Total para condiciones de año medio en Colombia. .....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las estaciones hidro-meteorológicas utilizadas en el estudio.....	16
Tabla 2. Resultados pruebas para la detección de datos anómalos. ....	22
Tabla 3. Parámetros para la calibración del modelo .....	32
Tabla 4. Rangos de parámetros estadísticos para la calibración del modelo.....	34
Tabla 5. Escenarios para la evaluación del cambio climático.....	37
Tabla 6. Estadísticos de la modelación de la estación RMS-22.....	37
Tabla 7. Parámetros de calibración estación RMS-22. ....	37
Tabla 8. Estadísticos de la modelación de la estación RMS-15 Gabino. ....	39
Tabla 9. Parámetros de calibración estación RMS-15 Gabino.....	39

## TABLA DE ABREVIATURAS

**AMVA:** Área Metropolitana de Valle de Aburrá.

**BID:** Banco Interamericano de Desarrollo.

**GWLF:** The Generalized Watershed Loading Function.

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Colombia.

**IPCC:** Panel Intergubernamental de Cambio Climático.

**LAC-ADH:** Base de Datos Hidrográfica Analítica de América Latina y el Caribe.

**RTI:** Tiempo de retardo-enrutamiento.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad la implementación del modelo Hydro-BID para la caracterización hidrológica y evaluación del cambio climático, bajo diferentes futuros escenarios en la región, de la cuenca media del río Porce, Colombia.

El río Porce es un río Colombiano localizado en el departamento de Antioquia, sobre la cordillera central colombiana, es de gran interés por su posición y condiciones de terreno, lo que lo convierte en una fuente de gran intervención para el consumo humano, generación de energía y usos agrícolas.

Para la elaboración del estudio se realizaron diferentes etapas, entre ellos la caracterización de la cuenca con información secundaria, la recopilación y análisis de datos, donde se utilizaron métodos estadísticos que dan confiabilidad en los datos utilizados para el modelo, la modelación en Hydro-BID, donde se calibro 2 estaciones de medición de caudales del río con parámetros hidrológicos característicos de la cuenca y finalmente se evaluó el comportamiento de la cuenca bajo 2 escenarios de cambio climático.

Los resultados obtenidos muestran a Hydro-BID como una herramienta de gran interés para la planificación de los recursos naturales, se observó una pequeña discrepancia entre la base de datos LAC-ADH y el estado actual de la cuenca, en una de las estaciones calibradas, por los parámetros recomendados y los realmente ajustados, pero en general se encontró una buena calibración con volúmenes de error menor al 2%.

## **ABSTRACT**

The purpose of this work is to implement the Hydro-BID model for the hydrological characterization and evaluation of climate change, under different future scenarios in the region, of the middle Porcè river basin, Colombia.

The Porcè River is a Colombian river located in the department of Antioquia, on the central Colombian mountain range, it is of great interest due to its position and terrain conditions, which makes it a source of great intervention for human consumption, power generation and agricultural uses.

For the preparation of the study, different stages were carried out, including the characterization of the basin with secondary information, the collection and analysis of data, where statistical methods were used that give reliability in the data used for the model, the modeling in Hydro-BID, where 2 river flow measurement stations were calibrated with characteristic hydrological parameters of the basin and finally the behavior of the basin under 2 climate change scenarios was evaluated.

The results obtained show Hydro-BID as a tool of great interest for planning natural resources, a small discrepancy was observed between the LAC-ADH database and the current state of the basin, in one of the calibrated stations, by the recommended parameters and those really adjusted, but in general a good calibration was found with error volumes less than 2%.



# 1 INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural necesario para los seres vivos, su necesidad en los usos de las actividades comunes de supervivencia del hombre, como la industria, uso doméstico y uso agrícola, requiere de su explotación y manejo. Por tanto, este recurso requiere de gran estudio para conocer su calidad, disponibilidad y así poder gestionar y proteger adecuadamente.

Colombia, por su posición geográfica y las condiciones de terreno, es un país privilegiado en cuanto a los recursos hídricos se refiere. La riqueza hídrica del país se ve representada en la amplia red superficial de aguas, en las favorables condiciones del terreno que permiten el almacenamiento de aguas subterráneas y en la existencia de un importante número de cuerpos de agua lenticos y enormes extensiones de humedales. La presencia de altas montañas, abundantes precipitaciones, extensas sabanas y selvas húmedas, junto con la ubicación estratégica en la zona tropical, caracterizan a Colombia y determinan la existencia de ecosistemas con un potencial hídrico valioso y sistemas complejos de regulación (García Félix, 2001).

Las condiciones actuales de Colombia lo ponen en posición estratégica frente a uno de los principales retos que afronta el mundo moderno, la gestión sostenible de los recursos naturales de su territorio, con miras a la visualización de la Tierra como un planeta capaz de albergar vida, proveer y garantizar los recursos necesarios para mantener a una población creciente (Centro de ciencia y tecnología de Antioquia, 2013). Esta es una de las razones por las que es necesario el análisis del comportamiento de las cuencas hidrográficas bajo los diferentes cambios que presenta el planeta, con el fin de predecir y poder prevenir, mediante las toma de decisiones, la gestión de los recursos hídricos.

El cambio climático ha mostrado tener una clara incidencia en el comportamiento, disponibilidad y afectaciones en los recursos hídricos, por esta razón la necesidad de estudiar y analizar la respuesta de una cuenca en estos eventos es cada vez más importante.

En el siglo XX comenzó la preocupación sobre el cambio climático. En la actualidad, prácticamente no hay dudas de que la actividad humana está alterando de diversas formas el balance de radiación del sistema superficie-atmósfera que mantiene el clima de la Tierra. Si bien hay muchos factores que intervienen en el clima, se ha identificado que el aumento antropogénico de los gases de efecto invernadero en la atmósfera ha jugado un papel importante en dicho calentamiento (Pabón, 2003).

Estudios del cambio climático para Colombia han mostrado que el territorio podría verse afectado por un calentamiento entre 1 a 1.5°C y por alteraciones de la precipitación que podrían estar entre -15 y +15% del acumulado anual promedio 1961-1990. Igualmente se podrían presentar cambios en la distribución de la precipitación en el territorio nacional, con alteraciones diferentes en las regiones del país (Pabón, 2003).

La modelación por medio de herramientas que proporcionen el análisis de la respuesta hidrológicas de las cuencas, es una alternativa que ayuda a caracterizar cuencas hidrográficas y predecir su comportamiento respecto a diferentes escenarios de cambio climático, esta es la manera simplificada de representar la realidad del estudio que se desea presentar.

Hydro-BID es una herramienta de simulación creada por el Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID) para dar soporte a la región de Latino América y el Caribe (LAC) en el manejo y planificación del recurso hídrico (BID, 2017). El presente trabajo se basa en la implementación de la herramienta Hydro-BID, para la caracterización de la cuenca media del río Porce, en el departamento de Antioquia, Colombia.

La cuenca total del río Porce tiene un área de 5.248 km<sup>2</sup> y se encuentra localizada en el departamento de Antioquia, sobre la cordillera Central colombiana. El nacimiento de su cauce principal está definido por el río Aburrá, que nace en el alto de San Miguel en el municipio de Caldas, atraviesa diez municipios y se une al río Grande en Puente Gabino, cambiando de nombre a río Porce, el cual, tras un recorrido total de 252 km vierte sus aguas al río Nechí en el municipio de Zaragoza. La topografía de la cuenca es irregular y pendiente, con altitudes que oscilan entre los 80 y 3340 m.s.n.m. (Centro de ciencia y tecnología de Antioquia, 2013).

El Porce es uno de los ríos más importantes en el departamento de Antioquia (Colombia), su importancia se debe a que está altamente intervenido en aspectos económicos, sociales y culturales.

Esta situación favorece que los usos del agua en esta zona sean variados, incluyendo el uso energético (embalses Riógrande y Troneras), abastecimiento de agua potable de las comunidades y Valle de Aburrá (trasvase del embalse de Riógrande) y actividad pecuaria intensiva (bovino y porcícola) en municipios como Santa Rosa de Osos y San Pedro de los Milagros. (Centro de ciencia y tecnología de Antioquia, 2013). A continuación se estudia la caracterización de la cuenca media del río Porce, zona donde el río Medellín y el río Grande confluyen.

### **1.1 Objetivo General**

Modelación hidrológica de la cuenca media del río Porce en Antioquia, Colombia, mediante la herramienta Hydro-BID para la caracterización de la cuenca de estudio y evaluación del cambio climático.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Construcción y calibración del modelo en Hydro-BID de la cuenca media del río Porce
- Caracterización de la cuenca media del río Porce mediante la modelación en Hydro-BID
- Analizar el comportamiento de la cuenca para los diferentes escenarios de cambio climático

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Zona de estudio

La cuenca media del río Porce se encuentra en Colombia en el departamento de Antioquia, nace de la confluencia de dos importantes ríos del departamento, río Medellín y río Grande, entre los municipios de, Donmatías, Santa Rosa de Osos y Santo Domingo (Figura 1).

La cuenca del río Porce alberga una serie de actividades económicas y sociales que requieren el uso intensivo del agua para su desarrollo, lo que genera tensiones sociales en su interior y llevan a la necesidad de profundizar en el conocimiento de la situación actual, para aprovechar de la forma más eficiente y sostenible la riqueza natural de la cuenca (Centro de ciencia y tecnología de Antioquia, 2013).

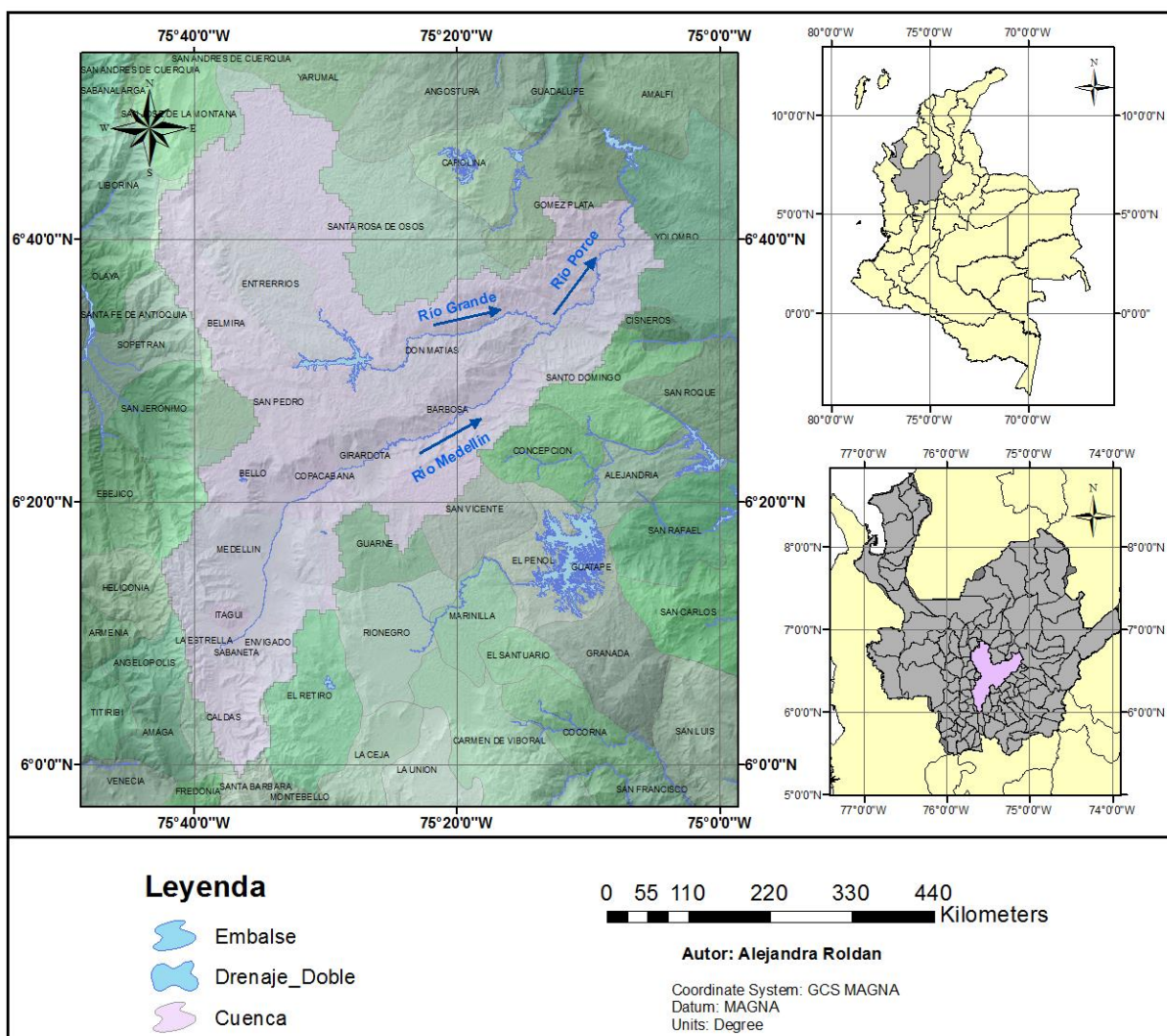


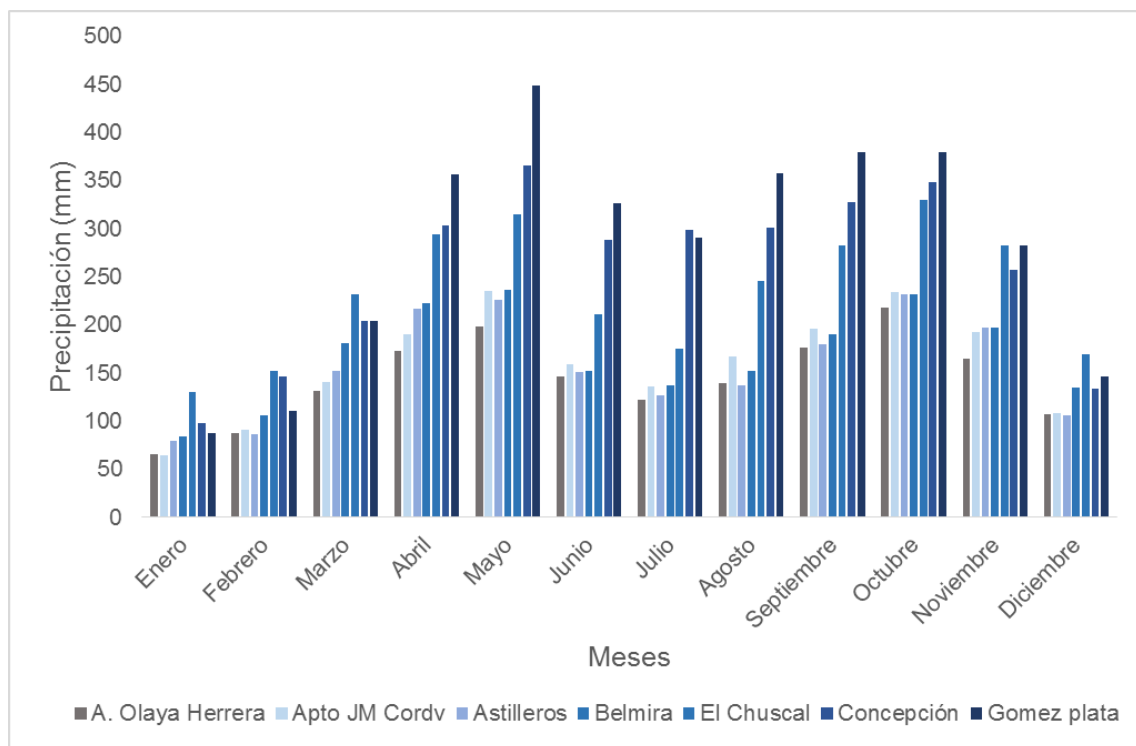
Figura 1. Localización de la zona de estudio

La cuenca media de río Porce está conformada por dos importantes sub-cuencas pertenecientes al río Medellín y río Grande. El nacimiento del cauce principal del río Porce está definido por el río Aburrá, el cual nace en el alto de San Miguel en Caldas (Antioquia), luego se convierte en el río Medellín y termina donde confluye con el río Grande convirtiéndose en el río Porce, durante su recorrido atraviesa 11 municipios donde sus aguas son utilizadas para diferentes usos. Geomorfológicamente, el río Medellín toma dirección aproximada sur-norte y formando un arco hacia el este en el municipio de Copacabana aproximadamente a la altura 1416 m.s.n.m. del río. El sur de la cuenca del río Porce, cuenca del río Medellín, se encuentra en una zona rodeada de montañas que comprende las partes altas, medias y bajas de los municipios ubicados a lo largo del río (Caldas, Sabaneta, Envigado, La estrella, Itagüí, Medellín, Bello, Girardota, Copacabana, Barbosa y Santo Domingo). La cuenca aparece hoy como un ecosistema altamente intervenido donde su recuperación y protección no obedece solamente a factores ecológicos, sino que también se imponen aspectos económicos, sociales, culturales, entre otros. (UDEM, UNAL, UDEA, y UPB, 2011).

