

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA
CUENCA DEL RIO LEÓN BAJO
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
USANDO HYDRO-BID.**

**HYDROLOGICAL CHARACTERIZATION OF
THE LEON RIVER BASIN UNDER CLIMATE
CHANGE SCENARIOS USING HYDRO-BID**

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

**Presentado por:
D^a DINA VANESSA GÓMEZ RAVE**

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

Alcalá de Henares, a 30 de mayo de 2020

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Carolina y a la Fundación REPSOL; a la Universidad de Alcalá de Henares y a la Universidad Rey Juan Carlos; al ingeniero Freddy Leverí Amaya y al profesor Juan A. Pascual. A mi familia y amigos.

Las palabras se quedan cortas al expresar mi profunda gratitud por su valioso apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. General.....	12
2.2. Específicos	12
3. METODOLOGÍA	12
3.1. Zona de estudio y caracterización de la cuenca	13
3.2. Recopilación y análisis de información	15
3.3. Parametrización, calibración e implementación del modelo	17
3.4. Escenarios de cambio climático.....	20
4. RESULTADOS.....	22
5. DISCUSIÓN	32
6. CONCLUSIONES	35
7. BIBLIOGRAFÍA	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización y delimitación de la cuenca del río León (CORPOURABA, 2019).	14
Figura 2. Localización de las estaciones Hidroclimatológicas en la cuenca del río León.	16
Figura 3. Subcuencas hasta la estación Barranquillita consideradas en la calibración del modelo.	20
Figura 4. Series de tiempo para los Caudales Observados y los Caudales Modelados en la calibración (subcuencas hasta la estación Barranquillita).....	24
Figura 5. Curva de duración para los Caudales Observados y los Caudales Modelados en la calibración (subcuencas hasta la estación Barranquillita).....	24
Figura 6. Correlación lineal entre los Caudales Observados y los Caudales Modelados en la calibración (subcuencas hasta la estación Barranquillita).....	25
Figura 7. Balance Hídrico para las subcuencas hasta la estación Barranquillita.	26
Figura 8. Series temporales del Balance Hídrico para las subcuencas hasta la estación Barranquillita.....	27
Figura 9. Balance Hídrico de la Cuenca del río León.	28
Figura 10. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el <i>Escenario 1</i> de cambio climático.....	30
Figura 11. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el <i>Escenario 2</i> de cambio climático.....	31
Figura 12. Volumen de flujo total en la cuenca del río León bajo diferentes escenarios de análisis.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones Hidroclimatológicas seleccionadas para la cuenca del río León.	16
Tabla 2. Escenarios de cambio climático analizados en la cuenca del río León.	22
Tabla 3. Parámetros establecidos en la calibración del Modelo.	23
Tabla 3. Parámetros establecidos en la calibración del Modelo.	23
Tabla 4. Balance Hídrico para las subcuencas hasta la estación Barranquillita.	26
Tabla 5. Balance Hídrico de la Cuenca del río León.	28
Tabla 7. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el <i>Escenario 1</i> de cambio climático.....	30
Tabla 8. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el <i>Escenario 2</i> de cambio climático.....	31

ABREVIATURAS

BID: Banco Interamericano de Desarrollo.

CORPOURABA: Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá.

CSV: Valores Separados por Comas.

ENSO: El Niño-Southern Oscillation.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -Colombia

IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

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

POMCA: Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca.

RESUMEN

El cambio climático se ha configurado como una amenaza que afecta la estabilidad ambiental, económica, social y política a nivel mundial. Este fenómeno supone perturbaciones en la temperatura, la precipitación y el caudal de los ríos, que a su vez limitan las posibilidades de un desarrollo sostenible, al requerir de medidas de mitigación y adaptación en la planeación y ordenamiento del territorio.

Puntualmente en las presiones sobre el recurso hídrico, se destaca el caso de América Latina y el Caribe, que posee las mayores cuencas hidrográficas del mundo, y que es una región altamente vulnerable a estos cambios, debido a sus particularidades geográficas, climáticas, ecosistémicas y socioeconómicas (Margulis, 2016). En ese contexto, los modelos hidrológicos constituyen una alternativa para la gestión integral del recurso, especialmente ante escenarios de cambio climático.

Ante un panorama de limitada disponibilidad y confiabilidad de datos hidroclimáticos históricos en algunas zonas, los desafíos son mayores. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en sus esfuerzos por promover ciudades resilientes y sostenibles, ha implementado un sistema de modelación integrado para la simulación de gestión de los recursos hídricos, denominado Hydro-BID, el cual utiliza una base de datos de hidrología analítica de la región para el análisis y gestión geoespacial de las diferentes cuencas.

Este trabajo se enfoca en la implementación del modelo de Hydro-BID en la caracterización de la cuenca del río León, en el Golfo de Urabá, Colombia. Esta cuenca hace parte del Chocó biogeográfico, siendo un punto estratégico por su alto endemismo y biodiversidad, así como por su conexión con Centroamérica y el Caribe. El estudio del comportamiento físico de esta cuenca puede incidir en la adecuada gestión y planificación del recurso hídrico en la región, y de manera general, en la ordenación sostenible del territorio.

ABSTRACT

Climate change has been configured as a threat that affects global environmental, economic, social and political stability. This phenomenon involves disturbances in the temperature, precipitation and flow of rivers, which limits the possibilities of sustainable development, by requiring mitigation and adaptation measures in the planning and organization of the territory.

Specifically in the pressures on water resources, Latin America and the Caribbean stands out, which has the largest hydrographic basins in the world, and which is a region highly vulnerable to these changes, due to its geographical, climatic, ecosystemic and socioeconomic characteristics. (Margulis, 2016). In this context, hydrological models are an alternative for the integral management of the resource, especially considering climate change scenarios.