El norte de la cuenca media del río Porce, cuenca del río Grande, se encuentra en jurisdicción de los municipios de: San Pedro de los Milagros, Entreríos, Belmira, Don Matías y Santa Rosa de Osos, en el altiplano de la Subregión Norte. Se considera una cuenca estratégica por la provisión de servicios ecosistémicos al Área Metropolitana de Valle de Aburrá (AMVA) y a la ciudad de Medellín, especialmente por los servicios asociados con el aprovisionamiento de agua potable para consumo humano y energía eléctrica. La región del Altiplano Norte de Antioquia se caracteriza por una topografía que varía desde plana en algunos sitios como el Llano de Ovejas, hasta escarpada en las partes más altas de las montañas; pero en general predomina una topografía ondulada de colinas suaves. (Ramirez & Orrego, 2015)

La cuenca media del río Porce, tiene un área de 2520,72 km<sup>2</sup>, La topografía de la cuenca es irregular, con altitudes que oscilan entre los 80 y 3340 m.s.n.m. por lo que hay una gran variabilidad de climas en la cuenca. En general el clima de la región es de carácter tropical, determinado principalmente por las variaciones

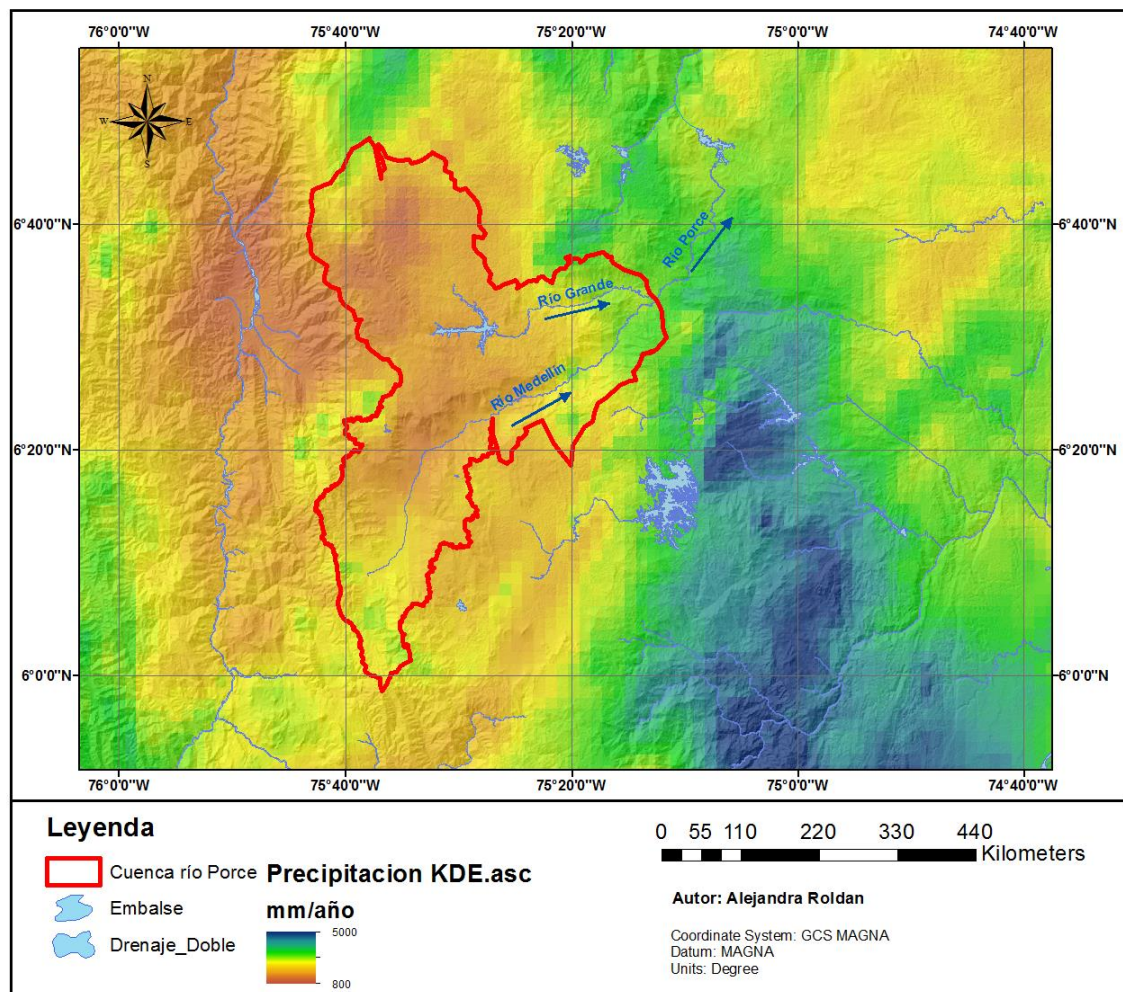
altimétricas, la topografía del relieve y la influencia que ejerce el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), la cual genera a su paso dos períodos húmedos y dos secos que se presentan intercalados a lo largo del año (Área metropolitana del valle del Aburrá, 2016). La distribución temporal de la precipitación en la cuenca media del río Porce es bimodal con dos estaciones lluviosas a lo largo del año, de comienzos de marzo a finales de junio y la segunda de mediados de septiembre a finales de noviembre, en la Figura 2, se presenta la distribución temporal de la precipitación sobre la cuenca del río Porce, con información de 7 estaciones de precipitación ubicadas en la cuenca.



**Figura 2. Distribución temporal de la precipitación.**

Con base en la información de los mapas de precipitación para Colombia, de la base de datos HydroSIG (Álvarez, 2007), se observa una gran variabilidad en el comportamiento de la lluvia para la cuenca media del río Porce, con valores de precipitación oscilando entre los 3215 mm/año en la parte este de la cuenca, en la unión del río Medellín y el río Grande, y disminuye gradualmente en la medida que se desciende hacia los municipio de Copacabana, Bello, en el río Medellín y Entrerrios en el río Grande, hasta mínimos de 1038 mm/año. El promedio anual de precipitación estimado para la cuenca media en estudio es de 1994,5 mm/año

(Figura 3).



**Figura 3. Distribución espacial de la precipitación**

**Fuente: (Álvarez, 2007)**

Geológicamente, la cuenca media del río Porcía se compone de rocas metamórficas de bajo a medio grado de metamorfismo, intruidas por plutones sin y postectónicos generalmente de composición granitoide (Batolito Antioqueño de edad cretácica). Las rocas se encuentran en parte cubiertas por capas de cenizas volcánicas, producto de la actividad del complejo volcánico del Ruíz – Tolima, (Área metropolitana del valle del Aburrá, 2016).

Tectónicamente el Occidente Colombiano se localiza al W del sistema de fallas del Romeral, que marca el límite entre el dominio continental de la Cordillera Central y el oceánico que predomina en la Cordillera Occidental y al W de esta. En el área

de estudio afloran unidades litodémicas que van desde el Paleozoico hasta el cuaternario, variando desde esquistos, anfibolitas, migmatitas, gneises, ganodioritas, dunitas, gabros, basaltos, rocas volcánico sedimentarias y los depósitos tanto de origen aluvial, de vertiente y coluvial. Estas unidades están limitadas por fallas regionales como es el sistema Cauca –Romeral y por fallas menores con orientación Norte – Sur (Área metropolitana del valle del Aburrá, 2016).

## 2.2 Recopilación y análisis de la información existente

Para la implementación del modelo Hydro-BID es necesario la recopilación de datos históricos como, precipitación diaria, temperatura media diaria y caudales mensuales o diarios de la cuenca en estudio, para luego ser procesada y llevar a cabo la metodología del modelo.

Antes de utilizar la herramienta Hydro-BID, los datos requeridos en el modelo fueron recopilados, evaluados, corregidos y complementados. En general se identificaron 20 estaciones de precipitación, 5 estaciones de temperatura y 2 estaciones de caudales en (IDEAM, SIRH, 2010) (Figura 4), en la Tabla 1, se presentan las estaciones de la zona de estudio y sus principales características.

**Tabla 1. Características de las estaciones hidro-meteorológicas utilizadas en el estudio**

Código	Estación	Periodo	Tipo	Municipio	Variable	Resolución
27015260	La Salada	1985-2017	AM	Caldas	Precipitación	Diaria
23085200	Apto JM Cordov	1985-2017	SP	Rionegro	Precipitación	Diaria
27010810	Santa Helena	1985-2017	PM	Medellín	Precipitación	Diaria
27015070	A.Olaya Herrera	1985-2017	SP	Medellín	Precipitación	Diaria
27010770	Chuscal El	1985-2017	PM	Heliconia	Precipitación	Diaria
27011110	Astilleros	1991-2017	PM	Medellín	Precipitación	Diaria
27015090	Tulio Ospina	1985-2014	CO	Bello	Precipitación	Diaria
27010800	Meseta San Pedro	1985-2017	PM	Bello	Precipitación	Diaria
27010820	La Cuchilla	1985-2017	PM	Girardota	Precipitación	Diaria
27015150	Progreso el HDA	1985-2017	CO	Barbosa	Precipitación	Diaria
23080740	Concepción	1985-2018	PM	Concepción	Precipitación	Diaria

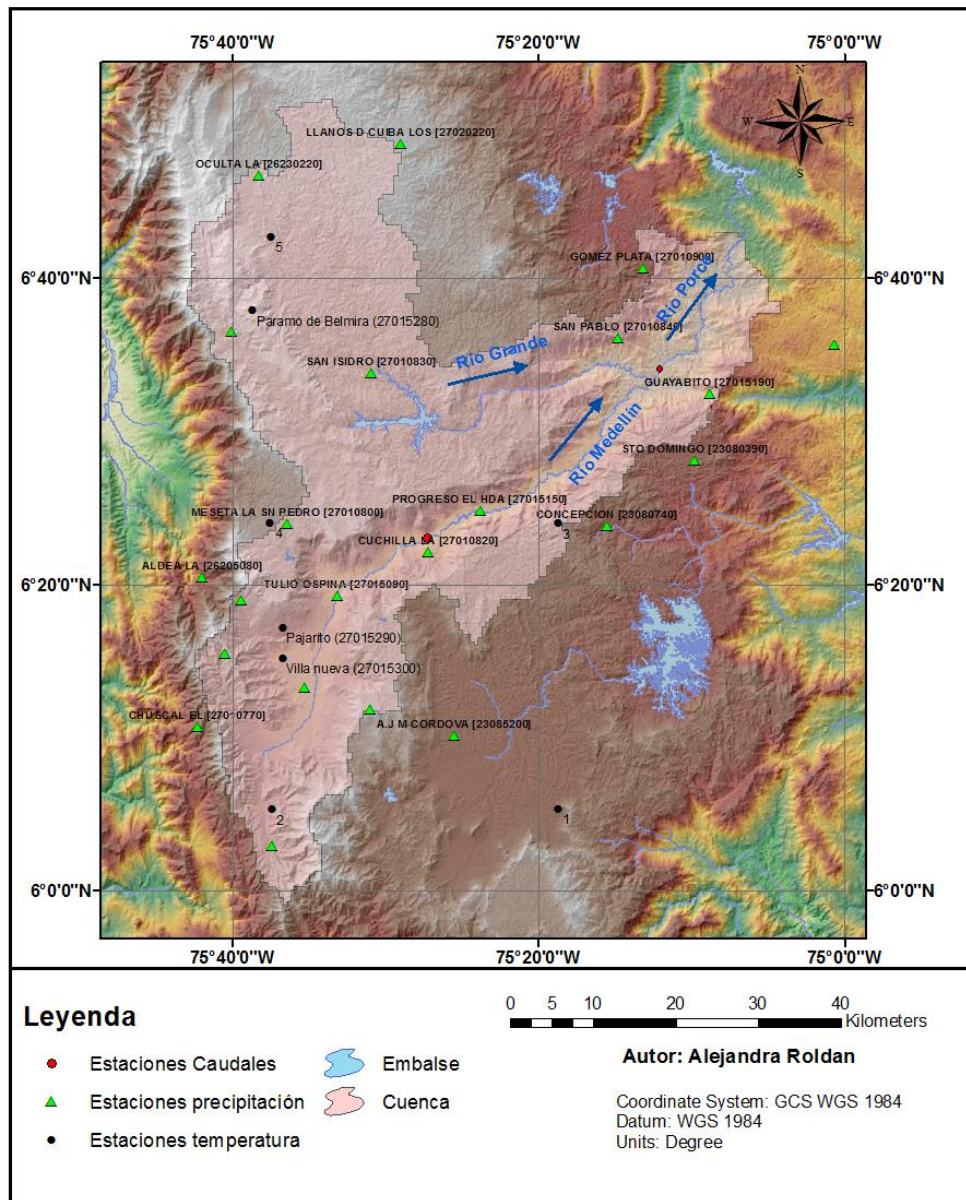


Código	Estación	Periodo	Tipo	Municipio	Variable	Resolución
27015190	Guayabito	1985-2018	CO	Santo Domingo	Precipitación	Diaria
23080390	Sto Domingo	1985-2017	PG	Santo Domingo	Precipitación	Diaria
23100040	<u>Yolombolo</u>	1985-2018	PM	Yolombo	Precipitación	Diaria
27010900	Gómez Plata	1985-2017	PM	Gómez plata	Precipitación	Diaria
27010840	San Pablo	1985-2017	PM	Santa Rosa	Precipitación	Diaria
27010830	San Isidro	1985-2017	PM	Entrerrios	Precipitación	Diaria
27010870	Belmira	1985-2017	PM	Belmira	Precipitación	Diaria
26230220	La Oculta	1985-2017	PM	Belmira	Precipitación	Diaria
27020220	Llanos de cuiba	1985-2017	PM	Yarumal	Precipitación	Diaria
27015290	Pajarito	2005-2019	CP	Medellín	Temperatura	Diaria
27015280	Paramo Bermira	2005-2019	CP	Belmira	Temperatura	Diaria
26185050	Santa Bárbara	2006-2019	CP	Santa Bárbara	Temperatura	Diaria
27015300	Villanueva Villahermosa	2006-2014	CP	Medellín	Temperatura	Diaria
27018060	RMS-22	1996-2009	LM	Barbosa	Caudal	Diaria
27017360	RMS-15 Gabino	1985-1994	LM	Santa Rosa de Osos	Caudal	Diaria

\*AM:Agrometeorológica, CO:Climática Ordinaria, CP:Climatológica Principal, LM:Limnimétrica, ME:Meteorológica, PG: Pluviográfica, PM: Pluviométrica, SP: Sinóptica Principal

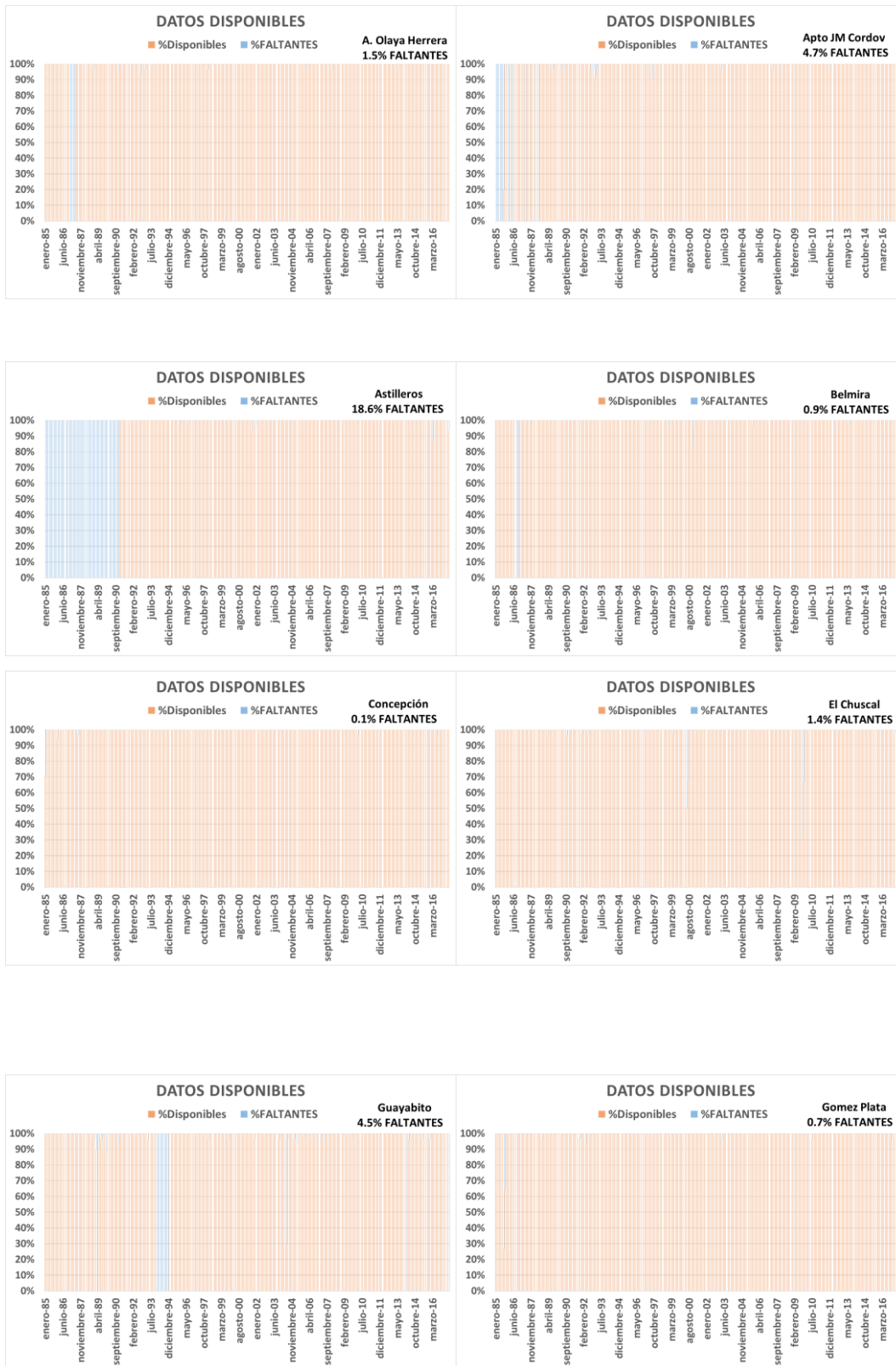
Teniendo en cuenta que el modelo en Hydro-BID requiere un periodo de tiempo igual en los datos históricos y como se puede observar en la Tabla 1. Características de las estaciones, el periodo de tiempo más constante y el que fue elegido para el modelo es entre enero del 1985 y julio del 2017.

Dado a que las estaciones de temperatura de la zona no reportan datos entre los años 1985 al 2005, se utilizó los datos de la plataforma SWAT Global Weather Data (NCEP, s.f.), plataforma pública en que ofrece dato climáticos que han sido procesados a partir de información satelital, en esta plataforma se registran 5 estaciones en la zona de estudio que registra datos de temperatura máxima y mínima, desde el año 1979 hasta el 2014, las cuales fueron nombradas como, 1, 2, 3, 4, 5. Dado que los datos de temperatura existentes son los máximos y mínimos, se estimó la temperatura media como la media entre la máxima y la mínima de cada día, algunas investigaciones han mostrado que esta estimación esta generalmente en un rango de 0,1°C del valor medio real (GLOBE, 2005).

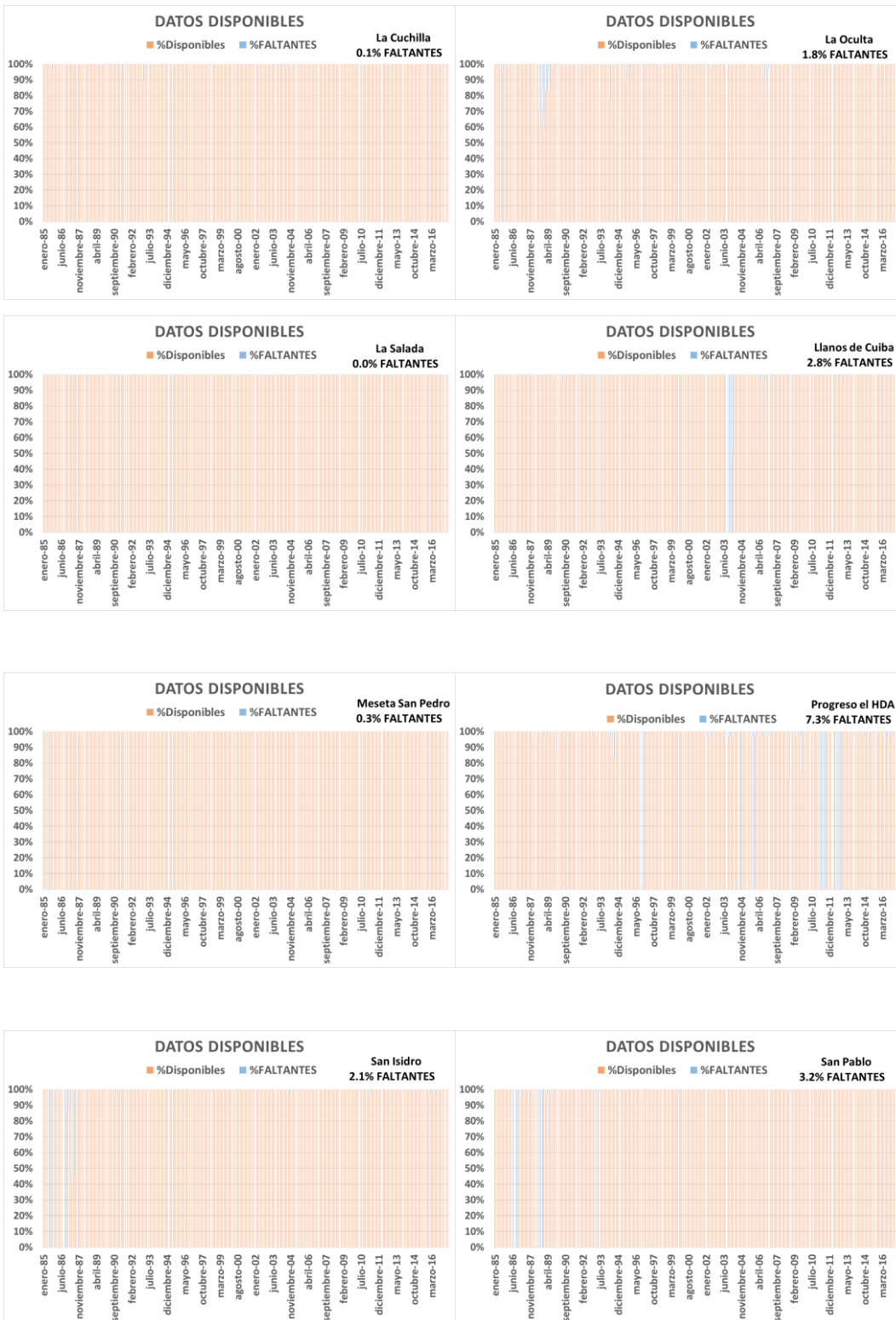


**Figura 4. Localización de las estaciones hidro-meteorológicas (precipitación, temperatura y caudales) utilizadas en el estudio.**

Dado a que en las estaciones de precipitación se evidenciaron datos faltantes, fue necesario utilizar metodologías estadísticas, como la del promedio aritmético, para su relleno, inicialmente se identificó los datos faltantes de cada estación con el fin de asegurar que cuente como mínimo con el 90% de los datos del periodo analizado (1985-2017) y luego se utilizaron técnicas estadísticas para su procesamiento. En las Figura 5, Figura 6 y Figura 7, se presentan los datos faltantes de cada una de las veinte estaciones de precipitación de la zona.



**Figura 5. Datos faltantes de las estaciones A. Olaya Herrera, Apto JM Cordov, Astilleros, Belmira, Concepción, El Chuscal, Guayabito y Gómez Plata.**



**Figura 6. Datos faltantes de las estaciones La Cuchilla, La Oculita, La Salada, Llanos de Cuiba, Meseta San Pedro, Progreso el HDA, San Isidro y San Pablo.**

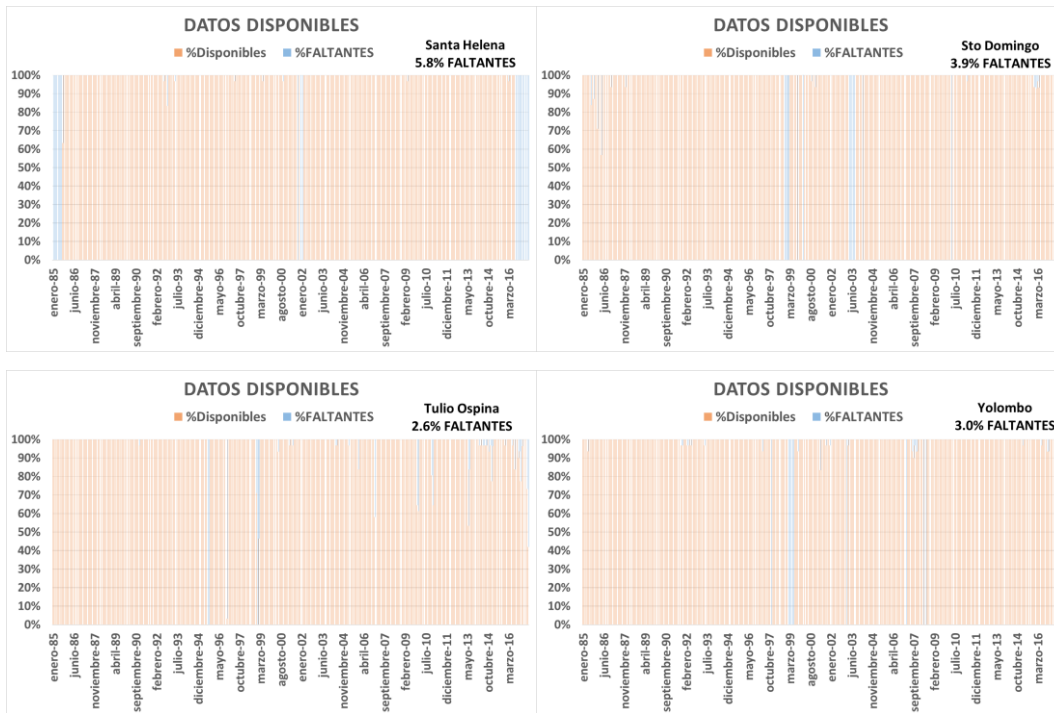


Figura 7. Datos faltantes de las estaciones Santa Helena, Sto Domingo, Tulio Ospina y Yolombo.

### 2.2.1 Análisis de datos anómalos

Igualmente, las series fueron examinadas para corroborar que estén libres de errores, en general para garantizar su consistencia e identificar datos anómalos. Existen diferentes técnicas para la detección de errores, (Minitab, 2019) en las series para el presente estudio se utilizaron las que se presentan a continuación. El análisis de datos anómalos consiste en encontrar los puntos extremos de la serie y evaluar si es coherente respecto al comportamiento y los demás valores de la serie, este análisis se realizó utilizando las siguientes pruebas estadísticas.

- Puntos por fuera del rango

Con esta prueba se pretende identificar los valores que se encuentran fuera de un intervalo alrededor de la media, para este caso, la media más o menos 5 veces la desviación típica de la serie.

$$Rango = u \pm 5 \cdot \sigma$$

- Prueba de Dixon

Esta prueba pretende comparar un estadístico definido en la estación por uno de referencia.

$$\gamma_{10} = \frac{X_N - X_{N-1}}{X_N - X_1}$$

Donde  $x_t$  es la serie ordenada de menor a mayor para un  $t=1, 2, 3, N$ .

El estadístico de referencia  $\gamma_\alpha$ , para un nivel de confianza del 95%, es igual a 0.406. Si el estadístico calculado es mayor al estadístico de referencia, el dato es sospechoso de ser un registro anómalo.

- Prueba de Grubbs

Al igual que la prueba anterior consiste en comparar un estadístico definido por la siguiente estación con el estadístico de referencia.

$$q = \frac{W}{S}$$

Siendo  $W = x_n - x_1$ , donde  $n$  es el orden jerárquico de los registros de la serie hidrológica  $X(t)$ , y  $S$  es la desviación estándar de la serie.

Para un nivel de confianza igual al 95% el estadístico de referencia  $q_{\text{critico}}$  es igual a 5,01.

- Resultados de las pruebas

En general las pruebas anteriormente descritas identificaron 13 estaciones con datos anómalos, los valores encontrados como atípicos se presentan en la Tabla 2 y serán verificados con el análisis gráficos y corroborando que los mismos no pertenezcan a fenómenos regionales si no a problemas puntuales de medición.