However, the panorama of limited availability and reliability of historical hydroclimatic data in some areas, these challenges are greater. The Inter-American Development Bank (IDB) has implemented an integrated modeling system for the simulation of water resource management, called Hydro-IDB, which uses a hydrology database analytical of the region for the analysis and geospatial management of the different basins .

This work focuses on the implementation of the Hydro-BID model in the characterization of the León river basin, in the Gulf of Urabá, Colombia. This basin is part of the Chocó Biogeographic Region, being a strategic point due to high endemism and biodiversity, as well as for its connection with Central America and the Caribbean. The study of the physical behavior of this basin can regulate the adequate management and planning of the water resource in the region, and in general, in the sustainable management of the territory.

1. INTRODUCCIÓN

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos representan uno de los grandes desafíos globales planteados en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. De manera particular, esta problemática toma gran relevancia en América Latina, en donde se encuentran las mayores cuencas hidrográficas del mundo, y que se ha visto afectada por el incremento en el número y en la intensidad de eventos climáticos, tales como precipitaciones, sequías y cantidad de huracanes (Miralles-Wilhelm et al., 2018; Álvarez, 2016); estos cambios en los patrones climáticos de la región, ejercen presión sobre los sistemas de drenaje en algunas zonas (lluvias más violentas y frecuentes) y en otras, un incremento en el estrés sobre los recursos hídricos. Si a esta situación se le suma el incremento en la vulnerabilidad de las personas y de las infraestructuras, producto de los cambios acelerados y descontrolados en la distribución de la población (Barbier & Hochard, 2018; Jordan et al., 2017), se configura una problemática mucho mayor, en la que los múltiples factores condicionantes de las relaciones entre riesgos y amenazas hidrológicas, aumentan la complejidad en la gestión integral del recurso.

Bajo ese panorama, los modelos hidrológicos toman protagonismo como una alternativa para caracterizar, predecir, planificar y ayudar a la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos y en la ordenación del territorio. Tradicionalmente estos análisis se han fundamentado en la recopilación de datos hidroclimáticos, geográficos, geológicos y ambientales; no obstante, en muchas regiones de América Latina hay una limitada disponibilidad y confiabilidad de esta información (espacial y temporalmente), lo que aumenta el nivel de incertidumbre en las estimaciones, y de manera consecuente, en el manejo ineficiente del recurso hídrico (Hernández & Santos, 2019). Estas necesidades y limitaciones, específicamente en América Latina y el Caribe, llevaron a que el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en sus esfuerzos por promover ciudades y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, implementara un sistema de modelación integrado para la simulación de gestión de los recursos hídricos, utilizando una base de datos de hidrología analítica de la región (Moreda et al., 2016; Nalesso, 2014). HydroBID, que es como se denominó al sistema, se ha configurado como una herramienta muy útil para la toma de decisiones oportunas y eficientes, relacionadas con la planificación y

administración del recurso hídrico, considerando además distintos escenarios de cambio, tales como climáticos, de usos del suelo o de distribución de la población. Este sistema integra un modelo de lluvia escurriente y una Base de Datos Hidrográfica Analítica de América Latina y el Caribe (LAC-ADH), que acoplados al software de acceso libre QGIS, facilitan el proceso de análisis y gestión geoespacial de las diferentes cuencas de la región (Leverí & Pascual, 2020; Rincón & Pascual, 2020; Mena et al., 2019). Su principal ventaja frente a muchos de los programas de simulación del recurso, es que responde a los desafíos relacionados con la falta de información y confiabilidad en los datos históricos de las variables hidroclimáticas, a la vez que se convierte en una estrategia de empoderamiento para que los gobiernos locales manejen sustentablemente el agua, en la medida en que se cuentan con mejores predicciones para el óptimo uso y gestión de la oferta hídrica superficial.

Colombia, que cuenta con el 5% del recurso hídrico del planeta, es uno de los países de América Latina que se consideran más vulnerables a los efectos del cambio climático sobre este recurso (Restrepo-López et al., 2015). Si bien el país posee una alta biodiversidad y una gran variedad de gradientes eco-climáticos, esta situación privilegiada tiende a cambiar por el efecto de factores condicionantes de la vulnerabilidad del recurso hídrico, tales como el crecimiento acelerado de las actividades agrícolas y ganaderas, el crecimiento vertiginoso de la urbanización y la industrialización de las ciudades, y los consecuentes cambios demográficos (Vargas & Restrepo, 2018). Además, por las alteraciones en los regímenes hidrológicos generados por los fenómenos de mesoescala de variabilidad climática, como La Niña (exceso de lluvias) y El Niño (períodos de sequía). Esta situación ha sido abordada por múltiples estudios que analizan las interacciones entre la variabilidad climática y sus efectos sobre el recurso (Canchala et al., 2020; Leverí & Pascual, 2020; Rincón & Pascual, 2020; Ortiz et al., 2017; Poveda et al., 2011); no obstante, hay un consenso generalizado en la necesidad de producir información para menores escalas de análisis, con un alcance y un nivel de detalle más local, especialmente en regiones alejadas poco estudiadas o con menor disponibilidad de registros históricos, dadas las condiciones del desarrollo urbano incipiente y frágil en muchos casos (García et al., 2012). En ese contexto Hydro-BID se posiciona como una herramienta muy útil para dar respuesta a la falta de información, y con esto, a la orientación en la planificación del uso y manejo del agua, así como de la ocupación del territorio, bajo escenarios de

adaptación ante posibles afectaciones generadas por el cambio climático.