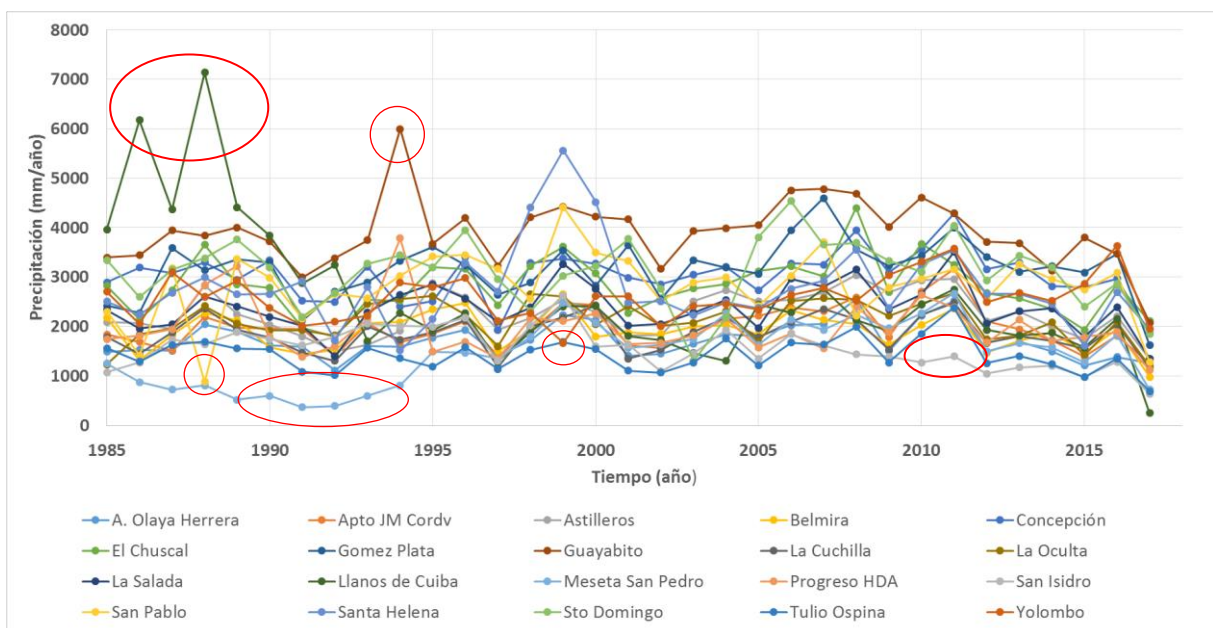
**Tabla 2. Resultados pruebas para la detección de datos anómalos.**

Estación	Fecha	Dato anómalos	Prueba que lo detecto
A. Olaya Herrera	may-20	400.1 mm/mes	Rango normalizado
Apto JM Cordov	abr-11	734.1 mm/mes	Puntos fuera del rango y rango normalizado
Concepción	may-13	639 mm/mes	Rango normalizado
El Chuscal	ago-88	740 mm/mes	Rango normalizado
Gomez plata	may-07	784 mm/mes	Rango normalizado
La Cuchilla	ago-88	503 mm/mes	Rango normalizado
La Oculta	abr-94	481 mm/mes	Rango normalizado
La Salada	abr-11	613.5 mm/mes	Rango normalizado
Llanos de Cuiba	abr-86	1491 mm/mes	Puntos fuera del rango y rango normalizado
Progreso el HDA	oct-88	632.9 mm/mes	Rango normalizado
	sep-89	604.2 mm/mes	Rango normalizado
San Isidro	may-96	407 mm/mes	Rango normalizado
San Pablo	may-07	830 mm/mes	Rango normalizado

Estación	Fecha	Dato anómalo	Prueba que lo detecto
Santa Helena	sep-99	766 mm/mes	Rango normalizado
Sto Domingo	nov-05	907 mm/mes	Rango normalizado
Tulio Ospina	abr-11	417.3 mm/mes	Rango normalizado

### 2.2.2 Análisis grafico

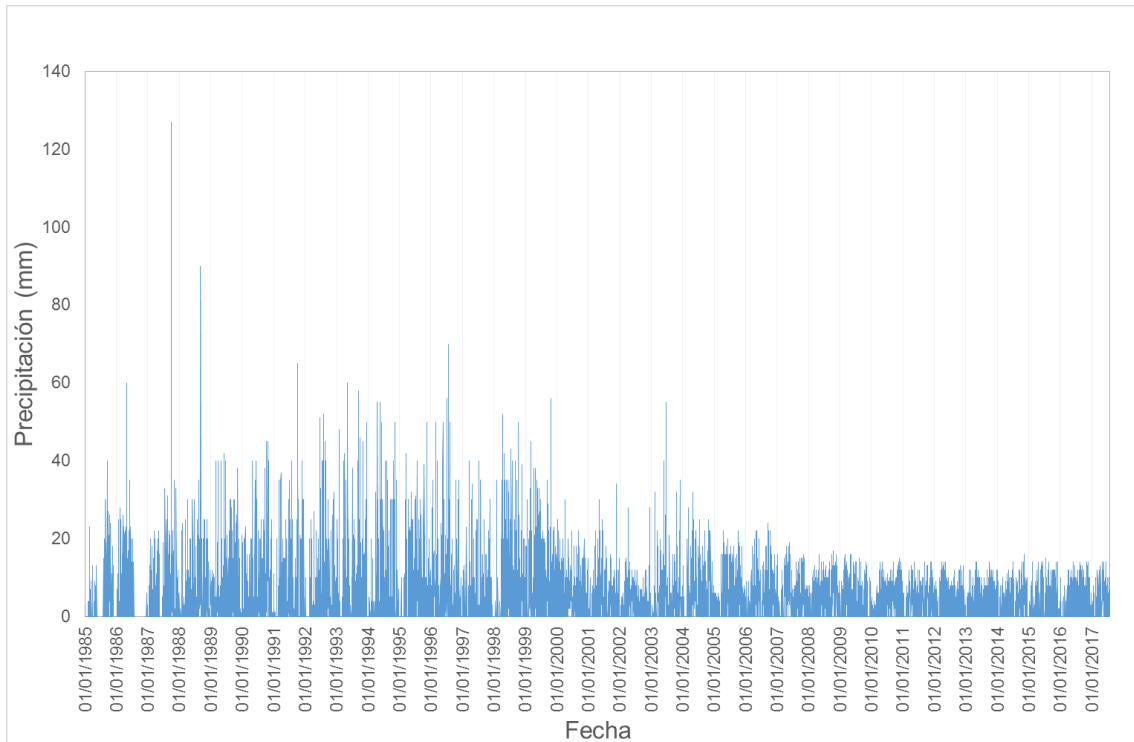
En análisis grafico tiene como objetivo garantizar la coherencia entre los datos de las estaciones, para esto se utilizó los datos de precipitación anual de cada estación y se interpusieron para analizar su comportamiento, en la Figura 8, se observa la precipitación anual de cada una de las estaciones, aunque por la cantidad de datos no es posible realizar un análisis detallado, se encontró algunas inconsistencias en ciertos registros, presentados en círculos rojos, que pertenecen a las estación Meseta San Pedro (1985-1995), estación Llanos de Cuiba (1985-1994), San Pablo (1988), Guayabito (1994), San Isidro (2010-2012) y Yolombo (1999).



**Figura 8. Análisis grafico de detección de errores en las estaciones de precipitación.**

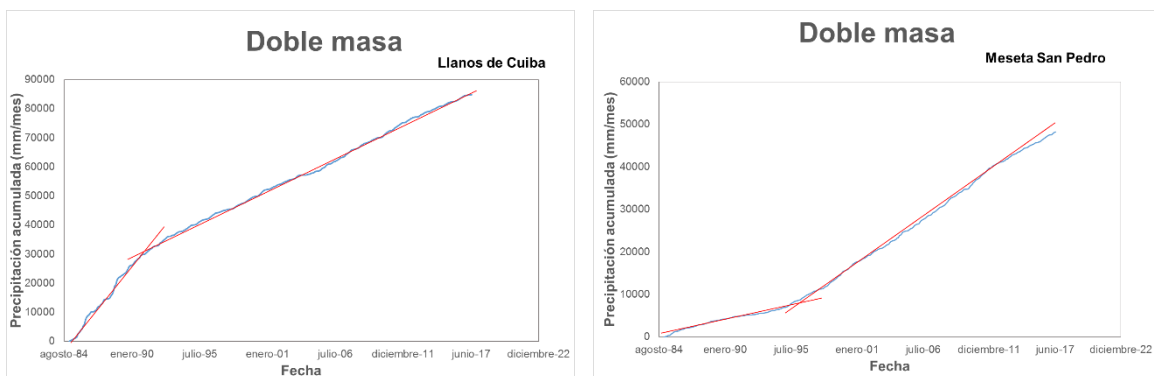
Luego de un análisis detallado en cada una de las estaciones, se pudo evidenciar que la inconsistencia de las estaciones San Pablo y Yolombolo corresponde a datos faltantes en varios meses de los respectivos años. Como no se encontró una razón lógica a la inconsistencia de los datos del año 1994 de la estación Guayabito, se optó por considerar este año como faltante, respecto a la estación San Isidro, en el análisis grafico individual de la estación (Figura 9), se evidencio un cambio en la

varianza de los datos a partir de año 2005, dado a que no se encontró una razón al cambio que presentan los datos, se decidió no utilizar la estación San Isidro para el estudio.



**Figura 9. Serie de precipitación estación San Isidro**

Igualmente se pudo evidenciar en las curvas de doble masa de las estaciones Llanos de Cuiba y Meseta San Pedro (Figura 10), un error en el comportamiento de los datos, por esta razón y no encontrándose razón lógica a los datos se decidió no utilizar estas estaciones para el presente estudio.



**Figura 10. Curvas de doble masa estación Llanos de Cuiba y Meseta San Pedro**

En general se decidió no utilizar los datos de las estaciones, Iguana, La Aldea, San



isidro y Llanos de Cuiba. Respecto a los datos anómalos encontrados en las pruebas, se evidencio que los datos corresponden a fenómenos climáticos de la zona. Dado a que no es necesario que las series de caudales estén completas para el modelo e inicialmente se evidencio un comportamiento normal en las mismas, no se realizaron los mismos análisis que a las series de precipitación.

### **2.2.3 Llenado de series**

Los datos faltantes de las series de precipitación y temperatura fueron llenados con el método estadístico del promedio aritmético, el cual estima los datos faltantes como el promedio de tres estaciones adyacentes. Para garantizar una mayor confiabilidad en los datos estimados, se eligió las estaciones que no presentaran diferencias, entre las mediciones anuales, mayores al 10%.

$$D_i = \frac{A_i + B_i + C_i}{3}$$

Donde,

D= Dato faltante del día i

A, B, C= Dato observado de las estaciones A, B y C en el día i

## **2.3 Modelación en Hydro-BID**

Hydro-BID es un conjunto integrado de herramientas para la simulación de cuencas que incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad de agua dulce, está basado en el modelo GWLF (Factor Estándar de Carga de Cauces Generalizados) y mejorado por la metodología del tiempo de retardo-enrutamiento (RTI). El modelo de precipitación-escorrentía componente de GWLF se aplica a unidades de cuencas pequeñas al tomar en consideración los usos de tierras y las condiciones del suelo dentro de la cuenca. La respuesta a cada uso de tierra en una cuenca dada es tratada por separado para generar un volumen de escorrentía estimado. El flujo que se genera de cada cuenca, incluyendo las contribuciones de aguas subterráneas poco profundas o flujo base, se dirige a través de las redes de corrientes definidas por la AHD. La arquitectura del modelo distribuido proporciona un alto nivel de escalabilidad. Los impactos del cambio climático en recursos hídricos pueden ser simulados en escalas tan pequeñas como

una cuenca individual AHD a través de todas las áreas de captación de una cuenca entera. La arquitectura también permite que el sistema sea portátil a través de la región de Latino América y Caribe (LAC) (Fekadu Moreda, 2014).

La Figura 11 es una representación conceptual de una cuenca de captación con capas de suelo saturadas y no saturadas tal como se utiliza en GWLF. El modelo calcula la escorrentía y los flujos base por cuenca de captación: la escorrentía se genera en forma de exceso de infiltración y el flujo base es una liberación gradual de la capa saturada. Tras tomar en cuenta la escorrentía proveniente de las precipitaciones, toda agua que excede un volumen calculado de evaporación se infiltra a la capa no saturada. Con el tiempo, el agua infiltrada se pasa desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el volumen almacenado de la capa saturada. El agua de la capa saturada entra en el canal de corriente como flujo de base donde se combina con la escorrentía de la cuenca y otros flujos de entrada provenientes de las cuencas de aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de corriente para el día. Cabe destacar que la capa saturada, o agua disponible como flujo de base, puede agotarse por medio de la filtración a un acuífero subterráneo más profundo (Fekadu Moreda, 2014).

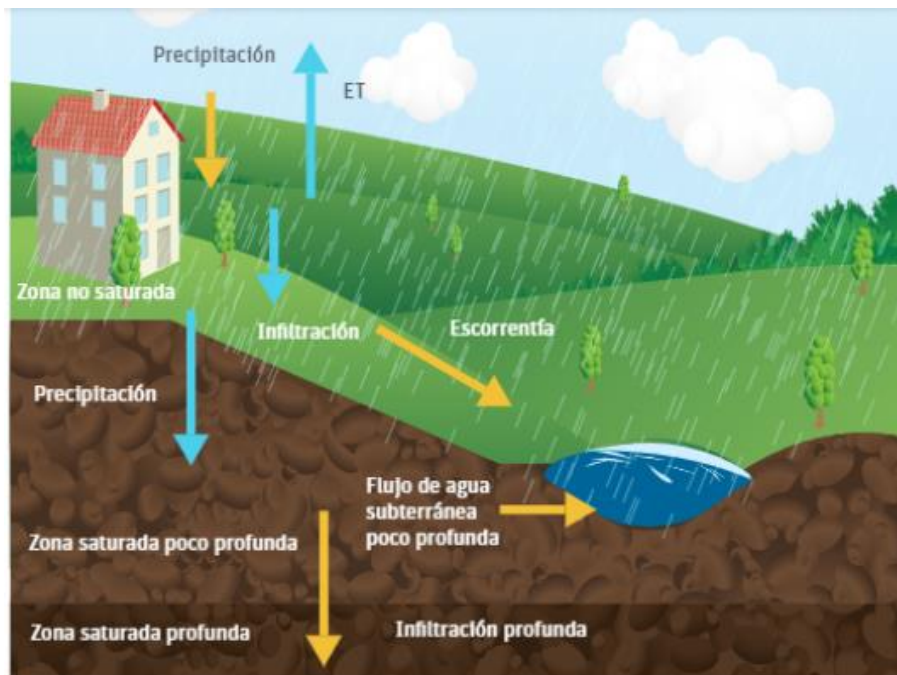


Figura 11. Representación esquemática del modelo GWLF. Tomada de (Fekadu Moreda, 2014)

### 2.3.1 Cálculos del modelo del GWLF

A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas por el modelo para calcular la evapotranspiración potencial, escorrentía, percolación y flujo.

- **Evapotranspiración potencial**

El GWLF utiliza la metodología desarrollada por (Hamon, 1961) para la estimación de la evapotranspiración potencial, la cual utiliza la temperatura media diaria y el número de horas de luz para calcularla, así:

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_t}{T_t + 273}$$

Donde,

$H_t$ = Número de horas de luz solar por día durante el mes que contenga el día t.

$e_t$ = Presión de vapor de agua en saturación en milibars en el día t.

$T_t$ = Temperatura en el día t (°C).

$$e_t = 33.8639[(0.00738T_t + 0.8072)^2 - 0.000019(1.8T_t + 48) + 0.001316]$$

$$H_t = \frac{2 * \cos^{-1}[-\tan \delta + \tan \phi]}{\omega}$$

Donde,

$\delta$  = Declinación solar en radianes

$\phi$ = Latitud geográfica en radianes

$\omega$  = Rotación angular de la tierra

La evapotranspiración potencial se ajusta en base al uso de tierras/suelos y condiciones de la cobertura utilizando un factor de cobertura.

$$PET_{Adj(t)} = CV * PET_t$$

Donde

$PET_{Adj(t)}$ =Evapotranspiración potencial ajustada

CV= Factor de cobertura

Los valores CV dependen de la cobertura vegetal y de cultivos. La evapotranspiración real es calculada de la evapotranspiración potencia ajustada pero está limitada por la disponibilidad de agua en la humedad del suelo.

- **Escorrentía**

La escorrentía superficial generada se calcula utilizando la ecuación del número de curva del U.S. Soil Conservation Service, así:

$$RO_t = \left( \frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$$

Donde,

$RO_t$  = Escorrentía (cm)

$R_t$  = Suma de lluvia y deshielo

$D_t$  = Es el parámetro de detención, calculado así:

$$D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4$$

Donde  $CN_t$  es el número de curva asignado por uso de suelos y ajustado cada día. Los números de curva son asignados a cada categoría individual de uso de suelos y al grupo hidrológico del suelo correspondiente considerado en el modelo. Por ejemplo los usos de las tierras de áreas selvas/bosques que yacen sobre suelos de buen drenaje tendrán un número de curva diferente que el mismo uso de tierras que las que yacen sobre suelos de pobre drenaje. Aunque los números de curva están establecidos dentro del modelo antes de correr el mismo, cada día el número de curva para un uso de tierras/grupo de suelos es modificado en base a la condición de humedad antecedente del suelo.

Para calcular el número de curva para un día determinado, la humedad antecedente del suelo se calcula acumulando la lluvia y el deshielo de los últimos 5 días:

$$Amc5_t = \sum_{x=1}^5 R_{(t-x)}$$

Donde  $Amc5_t$  es la precipitación antecedente de los últimos 5 días.

Los números de curva para condiciones de humedad antecedente secas, promedio y húmedas son  $CN1_K$ ,  $CN2_K$  y  $CN3_K$ , respectivamente. En número de curva real para el día t,  $CN2_K$ , es seleccionado como una función lineal de la precipitación antecedente de 5 días  $Amc5_t$  dada la ecuación anterior.

El modelo requiere especificar  $CN2_K$ . Los valores para  $CN1_K$  y  $CN3_K$ , son

calculados de las aproximaciones de (Hawkins, 1978).

$$CN1_k = \frac{CN2_K}{2.334 - 0.01334CN2_K}$$

$$CN3_k = \frac{CN2_K}{0.4036 - 0.0059CN2_K}$$

- **Percolación**

Se calculan los balances diarios de agua dentro de ambos compartimientos del suelo. Para áreas no saturadas se calcula con la siguiente ecuación.

$$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t$$

En forma similar, el balance de agua para el área saturada se calcula de la siguiente manera:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t$$

En la ecuación anterior,  $U_t$  y  $S_t$  son las humedades del suelo de las zonas no saturada y la zona de poca profundidad en el comienzo del día  $t$ ,  $Q_t$ ,  $E_t$ ,  $P_t$ ,  $G_t$   $D_t$  son la escorrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo (i.e., flujo base), y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día  $t$  (cm).

La percolación ocurre cuando el agua en la zona no saturada sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo  $U^*$  (cm):

$$P_t = \text{Max}(0, (U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - U^*))$$

La capacidad de agua del suelo  $U^*$  tiene que ser definida como una característica de la capa de suelo no saturado. Este parámetro puede estimarse a partir de esta propiedad del suelo.

La evapotranspiración está limitada por la humedad disponible en la zona no saturada:

$$E_t = \text{Min}((CV_t * PET_t), (U_t + R_t + M_t - Q_t))$$

Tal como (Haan, 1972) establece, la zona saturada poca profunda es simulada como un embalse lineal simple. El flujo/volumen de agua subterránea y la infiltración

profunda se calculan de la manera siguiente:

$$G_t = rS_t$$

$$D_t = sS_t$$

Donde  $r$  y  $s$  son las constantes de recesión de agua subterránea y de percolación, respectivamente ( $\text{día}^{-1}$ ).

Estos dos parámetros tienden a tener una alta correlación.

- **Flujo**

El flujo total generado por la cuenca de captación,  $F_t$ , es la suma de la escorrentía ( $RO_t$ ) y del flujo del agua subterránea ( $G_t$ ):

$$F_t = RO_t + G$$

### 2.3.2 Calibración e implementación del modelo

Como se mencionó anteriormente, para la implementación de modelo en Hydro-BID, se requiera de datos climatológico, en formato CSV, datos como temperatura en grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación en centímetros (cm) y caudales en metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Igualmente, es necesario crear archivos que contengan las coordenadas de las estaciones con los datos a utilizar y de los centroides de las sub-cuencas de la cuenca media del río Porce, con sus respectivos COMID, identificación que utiliza la base de datos LAC-AHD para cada una de las sub-cuencas.

Con la ayuda del software QGIS, sistema de información geográfica de libre acceso donde se idéntica, delimita y analiza las cuencas y la base de datos Hidrográfica Analítica de América Latina y el Caribe (LAC-AHD), se identificaron 19 sub-cuencas para la cuenca media del río Porce, cada una con su respectiva identificación (COMID). En la Figura 12, se presenta la cuenca media del río Porce con sus respectivas sub-cuencas, donde se puede observar que el COMID de la sub-

cuenca donde se ubica la estación RMS-22 es 300924800 y la de la estación RMS-15 Gabino es 300869800, identificación importante a la hora de la modelación en HydroBID.

Esta información es utilizada para interpolar los datos de temperatura y precipitación a nivel de las sub-cuencas en HydroBID a través de la herramienta denominada Climate data Interpolating Tool. Luego de la interpolación de datos de temperatura y precipitación se realiza la simulación del cálculo de caudales.

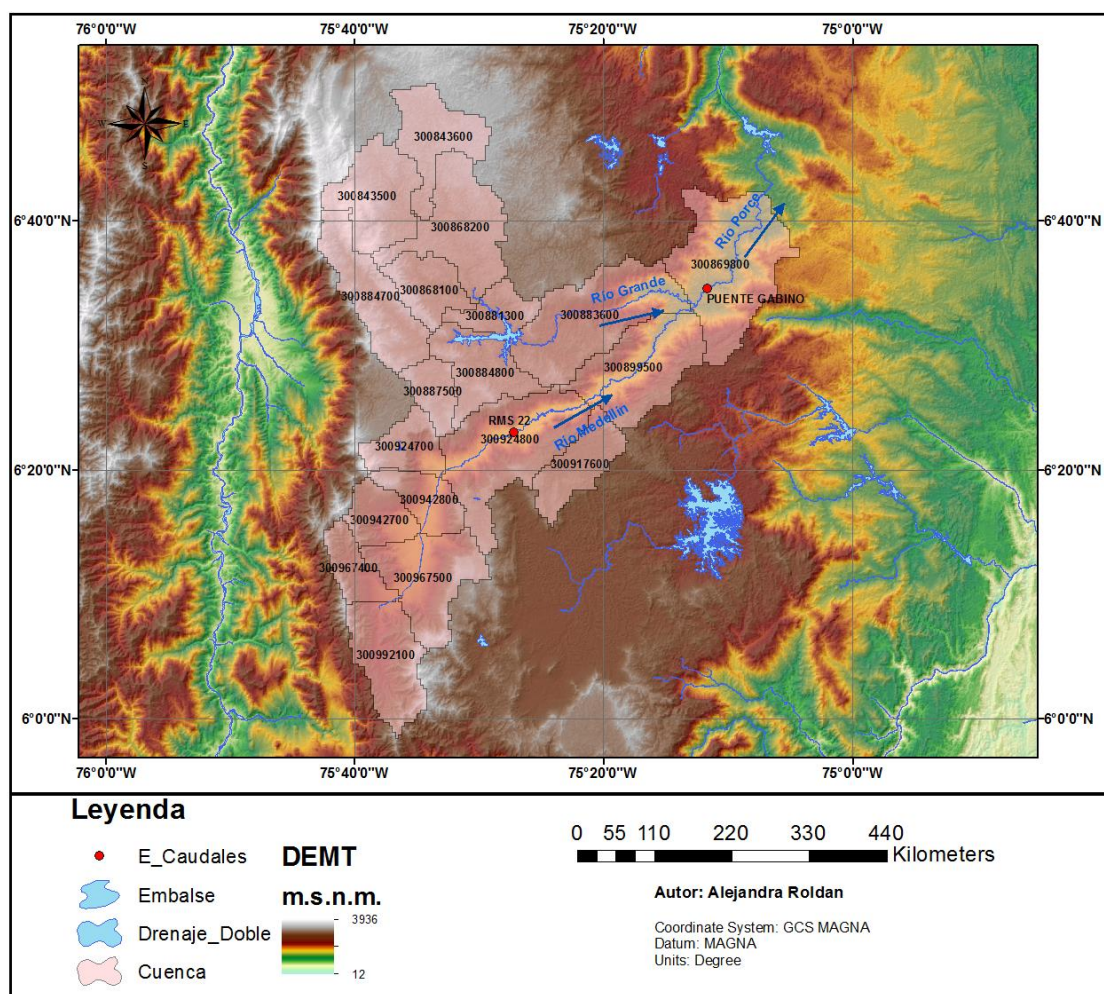


Figura 12. Subcuencas de la base de datos LAC-AHD.

Para la simulación en Hydro-BID se requiere de la definición de ciertos parámetros, que caracterizan la cuenca de estudio, acoplados en la base de datos LAC-AHD y que podrían ser afectados por un factor multiplicador para mejorar la precisión en la simulación. Los parámetros iniciales de calibración del modelo se presentan en

la Tabla 3.

**Tabla 3. Parámetros para la calibración del modelo**

<b>Parámetro</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor por defecto</b>
Velocity	Velocidad promedio estimada de los segmentos fluviales	0,5 m/s
CN	Numero de curva, controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía	1
AWC	Capacidad disponible del agua en el suelo. Activa el inicio de la percolación	1
R coefficient	Coefficiente de recesión. Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado	0,01
Seepage	Coefficiente de percolación. Coeficiente que controla la tasa de filtración en el acuífero subterráneo	0,005
Grow season ET factor	Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo	1
Dormant season ET factor	Factor de evapotranspiración durante la estación latente	1
Impervious cover percent	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca	1%

El modelo Hydro-BID puede simular los flujos de corrientes para condiciones históricas, actuales o futuras basadas en información de uso de tierras, precipitación y temperatura. Para la simulación de condiciones futuras, las entradas deben generarse, ya sea reduciendo la escala en los Modelos de Circulación Global (Global Circulation Models) o aplicando el porcentaje esperado de incremento o disminución a los datos actuales de precipitación y temperatura. Las salidas/outputs típicas del modelo para cada cuenca incluyen las series de tiempo de escorrentía superficial diaria, flujo base diario, flujo total diario, humedad diaria almacenada en el suelo (promedio aproximado) y evaporación diaria actual (Fekadu Moreda, 2014).

Para la modelación de la cuenca media del río Porce se calibro los datos de las estaciones RMS-22 y RMS-15 Gabino, en primer lugar se realizó la modelación a la sub-cuenca con COMID 300924800, sub-cuenca donde se ubica la estación RMS-22, luego se realizó la modelación de la sub-cuenca 300869800, sub-cuenca donde se encuentra la estación RMS-15 Gabino y donde finaliza la cuenca media del río Porce.



La calibración de los datos se realizó evaluando diferentes combinaciones en los parámetros del modelo, variando los mismos hasta conseguir los porcentajes de error más cercanos a los propuestos (Tabla 4) y hasta lograr la mayor similitud entre las gráficas de valores observados y simulados arrojadas por el modelo.

HydroBID realiza diferentes cálculos estadísticos para evaluar la veracidad de la simulación respecto a los datos propios de las estaciones, las pruebas utilizadas por el modelo para definir la calibración son:

- Error de volumen general (ove)

$$ove = \frac{\sum_{t=1}^N S_t - \sum_{t=1}^N O_t}{\sum_{t=1}^N O_t} * 100$$

Donde N es el número de días de la simulación sin el primer año. Tal como se describió antes, el t=1 comienza el primer día del segundo año de la simulación.

- Correlación –r

$$r = \frac{N \sum_{t=1}^N O_t S_t - \sum_{t=1}^N O_t \sum_{t=1}^N S_t}{\sqrt{[N \sum_{t=1}^N S_t^2 - (\sum_{t=1}^N S_t)^2][N \sum_{t=1}^N O_t^2 - (\sum_{t=1}^N O_t)^2]}}$$

- Coeficiente de correlación modificado,  $r_{mod}$

$$r_{mod} = r \frac{\min(S_{min}, S_{obs})}{\max(S_{min}, S_{obs})}$$

Donde  $\sigma_{obs}$  y  $\sigma_{sim}$  son desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, respectivamente.

- Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe,  $R^2$

$$r^2 = 1.0 - \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2}$$

Donde  $\mu_o$  es la media (promedio) del flujo observado.

En la Tabla 4 se presenta los rangos estadísticos propuesto para garantizar una

buena calibración del modelo.

**Tabla 4. Rangos de parámetros estadísticos para la calibración del modelo**

Fuente: (Amaya, 2019)

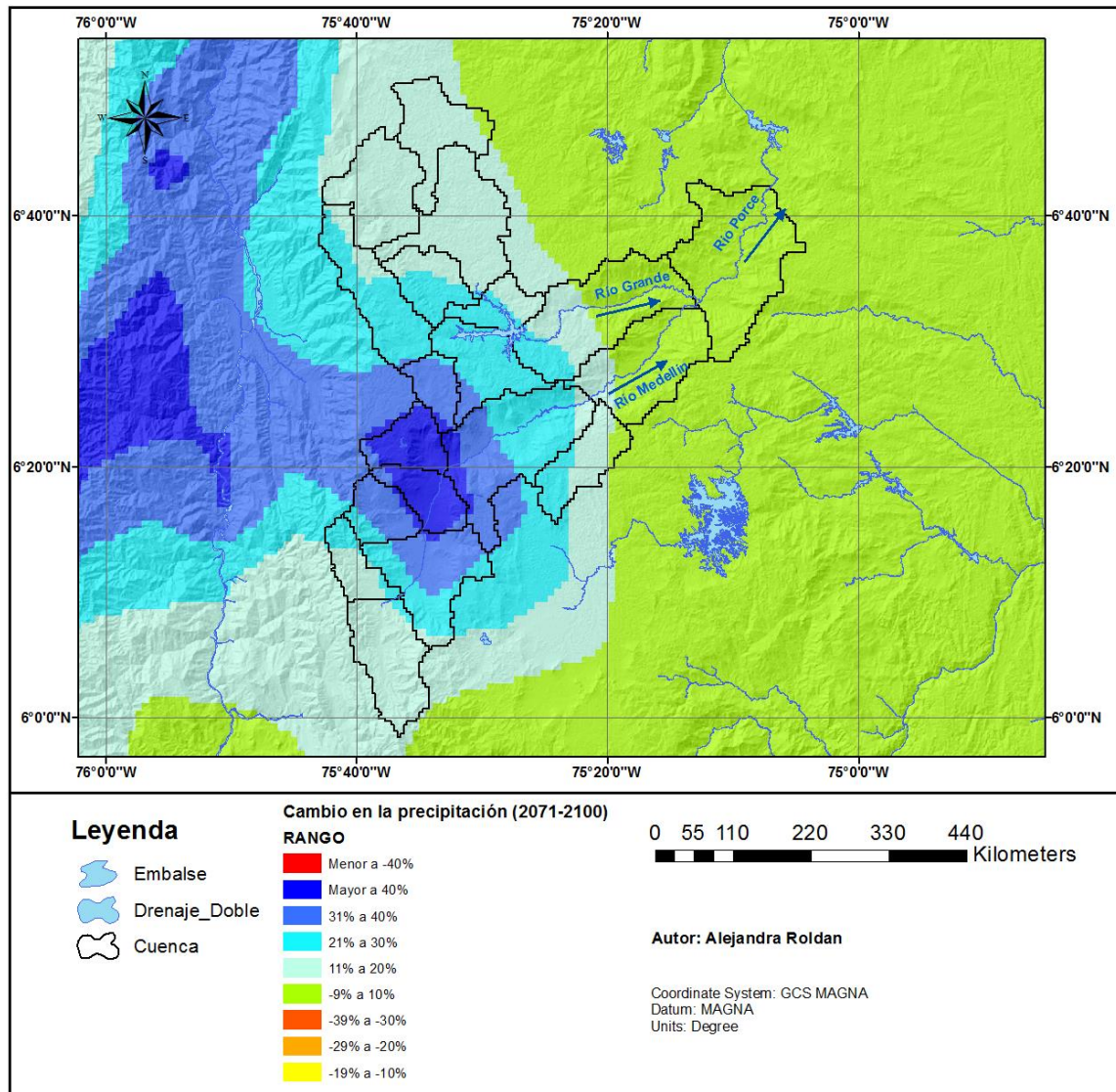
<b>Parámetro estadístico</b>	<b>Valor adecuado en un modelo calibrado</b>
Volumen de error (Overall volumen error)	-+/(20-30 ó 30-40)
Número de correlación (Correlation, r(-))	Lo más cerca de 1
Correlación del modelo (Modified correlation, Rmod)	Lo más cerca de 1
Nash-Sutcliffe Efficiency, R2	Cercano a 0,40 ó 0,6

## **2.4 Escenarios de cambio climático**

La herramienta Hydro-BID, a través del apartado “Climate Scenario”, permite realizar proyecciones de escenarios de cambio climático con diferentes resoluciones de datos, diarias, mensuales o con factores de incremento o disminución de los parámetros climáticos, dado a que los valores diarios de modelos de circulación globales no son usualmente confiables se recomienda usar datos de precipitación y temperatura mensual o anual para proyecciones futuras. En ausencia de datos climáticos proyectados a futuro, como es en el caso de estudio, Hydro-BID permite un incremento o disminución de la precipitación mediante un valor en porcentaje y un incremento o disminución de la temperatura media en valores absolutos (Fekadu Moreda, 2014).