Un caso de interés particular es la cuenca del río León, localizada en la jurisdicción de los municipios de Mutatá, Chigorodó, Carepa, Apartadó y Turbo, con su desembocadura en el Golfo de Urabá, en el departamento de Antioquia. Esta zona hace parte de la región conocida como Chocó biogeográfico, caracterizada por un clima predominantemente húmedo y lluvioso, que favorece un alto endemismo y una gran diversidad biológica (CORPOURABA, 2019). Las principales actividades económicas de la región son el cultivo del banano y el plátano, así como la ganadería; en ese contexto, la parte baja del río León es utilizada por embarcaciones mayores y menores como vía navegable, de conexión con el puerto bananero existente. La interrelación de estas características genera condiciones de torrencialidad, estiaje e inundaciones de difícil y complejo funcionamiento, con variaciones muy significativas entre los períodos secos y húmedos, y con grandes aportes de volumen de agua y sedimentos durante la mayor parte de año, lo que también afecta a los ecosistemas estuarinos y deltaicos del Golfo (Arroyave et al., 2012; IDEAM, 2001). Así mismo, se puede sumar el efecto de los cambios climáticos y de las perturbaciones antrópicas, asociadas a las actividades sociales y económicas de la región, que se está consolidando como un punto estratégico de conexión portuaria con las principales ciudades del país, para la exportación de mercancías con nuevos proyectos de este tipo, lo que a su vez incide en una nueva distribución de la población y de los centros urbanos, y en cambios en los usos y coberturas del suelo (García & Mahecha, 2018).

Esta cuenca tiene un comportamiento generalizado en el que en las partes altas hay pendientes pronunciadas que favorecen las acumulaciones de flujos, mientras que en las partes medias y bajas se presentan desbordamientos e inundaciones (CORPOURABA, 2019). En este trabajo se compila el análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca, implementando la herramienta Hydro-BID, a partir del procesamiento de los datos de variables hidrometeorológicas. Finalmente se modelan escenarios sobre el comportamiento evolutivo de sus dinámicas hidrológicas, asociados a cambios climáticos. Entender el comportamiento físico de esta cuenca resulta vital para la adecuada gestión y planificación del recurso hídrico en la región, buscando incidir directamente en la correcta toma de decisiones y en la reducción de los riesgos asociados a sus dinámicas.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Caracterizar hidrológicamente la cuenca del río León (Antioquia, Colombia) por medio de la plataforma Hydro-BID.

2.2. Específicos

- Implementar un modelo hidrológico para la cuenca del río León, a través de la herramienta Hydro-BID.
- Analizar los cambios y transformaciones en la cuenca en las diferentes épocas y escalas temporales, considerando escenarios de cambio climático.
- Discutir sobre las implicaciones de las dinámicas hidrológicas del río León en el entorno.

3. METODOLOGÍA

Con el propósito de caracterizar hidrológicamente la cuenca, de acuerdo con los objetivos planteados, la investigación se resumió en tres grandes actividades organizadas sistemáticamente:

- Recopilación y análisis de las series de tiempo de las variables hidroclimáticas de interés.
- Parametrización, calibración e implementación del modelo Hydro-BID.
- Modelamiento de escenarios de cambio climático.

En ese sentido, en esta sección inicialmente se realiza una contextualización de la zona, con una descripción general de su localización y de las características más relevantes de la cuenca hidrográfica; y posteriormente se sintetizan los aspectos básicos considerados en cada una de las tres actividades desarrolladas con la investigación.

3.1. Zona de estudio y caracterización de la cuenca

La cuenca hidrográfica del río León se localiza en el departamento de Antioquia (Colombia), naciendo en la Serranía de Abibe, a 1200 m.s.n.m, y con una descarga directa en el mar Caribe, sobre el Golfo de Urabá (Figura 1). Si bien su área es cercana a los 2200 km² y su longitud del cauce principal de 180 km, su delimitación es difusa, especialmente en la margen occidental, al estar conectada con la cuenca del río Atrato por una serie de complejos canales, ciénagas y humedales (Arana, 2015).

Geológicamente, cerca del 60% del área de la cuenca está asentada sobre depósitos recientes, aproximadamente el 23% sobre rocas sedimentarias y el 17% restante sobre cuerpos ígneos intrusivos, volcánicos, volcanosedimentarios y metamórficos. Su relieve es predominantemente plano, con una leve inclinación hacia el noroccidente en una zona de ladera; a su vez, la mayor parte del territorio es rural, y sólo un porcentaje inferior al 1% se clasifica como territorio urbano. Las condiciones climáticas están gobernadas por la ubicación en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cercanía con el mar Caribe y la advección de humedad del Chorro del Chocó; se registran precipitaciones medias anuales que oscilan entre 2300 mm/año y 5000 mm/año, con una estación húmeda entre abril y noviembre, y una seca entre diciembre y marzo. La temperatura media registrada en gran parte de la cuenca es de 28°C, con un gradiente de 0.57°C cada 100 m y una humedad relativa cercana al 90%. Estas características le confieren una clasificación climática predominantemente templada y cálida superhúmeda (CORPOURABA, 2019; Universidad de Antioquia, 2014).

Según la jerarquía de Strahler (1964) - Horton (1945), esta cuenca es de orden 7, por lo que se considera que es bien drenada, con una densidad de drenaje cercana a 2,6 km/km² y una alta disponibilidad de agua (garantizado por el régimen natural de lluvias). Su patrón de drenaje es dendrítico, con pendientes predominantemente bajas (entre 0% y 7%), por lo que son más importantes las amenazas por inundaciones que por deslizamientos. Hacia la zona de su nacimiento, se tienen pendientes que van incrementando progresivamente su inclinación desde moderadamente inclinadas y hasta fuertemente escarpadas, con valores superiores al 75%; correspondiendo a un

área con cobertura de bosque denso alto, en donde hay una alta amenaza por procesos de deslizamientos, en contraste con la baja probabilidad de eventos de inundación (CORPOURABA, 2019).