Con el fin de analizar los efectos del cambio climático en los caudales futuros de la cuenca media del río Porce se utilizó los escenarios evaluados por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (IDEAM, 2010), donde se presentan proyecciones generales de aumento o disminución de temperatura y precipitación en el periodo 2071 al 2100. Para el caso en particular de la cuenca media del río Porce hay una variación significativa en el cambio climático de la zona de estudio, por esta razón se realizó un promedio ponderado de los posibles cambios en la temperatura y la precipitación para realizar el análisis en el modelo. En la Figura 13 se presenta el mapa de cambio en la precipitación pronosticado para el periodo 2071-2100, en la zona de la cuenca media del río Porce, la

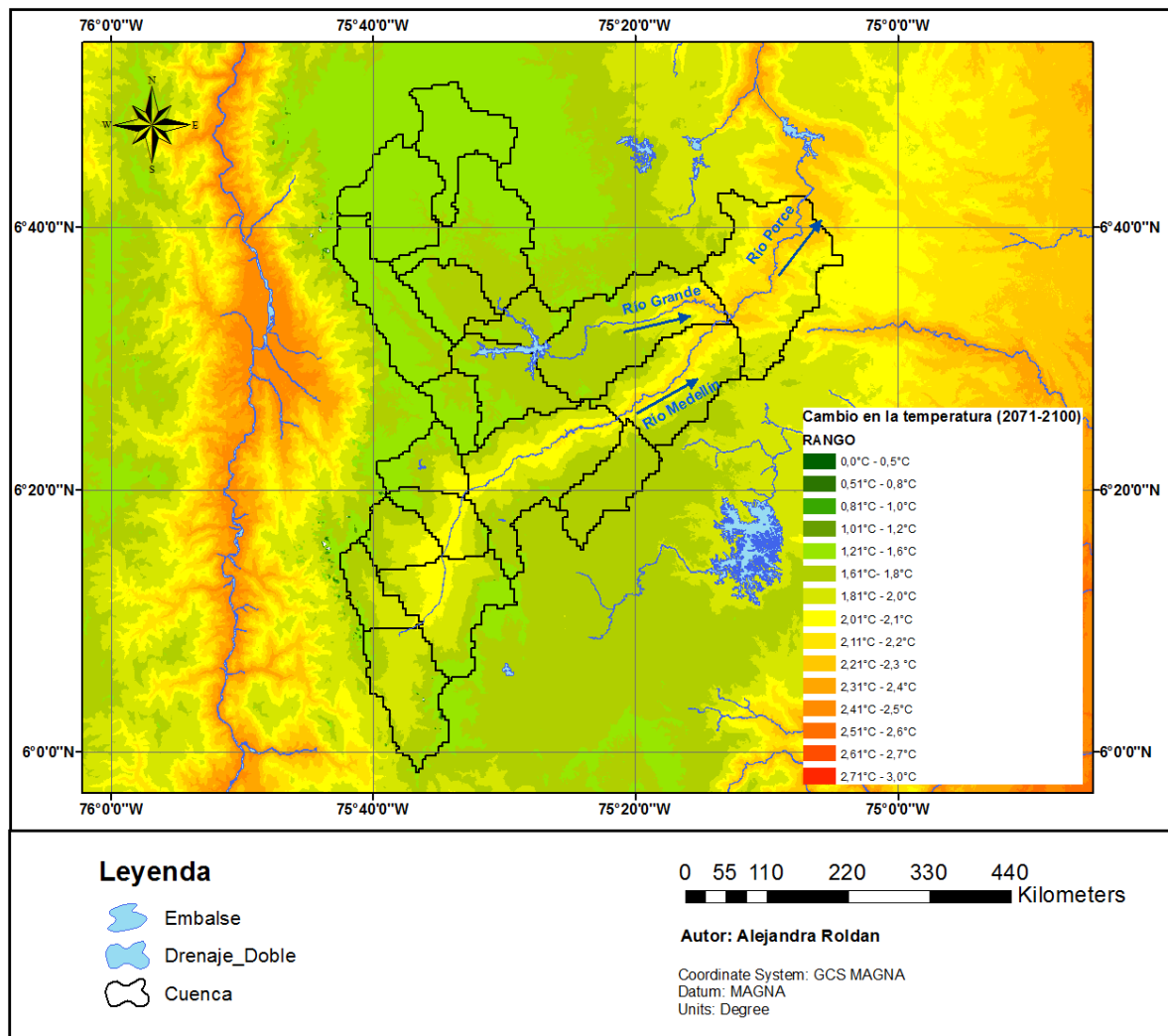
información para la elaboración del mapa fue tomado del (IDEAM, 2010).



**Figura 13. Cambio en la precipitación.**

**Fuente: (IDEAM, 2010)**

Igualmente, para el análisis de cambio de la temperatura se utilizó la información del (IDEAM, 2010). En la Figura 14 se presenta el mapa de cambio en la temperatura pronosticado en la zona de la cuenca media del río Porce.



**Figura 14. Cambio en la temperatura**

**Fuente: (IDEAM, 2010)**

Dada la variabilidad en los escenarios de cambio climático para la cuenca en estudio, se escogieron dos escenarios para evaluar la variación en los caudales de la cuenca media del río Porce, el cambio de temperatura para los dos escenarios es de 2.2°, cambio promedio de temperatura para la cuenca. En la Figura 13, se puede observar que el cambio de la precipitación en la cuenca varía espacialmente entre +40% hasta -9%, por esta razón se eligieron cambios del +35% y -9% para la evaluación del modelo, ya que son los escenarios más desfavorables para la cuenca. En la Tabla 5, se presentan los escenarios evaluados.

**Tabla 5. Escenarios para la evaluación del cambio climático.**

<b>Parámetros</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Temperatura	2.2°	2.2°
Precipitación	+35%	-9%

### 3 RESULTADOS

Los resultados del estudio se obtuvieron en diferentes etapas, en primer lugar se calibro las estaciones, RMS-22 y RMS-15 Gabino, luego se evaluaron los diferentes escenarios expuestos en la Tabla 5 para analizar el comportamiento de la cuenca con el cambio climático.

#### 3.1 Calibración del modelo

Lugo de procesar la información climatológica de la cuenca para la interpolación de los datos de temperatura y precipitaciones, se procedió a realizar la simulación de la estación RMS-22, después de evaluar diferentes escenarios en los parámetros principales de la cuenca, se encontró el mejor ajuste entre los datos simulados y los observados, los estadísticos de la modelación de la estación RMS-22 se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6. Estadísticos de la modelación de la estación RMS-22**

<b>Estadísticas</b>	<b>Valor diario</b>	<b>Valor mensual</b>
<b>Volumen de error</b>	0,77	0,76
<b>Correlación (r)</b>	0,54	0,9
<b>Correlación del modelo</b>	0,46	0,84
<b>Nash-Sutcliffe R<sup>2</sup></b>	-0.11	0,8

Los parametros de la simulación que presentaron los estadisticos expuestos en la Tabla 6, se presentan en la Tabla 7, tanto los factores de evapotranspiración de cultivo latente como el lumbral de temperatura y factor de fusión se dejaron en 1, como se recomiendan en las guias de Hydro-BID (Fekadu Moreda, 2014).

**Tabla 7. Parámetros de calibración estación RMS-22.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Numero de curva (CN)	1.53
Contenido disponible de agua (CDA)	0.1
Coefficiente de Recesión agua	0.0083
Coefficiente de percolación	0.0041

Como se menciono anteriormente una de las herramientas más importantes para la evaluación del ajuste de la modelación son las graficas, por esta razon se evaluó la similitud entre las curvas de duración de caudales de los simulados y los observados como tambien la series de tiempo mensuales. En la Figura 15 se presenta las curvas de duración de caudales y en la Figura 16 las series de tiempo mensuales de los caudales tanto simulados como observados.

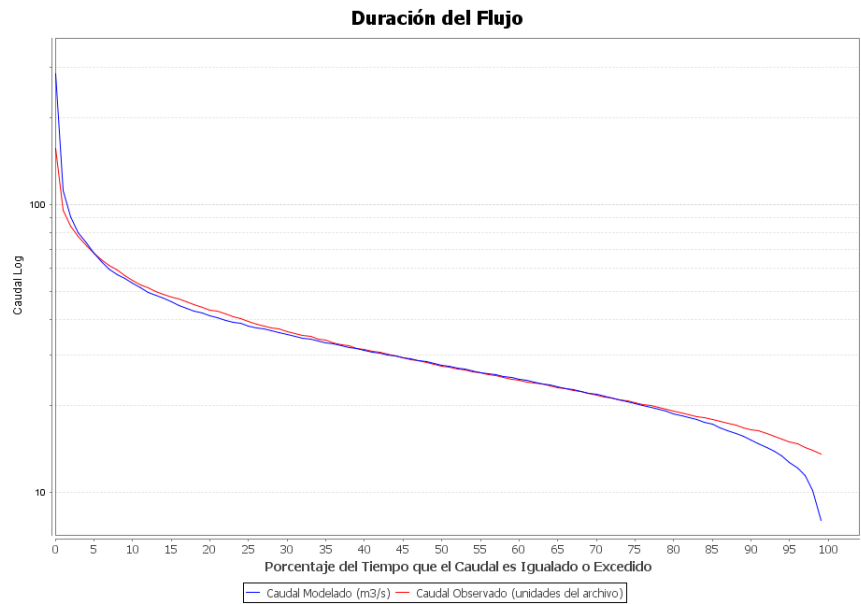


Figura 15. Curva de duración de caudales simulados y observados, estación RMS-22.

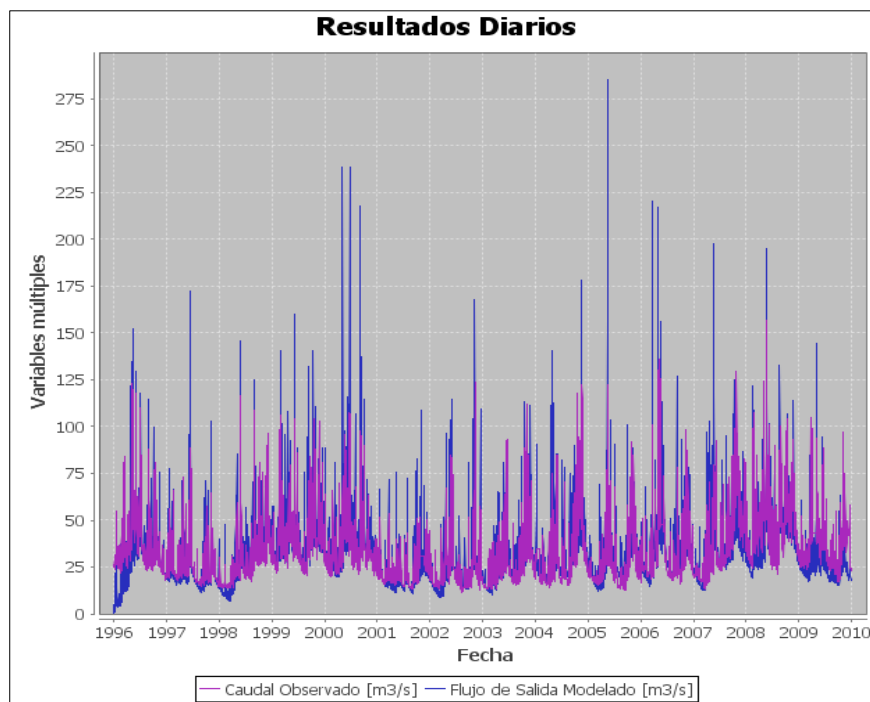


Figura 16. Series de caudales medios mensuales, estación RMS-22.

Igualmente, se realizó la calibración del modelo para la estación RMS-15 Gabino, teniendo en cuenta la calibración de la estación aguas arriba, RMS-22, el mejor los estadísticos de la modelación de la estación RMS-22 se presentan en la Tabla 8, se presenta los resultados de los estadísticos de la modelación con mejor ajuste encontrada para la estación RMS-15 Gabino.

**Tabla 8. Estadísticos de la modelación de la estación RMS-15 Gabino.**

<b>Estadísticas</b>	<b>Valor diario</b>	<b>Valor mensual</b>
Volumen de error	1,67	1,69
Correlación (r)	0,59	0,87
Correlación del modelo	0,58	0,84
Nash-Sutcliffe R <sup>2</sup>	0.19	0,75

Los parámetros de simulación para la cuenca media del río Porce se presentan en la Tabla 9, igualmente los factores de evapotranspiración de cultivo latente como el lumbral de temperatura y factor de fusión se dejaron en 1, como se recomiendan en las guías de Hydro-BID.

**Tabla 9. Parámetros de calibración estación RMS-15 Gabino.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Numero de curva (CN)	0.9
Contenido disponible de agua (CDA)	0.2
Coefficiente de Recesión agua	0.007
Coefficiente de percolación	0.0055

En la Figura 17, se presenta la curva de duración de caudales simulados y observados de la estación RMS-15 Gabino y en la Figura 18 la serie de caudales medios mensuales.

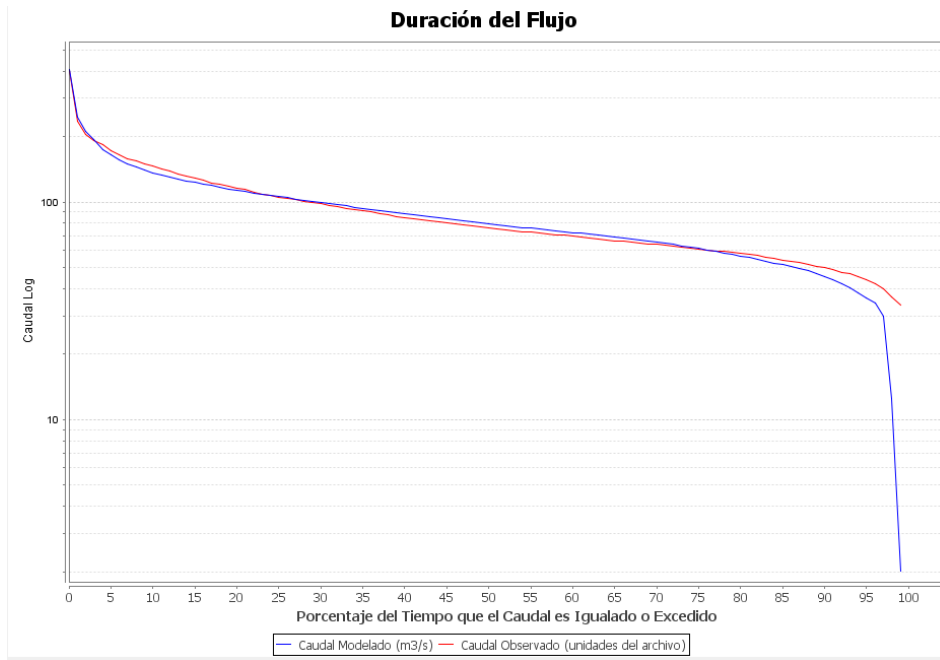


Figura 17. Curva de duración de caudales simulados y observados RMS-15 Gabino.