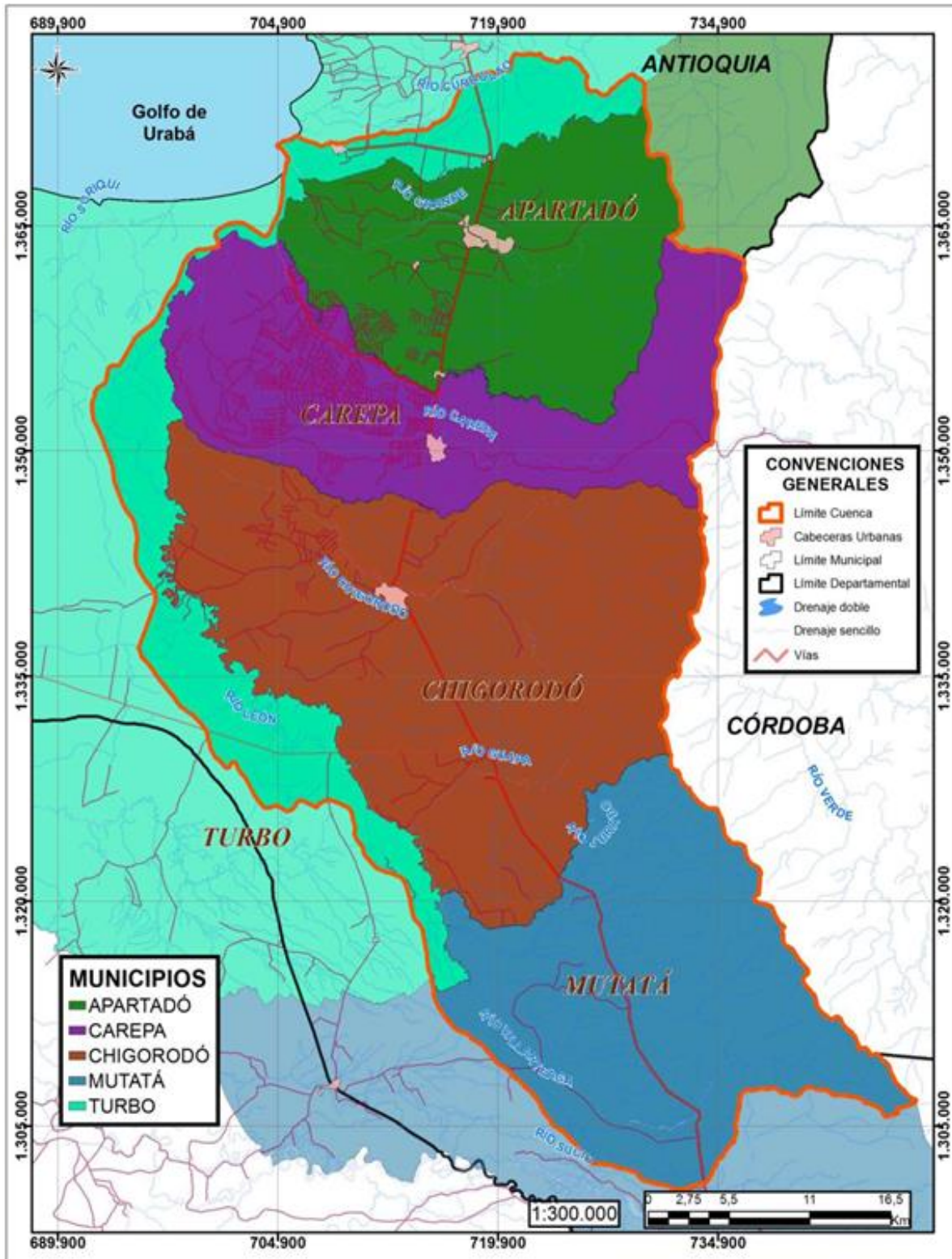


Figura 1. Localización y delimitación de la cuenca del río León (CORPOURABA, 2019).

Asociado a las condiciones climáticas, la cuenca tiene un gran número de ecosistemas, con suelos muy diversos especialmente en las áreas planas, lo que consolida el gran potencial productivo de la región, siendo muy significativas las actividades agrícolas intensivas y semiintensivas, seguidas por las agroforestales y las pastoriles (Arana, 2015). Estas actividades económicas y de producción han modulado los cambios en la distribución y en la densidad de la población, que es cercana a los 445.000 habitantes, y en la que convergen comunidades étnicas, campesinas y urbanas. Otro factor incidente ha sido el conflicto armado vivido en la región, que generó altos índices de desplazamiento forzado, situación que además cobra importancia en la dimensión socio espacial de la cuenca. Como consecuencia de lo anterior, se tiene una gran presión del uso del recurso hídrico en actividades domésticas y agrícolas, como el uso de agroquímicos y los vertimientos de aguas residuales; no obstante, aún se preservan grandes extensiones de bosques nativos, que resultan muy importantes en servicios ecosistémicos, como la productividad de los suelos, aprovisionamiento de recursos, conservación de la biodiversidad, captación de agua y generación de oxígeno (CORPOURABA, 2019).

De otro lado, se tiene el impacto de los proyectos de grandes infraestructuras en el Golfo de Urabá, específicamente de la infraestructura portuaria y de la red vial terrestre proyectada en la cuenca del río León, en la que a mediano plazo se espera la puesta en funcionamiento de un puerto de aguas profundas. Estos proyectos permitirán potencializar la cadena de producción y comercialización de productos agroindustriales y turísticos, al tiempo en que incidirán en las dinámicas socio ambientales de la cuenca, y por tanto, en la planificación y gestión del recurso hídrico.

3.2. Recopilación y análisis de información

Un aspecto clave para la implementación del modelo con la herramienta Hydro-BID es la necesidad de disponer de registros históricos continuos en la cuenca, de variables como la precipitación total diaria, temperatura media diaria y caudales medios diarios, para un periodo de tiempo no inferior a cinco años; estos datos deben ser recopilados, evaluados y corregidos o completados antes de utilizar el modelo. En ese sentido, en la primera fase se solicitó y recopiló la información hidrométrica y climática de la zona de estudio, analizando la documentación disponible en el Instituto

de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM-, y en la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá – CORPOURABA. De esa manera se seleccionaron 9 estaciones activas y con registros continuos en la base de datos del IDEAM, localizadas como se muestra en la Figura 2, y cuya información básica se describen en la Tabla 1.

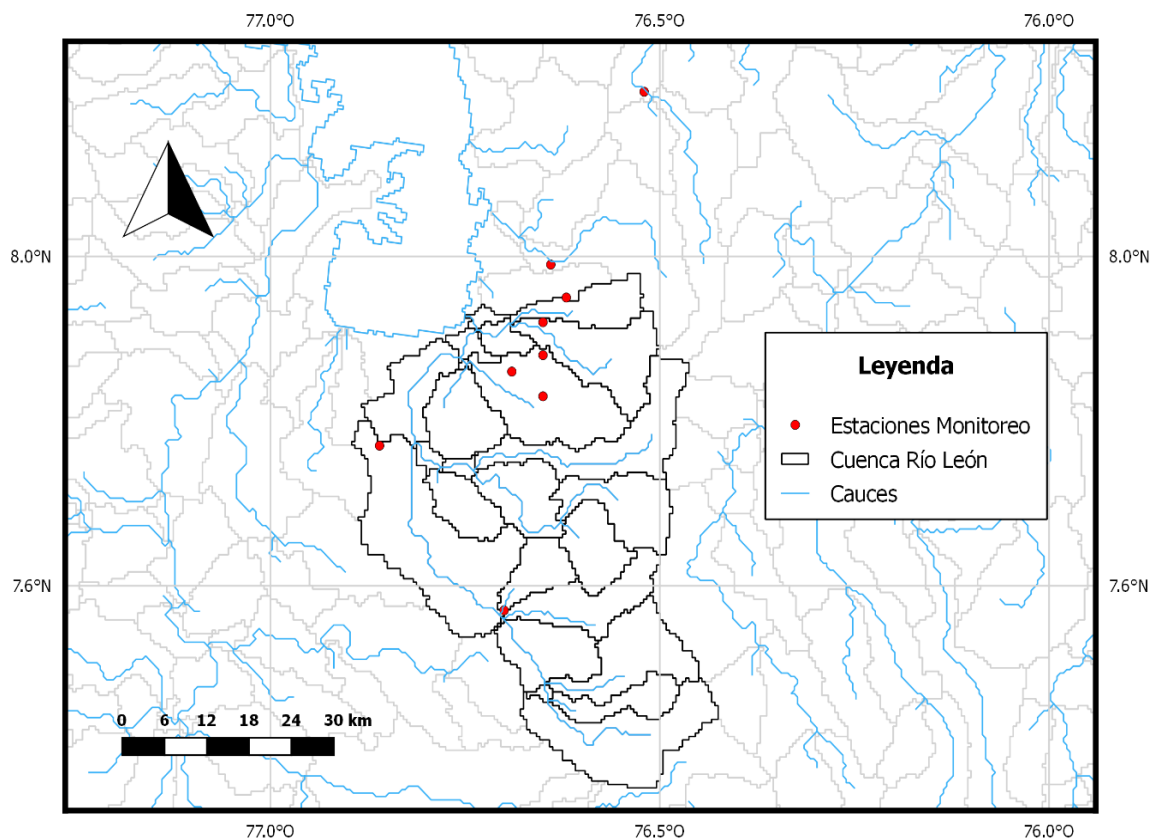


Figura 2. Localización de las estaciones Hidroclimáticas en la cuenca del río León.

Tabla 1. Estaciones Hidroclimáticas seleccionadas para la cuenca del río León.

Código	Nombre	Categoría	Fecha instalación	Altitud (m.s.n.m.)	Latitud	Longitud
12015020	UNIBAN	Agrometeorológica	1977-08-15	43	7,83	-76,65
12010010	Tormento El	Pluviométrica	1972-01-15	20	7,77	-76,86
12010060	Lorena La	Pluviométrica	1976-07-15	10	7,86	-76,69
12010070	Casco El	Pluviométrica	1977-07-15	18	7,88	-76,65
12010120	Santa Martha	Pluviométrica	1977-07-15	130	7,92	-76,65
12010100	EU POL	Pluviométrica	1977-07-15	10	7,95	-76,62
12017020	Barranquillita	Limnimétrica Pluviométrica	1977-03-14	22	7,57	-76,71
12020010	Pueblo Bello	Pluviométrica	1972-04-14	10	8,20	-76,52
12010110	Prado Mar	Pluviométrica	1977-07-15	5	7,99	-76,64

De acuerdo con la información de las estaciones escogidas, se adoptó una serie entre el 01 de enero de 2002 y el 31 de diciembre de 2015, que equivale a 14 años de datos diarios. Este periodo corresponde con el de mayor continuidad en los registros en el conjunto de estaciones, y con un interesante periodo de crecimiento poblacional, y sus consecuentes cambios significativos en la ordenación del territorio de la cuenca (CORPOURABA, 2019). No obstante, en algunas estaciones se tenían datos faltantes, en una proporción inferior al 10% del intervalo de tiempo analizado; en esos casos se completaron los registros con el promedio aritmético simple y con correlaciones entre las estaciones, de tal manera que se favoreciera la homogeneidad y confiabilidad de la serie.