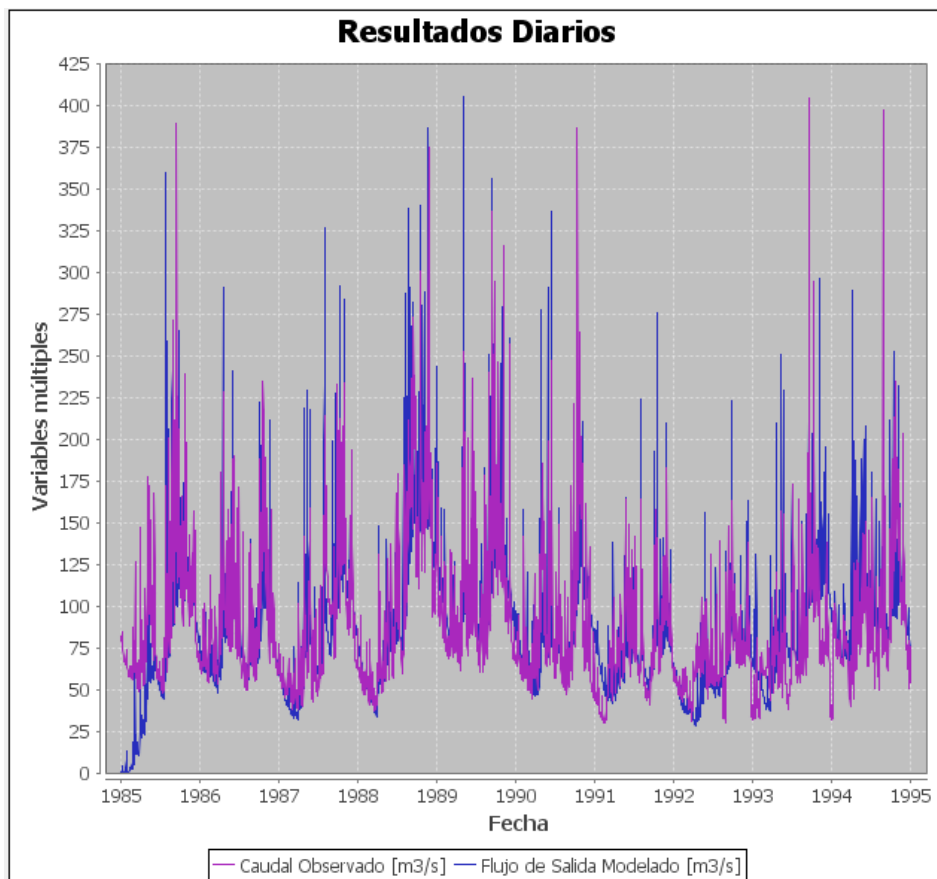


Figura 18. Serie de caudales medios de la estación RMS-15 Gabino.



### 3.2 Evaluación de escenarios climáticos

Una vez realizada la modelación para para cada una de las estación, se evaluó el comportamiento de la cuenca con los escenarios climáticos mencionados en el numeral 2.4, los cuales se basan en un cambio de la temperatura media de +2° y un cambio en la precipitación de +39% y -9%, respectivamente para los escenarios 1 y 2. En la Figura 19, se presenta el resultado de la modelación de los caudales de la cuenca media del río Porce para su estado actual y en cada uno de los escenarios de cambio climático.

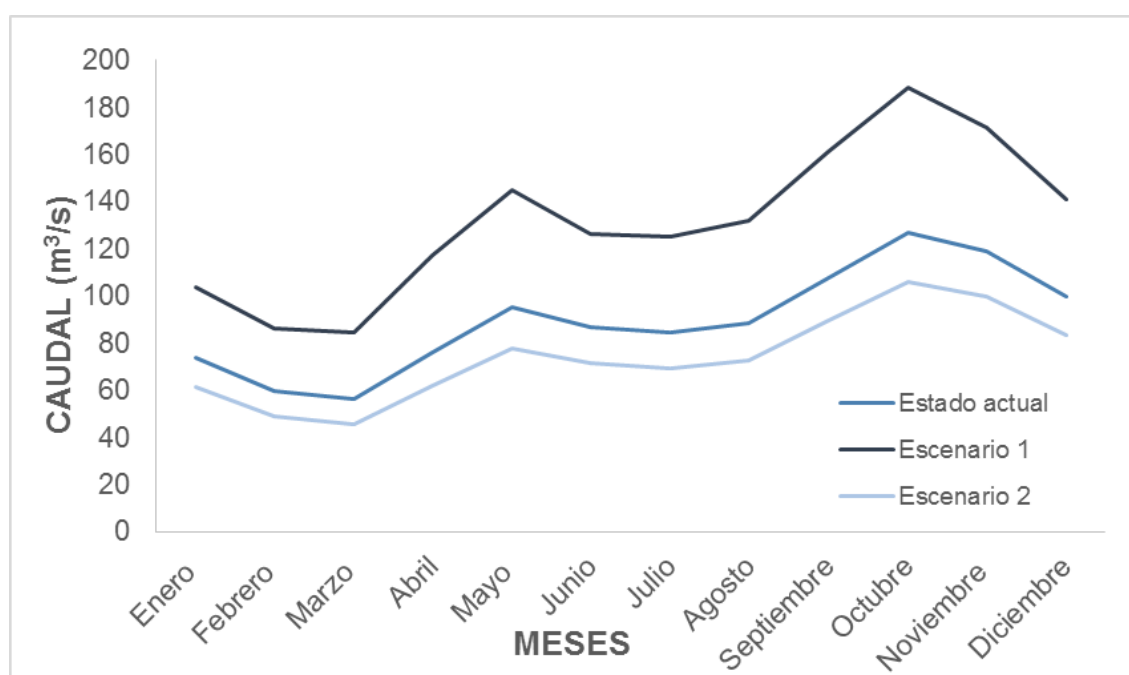


Figura 19. Caudales medios mensuales para los escenarios de cambio climático.

En general, para el estado actual de la cuenca el volumen de precipitación promedio anual es de aproximadamente 20.87 hm<sup>3</sup>/año, el volumen de la evapotranspiración es de 6.21 hm<sup>3</sup>/año y el volumen de escorrentía de 1.6 hm<sup>3</sup>/año (Figura 20). La temperatura promedio en la cuenca, estimada en la modelación es de 17°C.

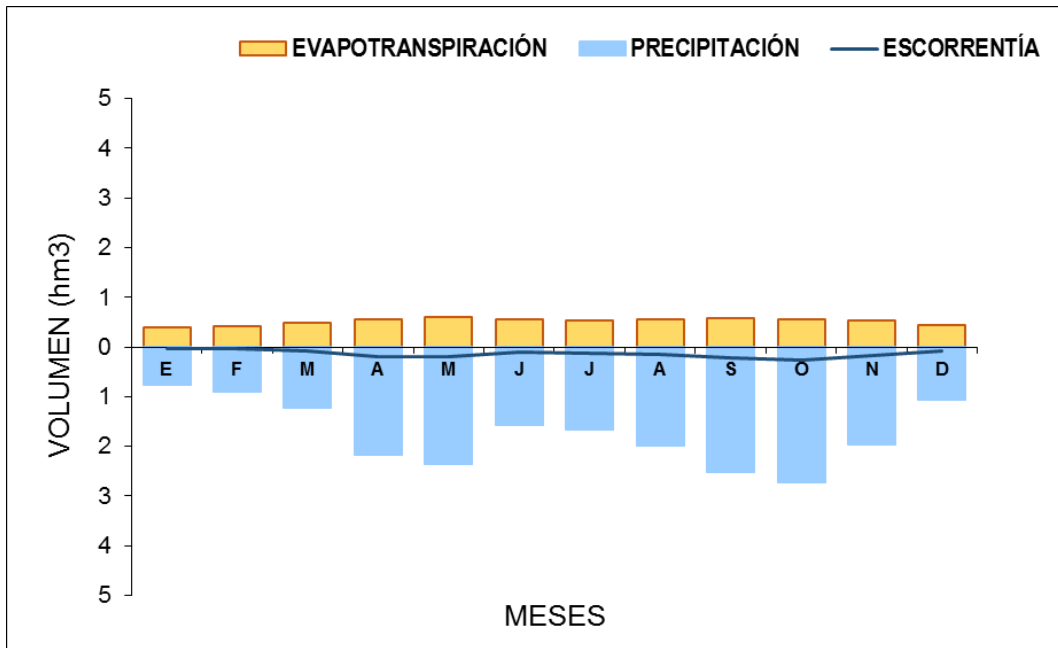


Figura 20. Balance hídrico mensual, estado actual

En la Figura 21, se presenta el balance hídrico mensual de la cuenca del río Porce bajo las condiciones del escenario 1, el volumen de precipitación promedio anual es de aproximadamente 28.18 hm<sup>3</sup>/año, el volumen de la evapotranspiración es de 7.06 hm<sup>3</sup>/año y el volumen de escorrentía de 3.06 hm<sup>3</sup>/año. La temperatura promedio en la cuenca es de 19°C.

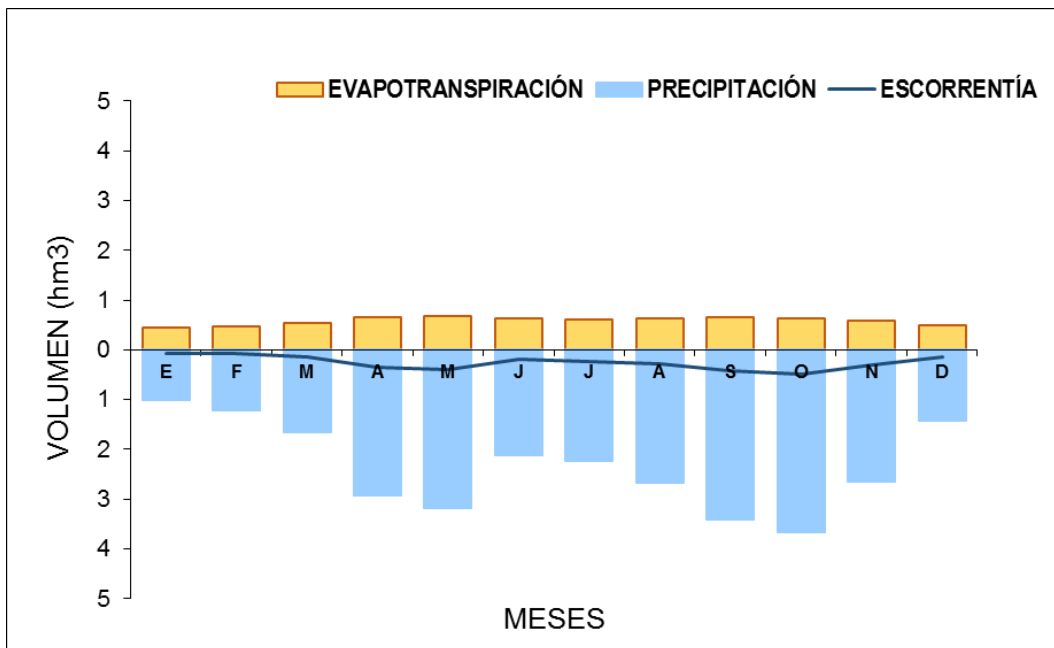


Figura 21. Balance hídrico mensual, escenario 1.

En la Figura 22, se presenta el balance hídrico mensual de la cuenca del río Porce bajo las condiciones del escenario 2, el volumen de precipitación promedio anual es de aproximadamente 18.99 hm<sup>3</sup>/año, el volumen de la evapotranspiración es de 6.85 hm<sup>3</sup>/año y el volumen de escorrentía de 1.30 hm<sup>3</sup>/año. La temperatura promedio en la cuenca es de 19°C.

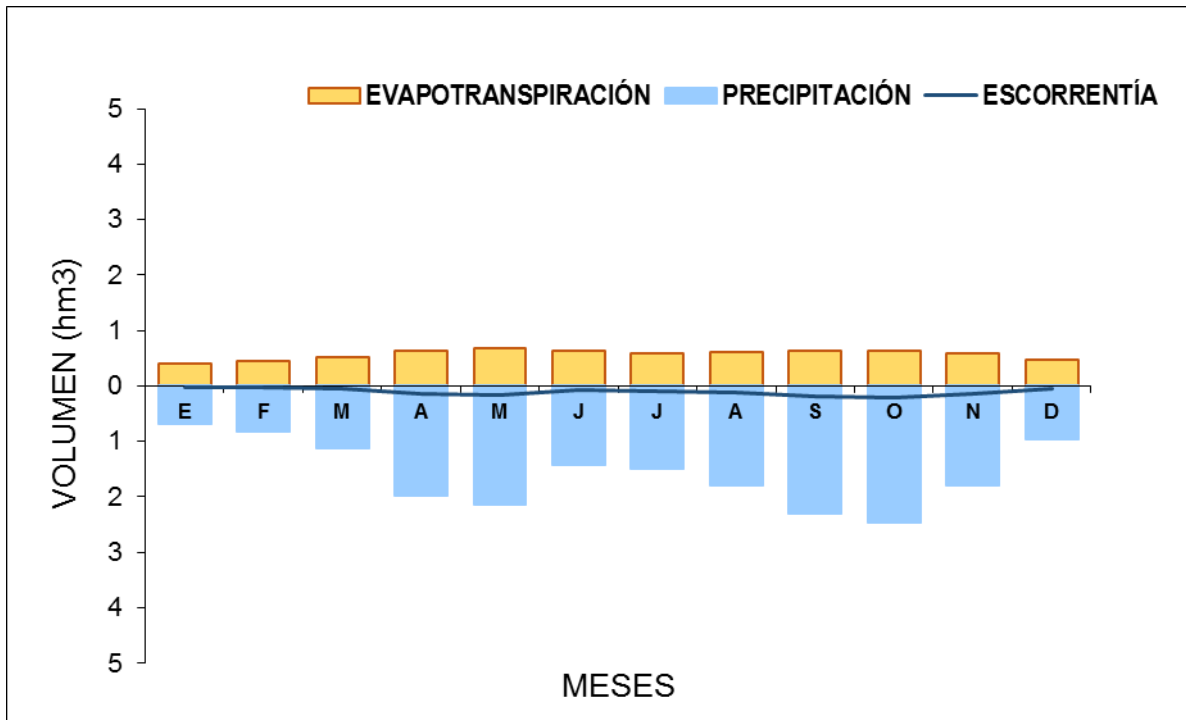


Figura 22. Balance hídrico mensual, escenario 2.

#### 4 DISCUSIÓN

A continuación, se analiza los resultados obtenidos a través del software HydroBID en la caracterización de la cuenca media del río Porce y su comportamiento bajo diferentes escenarios del cambio climático respecto al conocimiento general de la cuenca y la literatura disponible de ella.

Inicialmente, aunque por la importancia de la cuenca a nivel regional se considera una cuenca ampliamente instrumentada, los datos de la misma no son libres y los disponibles requieren de un buen análisis para su utilización.