3.3. Parametrización, calibración e implementación del modelo

Inicialmente los datos hidroclimáticos de cada estación se almacenaron en formato CSV, de acuerdo con el formato adecuado para la herramienta Hydro-BID. Posteriormente se agruparon en tres carpetas diferentes, discriminadas como datos de precipitación diaria (cm), de temperatura diaria (°C) y de caudales diarios (m³/s). Además se creó otro archivo CSV con las coordenadas de cada una de las estaciones hidroclimatológicas. Teniendo en cuenta que la configuración de la base de datos LAC-ADH se establece por subcuencas, las cuales se identifican mediante un código único para cada una denominado COMID, se pudo establecer que la cuenca del río León está conformada por 25 subcuencas, siendo el COMID 300545100 el que identifica la de la salida sobre el Golfo de Urabá. Esto es importante porque además se creó un archivo CSV con las coordenadas de los centroides de las 25 subcuencas, obtenidos con el sistema de información geográfica de libre acceso QGIS.

Esta información sistemáticamente organizada es utilizada por Hydro-BID para interpolar los datos a nivel de subcuencas, a través del componente *Climate Data Interpolating Tool*. Una vez que a cada subcuenca se le asocian datos de temperatura y precipitación, se hace la simulación del cálculo del flujo en la cuenca. No obstante, aunque la mayoría de los parámetros requeridos por el modelo están acoplados en la base de datos LAC-ADH, la cual está pre calibrada con valores de otras bases de datos regionales, es necesario calibrar la simulación; esto para que el modelo represente adecuadamente la realidad.

Los parámetros fundamentales que se deben considerar en la calibración son:

- Número de curva (NC): su función es caracterizar el tipo de suelo y representar su hidrología; su valor depende del uso-cubierta y el tipo de clasificación hidrológica del del suelo.
- Contenido disponible de agua (CDA): representa la cantidad de agua que se puede almacenar en el suelo para ser aprovechado por las plantas. Este parámetro puede ser estimado por las características del suelo.
- Coeficiente de recesión de aguas subterráneas (r): controla las tasas de flujo de agua subterránea desde la zona saturada; puede ser estimado a través de técnicas de separación hidrográfica en estaciones de aforo en las cuencas.
- Parámetro de percolación (s): controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas. Como depende de la formación geológica predominante en el sitio, su valor puede ser muy variable.

Hydro-BID permite entonces simular los flujos de corrientes para condiciones históricas, actuales o futuras, a partir de información relacionada con el uso de tierras, precipitación y temperatura. Como salidas típicas del modelo, se tienen las series de tiempo de escorrentía superficial diaria, de flujo de base diario, de flujo total diario, de humedad diaria almacenada en el suelo (valor promedio) y de evaporación diaria. A partir de esas salidas, esta herramienta produce comparaciones gráficas con diferentes escalas temporales, que facilitan el proceso de evaluación de desempeño de la simulación, así como estadísticas que también evalúan el desempeño estacional y general de la misma (Nalesso & Colí, 2017).

Las variables utilizadas para determinar estadísticamente los errores en las modelaciones de Hydro-BID, son el porcentaje de error entre los valores simulados y los observados (su valor óptimo es el cercano al % de error máximo permitido), las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observados y simulados (su valor óptimo es 1), las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observados y simulados, aplicando un factor de relación entre los valores mínimos y máximos (su valor óptimo es 1) y el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe, que analiza la magnitud de la relación entre las varianzas de los flujos simulados y las varianzas de los flujos observados (su valor óptimo es 1).

Es importante precisar que el proceso de calibración se realiza por subcuencas, desde aguas arriba hacia aguas abajo, donde se encuentren estaciones con datos hidrométricos; con esto se busca parametrizar correctamente cada factor, de tal modo que se establezca un equilibrio entre las variables estadísticas y las hidráulicas a partir de un proceso de ensayo y error. Es por esto que si no se cuenta con registros hidrográficos en cada una de las subcuencas, no se obtendrá un ajuste perfecto entre los registros de los caudales simulados en la salida de la cuenca, lo cual no implica que la simulación sea incorrecta. Además, como Hydro-BID no se enfoca en realizar análisis hidrodinámicos, si las curvas de duración de flujo y las estadísticas tienen una buena coincidencia se está haciendo una buena caracterización del volumen de agua que transita por la cuenca, que es el resultado esperado más significativo (Nalesso & Coli, 2017).

Para el caso de la cuenca estudiada y en el periodo de interés, sólo se dispone de información de caudales medios diarios en la estación Barranquillita, localizada en la subcuenca identificada con el COMID 300633100 (Ver Figura 3). Estos caudales fueron comparados con los caudales simulados por Hydro-BID, tras ejecutar la herramienta con diferentes variaciones en los valores de los parámetros fundamentales, de manera iterativa. En este caso, en la primera simulación se utilizaron los valores de estos parámetros que por defecto se recomiendan con la herramienta, teniendo en cuenta además el conocimiento particular que se tiene de la zona de estudio.

De ese modo se establecieron los valores de cada parámetro que produjeran los mínimos volúmenes de error y los valores de los coeficientes de correlación cercanos a 1, así como unas curvas de duración de caudales bien correlacionadas (comparando la curva de los datos modelados y la curva de los datos medidos), lo que equivale a simular los caudales medidos con precisión. Estos fueron los valores utilizados para modelar los volúmenes de flujo y el balance hídrico de la cuenca, y las estimaciones para diferentes escenarios de cambio climático.

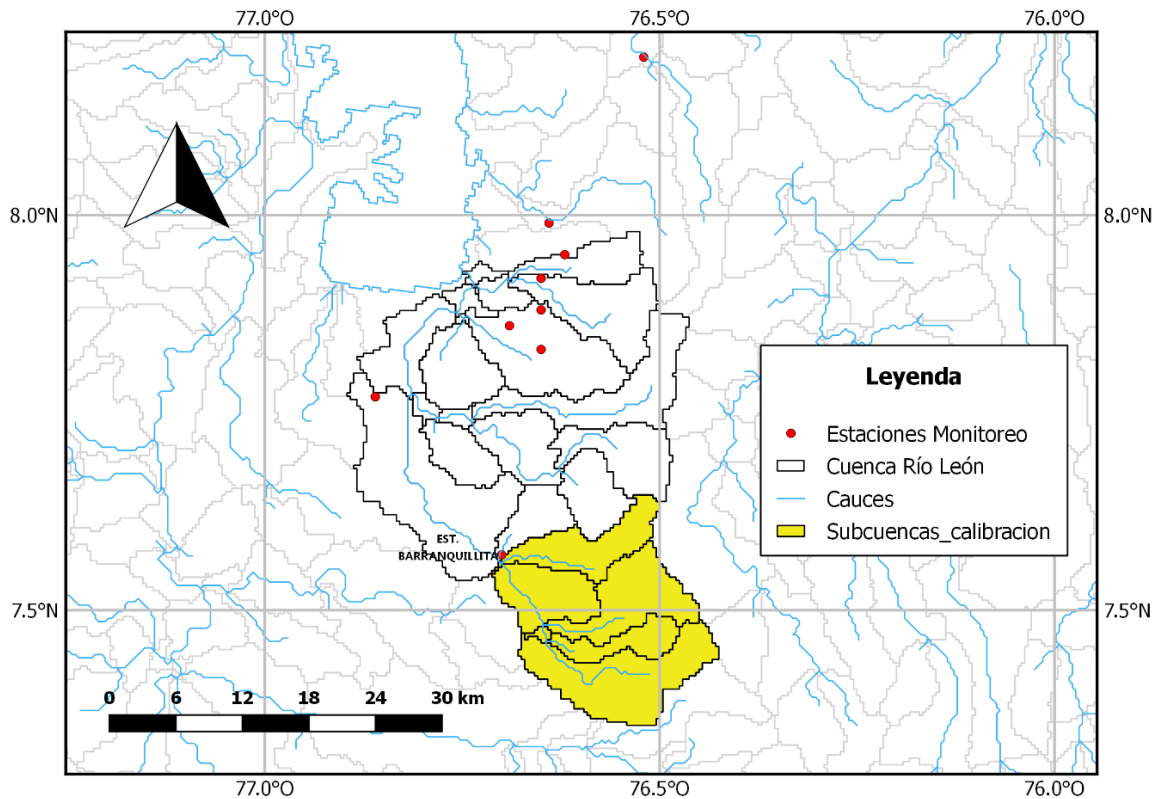


Figura 3. Subcuencas hasta la estación Barranquillita consideradas en la calibración del modelo.

3.4. Escenarios de cambio climático

Las regiones de América central y Sur América poseen ecosistemas únicos, altamente vulnerables a los cambios en las condiciones climáticas; diferentes investigaciones reportan evidencias de incremento en los eventos climáticos extremos como huracanes, sequías y lluvias intensas, que a su vez han generado grandes afectaciones a los sistemas socioeconómicos y a los ecosistemas (IPCC, 2018). En ese contexto, el módulo el módulo “*Climate Scenario*” de Hydro-BID permite evaluar los efectos de cambios naturales o antrópicos sobre la disponibilidad y variabilidad del recurso hídrico, teniendo en cuenta escenarios que pueden implicar cambios climáticos, y cambios de aumentos de demanda y de usos del suelo. Este módulo se puede alimentar con el uso directo de la precipitación y de la temperatura diaria, con el uso de datos de referencia climática con la habilidad de perturbar los datos, o con el uso del incremento o disminución global de la precipitación o de la temperatura por un factor. Esta última opción es la más conveniente para esta investigación, aplicada a la base de datos para todas las cuencas en el dominio del modelo, debido a que no se cuenta con datos climáticos proyectados a futuro.

De manera particular, cuando se consideran escenarios de cambio climático, no se busca predecir el futuro climático, sino evaluar un amplio espectro de posibilidades en el comportamiento del clima futuro, entender las incertidumbres asociadas y orientar las decisiones a la anticipación de posibles hechos, para prevenir alcanzar esa situación desfavorable que se proyecta (IDEAM, 2015). De ese modo, los análisis y resultados que se obtienen pueden convertirse en poderosas herramientas de apoyo a la gestión y a la toma de decisiones, bajo los desafíos impuestos por la complejidad de los procesos y la gran cantidad de incertidumbres.

En el caso Colombiano, los escenarios de cambio climático propuestos por el IPCC indican que el país estaría afectado por el aumento generalizado en la temperatura, aunque el régimen de precipitaciones no sería el mismo para todas las regiones (IPCC, 2018). En el caso específico de la región del Golfo de Urabá, que es en donde se sitúa la cuenca del río León, al comparar el escenario comprendido entre los años 2071-2100 y los registros promedio entre los años 1976 y 2005 (ver Figura 4), se proyecta un aumento de la temperatura media cercano a 2,6°C y 2,7°C; en cuanto a la precipitación, este cambio proyectado muestra un porcentaje en exceso entre el 10% y el 20% (IDEAM, 2015).