Analizando los parámetros obtenidos para la caracterización de la zona este de la cuenca del río Porce (río Medellín), estación RMS-22, se puede observar que los parámetros para el número de curva y disponibilidad de agua en el suelo no se encuentran dentro del rango recomendado, dado a que estos parámetros representan la caracterización del uso y tipo de suelo (CN) y la textura del suelo (CDA) se pudo analizar la significativa intervención que ha tenido la cuenca del río Medellín en los últimos años, información que se corrobora con el conocimiento propio por el cambio que se ve en la misma, por esta razón se concluye que hydroBID no cuenta con una caracterización actualizada de la parte este de la cuenca media del río Porce.

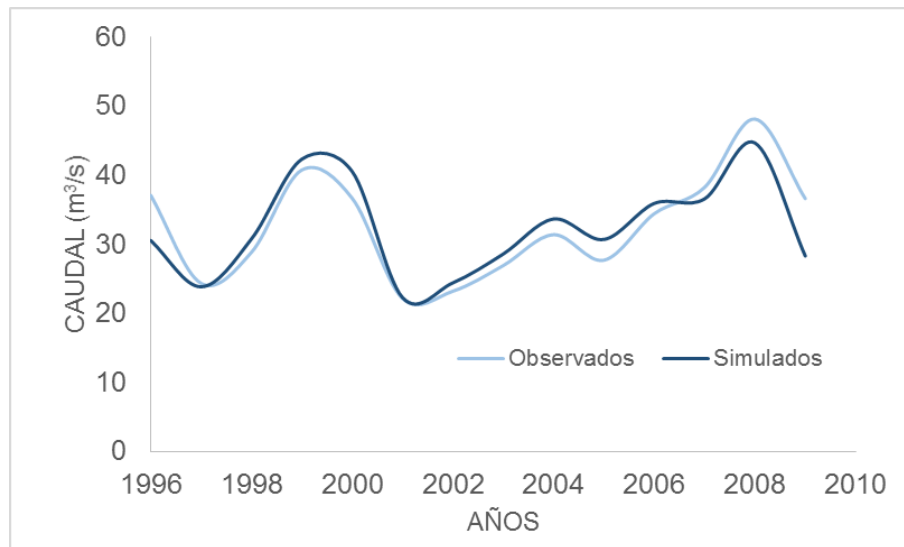
Por el contrario, los parámetros de calibración de la estación RMS-15 se encuentran dentro de los rangos recomendados, de esto se pudo analizar que teniendo caracterizada la cuenca alta del río (estación RMS-22), zona de mayor intervención de la totalidad de la cuenca, la caracterización en HydroBID de toda la cuenca tiene el comportamiento adecuado y actualizado.

En cuando a la calibración obtenida en las dos estaciones de datos, los resultados son admisibles para el análisis que se desea realizar en la cuenca, en las Tabla 6 y Tabla 8, se puede observar que los estadísticos obtenidos entre los datos observados y simulados se encuentran dentro de los rangos propuestos, Tabla 4.

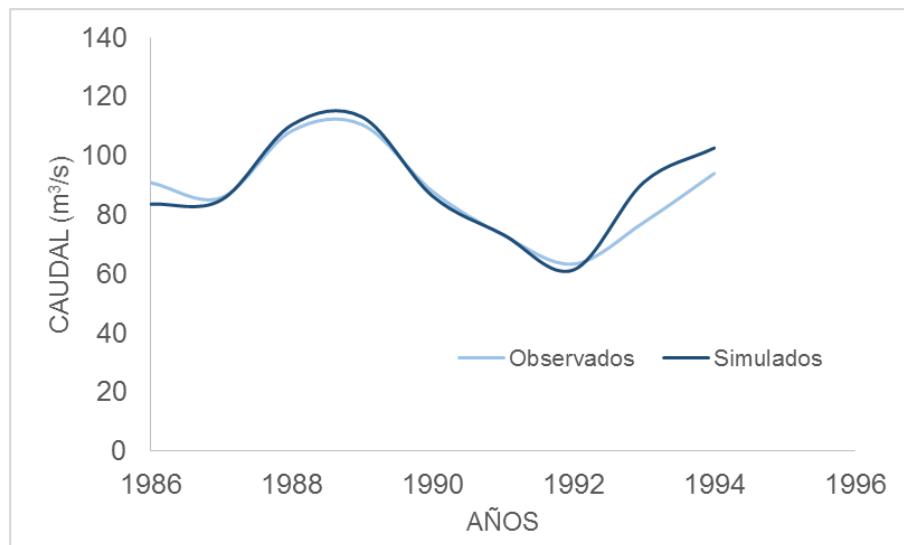
Por otro lado, las curvas de duración de caudales, resultados del proceso de calibración, tienen un ajuste aceptable entre los valores observados y calibrados de las estaciones RMS-22 y RMS-15 Gabino (Figura 15 y Figura 17), se puede observar que el modelo no se ajusta con precisión en el primer año de calibración, 1985, ya que comienza con datos desde 0 y los primeros días de los valores calibrados son datos cercanos a cero (Figura 18 y Figura 19), por esta razón las curvas de duración de caudales presentan diferencias en los caudales pequeño, no se recomienda utilizar el primer año de simulación de las estaciones para el análisis final.

En las Figura 23 y Figura 24, se presentan la comparación entre los caudales simulados y observados de las estaciones RMS-22 y RMS-15 Gabino, respectivamente, donde se pueden evidenciar la similitud entre el comportamiento

y la magnitud de los caudales, en general se considera apropiado el análisis realizado en la simulación.

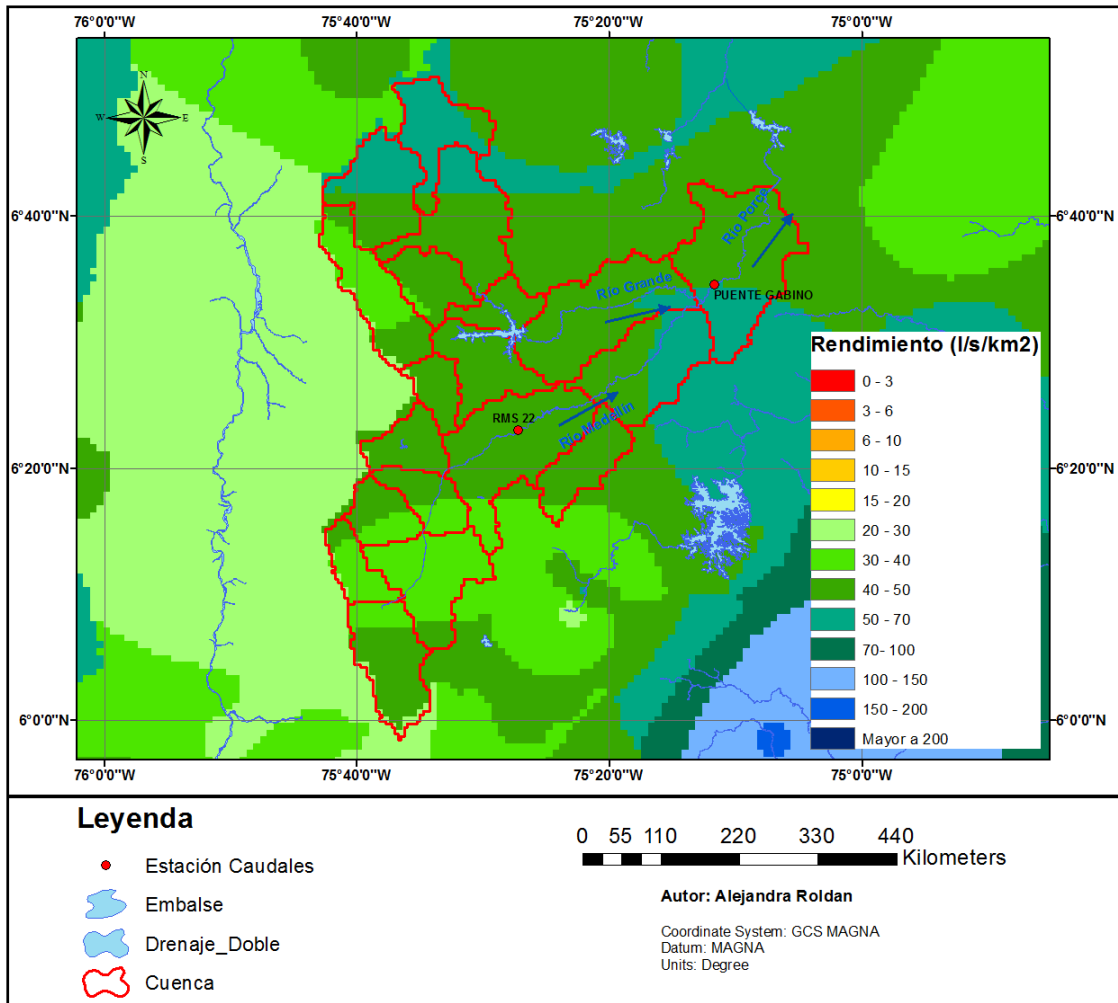


**Figura 23. Caudales observados y simulados estación RMS-22.**



**Figura 24. Caudales observados y simulados estación RMS-15 Gabino.**

Los resultados de la simulación para el estado actual de la cuenca, presenta un rendimiento hídrico de  $36 \text{ l/s/km}^2$ , información corroborada con el mapa de rendimiento hídrico de Colombia (Figura 25). La oferta hídrica de la cuenca media del río Porce es menor que la oferta hídrica promedio de Colombia  $58 \text{ l/s/km}^2$  (Leodán Andrés Otaya Burbano, 2008) y mayor que la oferta hídrica promedio suramericana ( $21 \text{ l/s/km}^2$ ).



**Figura 25. Rendimiento hídrico Total para condiciones de año medio en Colombia.**

**Fuente: (IDEAM, 2014)**

La precipitación estimada para el estado actual de la cuenca en HydroBID es de 2132 mm/año, valor cercano al observado en los mapas de precipitación para Colombia que se presenta Figura 3, donde se estima una precipitación promedio de 1994 mm/año. La diferencia entre los valores de precipitación de aproximadamente del 6%, igualmente se considera que los valores estimados en HydroBID son los más cercanos a la realidad, ya que los mapas de precipitación para la Colombia se elaboraron a gran escala.

Bajo los escenario de cambio climático, se puede observar que para el escenario 1 el rendimiento de la cuenca aumenta a 53 l/s/km<sup>2</sup>, con un caudal medio de 131,8 m<sup>3</sup>/s y para el escenario 2 el rendimiento disminuye en a 29 l/s/km<sup>2</sup>, con un caudal medio de 74 m<sup>3</sup>/s (Figura 19). Bajo las situaciones más desfavorables de

cambio climático, la cuenca media del río Porce no alcanza la oferta hídrica promedio en suramericana  $21 \text{ l/s/km}^2$ , esto representa que a nivel general para Suramérica la cuenca medio del río Porce cuenta con un buen rendimiento hídrico.

Si bien Colombia cuenta con una gran riqueza hídrica es necesario analizar las proyecciones del comportamiento de las cuencas para conocer los posibles cambios en las mismas y así tomar las decisiones pertinentes en la distribución y cuidado del recurso hídrico, análisis de gran importancia para la cuenca media del río Porce, ya que por su ubicación y riqueza hídrica es de gran interés por el hombre para diferentes usos como hidroeléctrico, consumo humano, agrícola, entre otros.

## 5 CONCLUSIONES

Los datos climáticos utilizados para el modelo fueron analizados y corregidos por diferentes métodos estadísticos que generan confianza en la utilización de los mismos para la realización de un buen estudio, en particular, se evidenciar inconsistencia de las estaciones San Pablo y Yolombolo, los cuales fueron corregidos, y se decidió no utilizar los datos de las estaciones Iguana, La Aldea, San Isidro, Llanos de Cuiba y Meseta San Pedro.

Los resultados encontrados a través de la herramienta HydroBID, se consideran aptos para la zona de estudio, ya que la correlación entre los datos observados y simulados fue buena, lo que genera confiabilidad en los resultados del estudio.

La simulación hidrológica presenta un rendimiento hídrico de 36 l/s/km<sup>2</sup> para el estado actual de la cuenca información corroborada con los mapas de rendimiento hídrico para Colombia, por esta razón se considera adecuada la utilización de HydroBID para estudios en la cuenca media del río Porce.

HydroBID no realiza una buena calibración en el primer año de simulación, ya que considera caudales pequeños en la simulación obtenida para ambas estaciones, por esta razón la curva de duración de caudales no presenta un buen ajuste en los caudales pequeños.

Bajo los escenarios de cambio climáticos evaluados en la cuenca media del río Porce se puede observar que el rendimiento de la misma podría variar entre 29 l/s/km<sup>2</sup> a 53 l/s/km<sup>2</sup>. Respecto a la oferta hídrica promedio de las cuencas de suramerica (21 l/s/km<sup>2</sup>), la cuenca media del río Porce sobrepasa el promedio bajo las condiciones actuales de la misma y no tendrían rendimientos menores al promedio bajo las situaciones más críticas que se esperan en la cuenca.

Los resultados obtenidos en la modelación bajo los diferentes escenarios de cambio climático son de gran ayuda para la toma de decisiones en la cuenca, respecto a la planificación a futuro de los recursos de la misma.



## 6 BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, O. (2007). *Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de <https://minas.medellin.unal.edu.co/departamentos/geocienciasymedioambiente/hidrosig/index.php/es/>
- Amaya, F. L. (2019). *CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO COELLO (DEPARTAMENTO DEL TOLIMA, COLOMBIA) CON EL PROGRAMA HYDROBID*. Alcalá de Henares.
- Área metropolitana del valle del Aburrá. (2016). *Actualización POMCA río Aburrá*. Medellín.
- BID. (2017). *Guía paso a paso Manual de Hydro-BID*. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/guia-paso-paso-manual-de-hydro-bid>
- Centro de ciencia y tecnología de Antioquia. (2013). *Resumen de resultados evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce*. Medellín.
- Fekadu Moreda, F. M. (2014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2* .
- García Félix, D. S. (2001). El agua. En Ideam, *El medio ambiente en Colombia*.
- GLOBE. (2005). *Protocolo de temperatura máxima, mínima y actual*.
- Haan, C. (1972). A water yield model for small watersheds. *Water Resources Research*, 58-69.
- Hamon, W. (1961). Estimating potential evapotranspiration. En P. o. Engineers. *Journal of Hydraulics Division*.
- Hawkins, R. (1978). Runoff curve numbers with varying site moisture. En P. o. Engineers. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*.
- IDEAM. (2010). *Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Geoportal IDEAM- Escenarios del cambio climático : <http://visor.ideam.gov.co/geovisor/#!/profiles/3>
- IDEAM. (2010). *SIRH*. Obtenido de Sistema de Información de Recursos Hídrico: <http://sirh.ideam.gov.co/Sirh/faces/observatorio.jsp>
- IDEAM. (2014). *Estudio nacional del agua- Rendimeinto hídrico total para condiciones de año medio en Colombia*. Bogotá.
- James Rineer, M. B. (2014). *Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe. Parte 1* .

- Leodán Andrés Otaia Burbano, G. L. (2008). *ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA CON INFORMACIÓN ESCASA EN ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS*. Medellín.
- Minitab. (2019). *Métodos y fórmulas para Prueba de valores atípicos*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/outlier-test/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>
- NCEP. (s.f.). *Global Weather Data for SWAT*. Obtenido de <https://globalweather.tamu.edu/>
- Pabón, J. D. (2003). *El cambio climático global y su manifestación en Colombia*. Bogotá: Departamento de Geografía - Universidad Nacional de Colombia.
- Ramirez, C., & Orrego, S. (2015). Trayectorias de cambios en coberturas terrestres en una cuenca de los Andes Colombianos: río Grande. *Journal of Engineering and Technology*, 18.
- UDEM, UNAL, UDEA, y UPB. (2011). *Red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Aburra- Medellín en jurisdicción del área metropolitana*. Medellín.