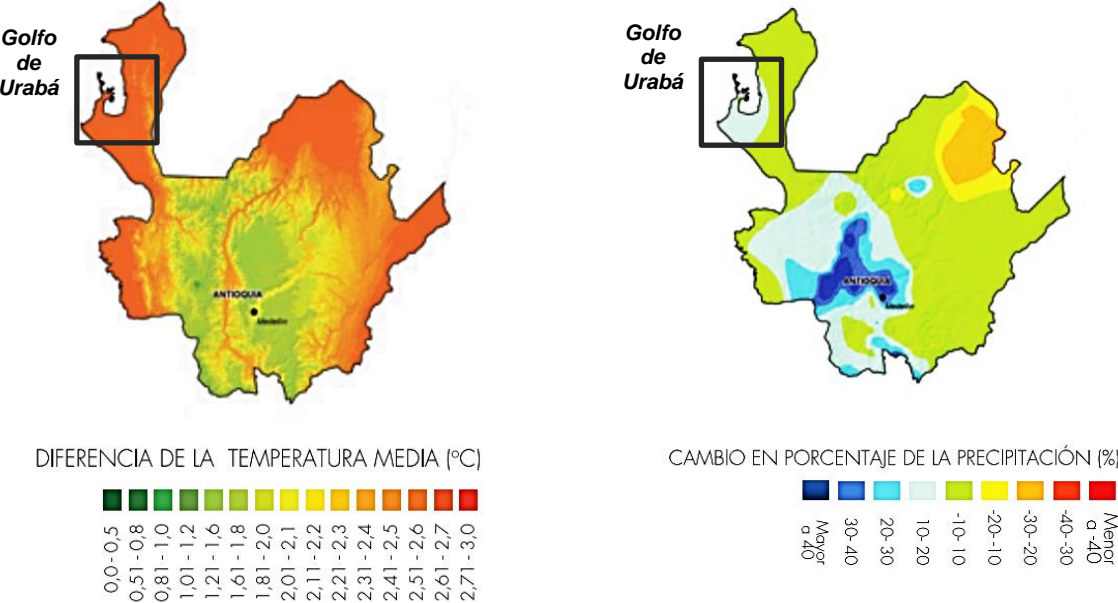


Figura 4. Diferencia de Temperatura (°C) y Precipitación (%) entre el escenario 2071-2100 y el escenario de referencia 1976-2005, para el departamento de Antioquia. Adaptado de IDEAM (2015).

Es por esto que en este trabajo resulta importante realizar proyecciones bajo los anteriores escenarios, de tal manera que se pueda analizar el efecto de las modificaciones en las condiciones ambientales en el espacio y en el tiempo, así como la frecuencia e intensidad de los procesos meteorológicos y climáticos. Este análisis de vulnerabilidad, que se sustenta en hipótesis veraces y científicamente soportadas, ayuda a aumentar el nivel de comprensión y planificación del territorio, disminuyendo los riesgos y aumentando además la capacidad adaptativa de la región.

En ese sentido, partiendo de las proyecciones para la zona de interés, en el modelo implementado se considera un incremento o disminución de la precipitación mediante un valor en porcentaje, adoptándose una variación de $\pm 20\%$, que corresponde a las situaciones más críticas que podrían presentarse. En cuanto a la temperatura, se considera un incremento de $2,7^{\circ}\text{C}$, consistente con los cambios de temperatura media estimados en la zona, si se continúa con la tenencia de la tasa actual. En la Tabla 2 se resumen las alteraciones en la temperatura y la precipitación para cada escenario, a la luz de las proyecciones regionales de la evolución del clima en el siglo XXI.

Tabla 2. Escenarios de cambio climático analizados en la cuenca del río León.

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2
Temperatura	Aumento de $2,7^{\circ}\text{C}$	Aumento de $2,7^{\circ}\text{C}$
Precipitación	Aumento del 20 %	Disminución del 20%

4. RESULTADOS

Los primeros resultados analizados se relacionan con la calibración de la modelo, realizada a partir de la información limnimétrica de la estación Barranquillita. Inicialmente se obtuvieron los valores de los parámetros que dieron un mejor ajuste al comparar los caudales medidos con los simulados; estos resultados de la optimización del modelo se presentan en la Tabla 3, en la que se puede observar que el valor estimado para el número de curva está por debajo del rango normalmente establecido, así como el del contenido disponible de agua, siendo este último un valor muy pequeño. En cuanto al coeficiente de recesión y el parámetro de percolación, ambos se encuentran en rangos de variaciones típicos reportados en la literatura.

Tabla 3. Parámetros establecidos en la calibración del Modelo. Adaptado de Mamaní (2018).

	Parámetro	Rango	Valor
NC	Número de curva	0,7 - 1,2	0,5
CDA	Contenido disponible de agua	0,5 - 1,2	0,001
r	Coefficiente de recesión	0,0 - 0,5	0,07
s	Parámetro de percolación	0,0 – 0,1	0,0005

Otro aspecto importante que se analizó al realizar las iteraciones necesarias para la calibración, fue la verificación del desempeño del modelo, entendido en términos de los volúmenes de error y de los valores de los coeficientes de correlación, resumidos en la Tabla 4. En el caso simulado el volumen de error es más bajo que los límites admisibles, las correlaciones se llevaron a los valores más cercanos a 1 posibles, y el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe está en un rango válido acorde con un buen ajuste entre los valores modelados y los observados (Molnar, 2011).

Tabla 4. Parámetros establecidos en la calibración del Modelo. Adaptado de Leveri & Pascual (2020)

Parámetro Estadístico	Valor adecuado	Valor obtenido
Volumen de Error	-+/(20-30 ó 30-40)	-12,67
Numero de Correlación (r)	Lo más cercano a 1 posible	0,71
Correlación del Modelo (<i>R_{mod}</i>)	Lo más cercano a 1 posible	0,60
Eficiencia Nash-Sutcliffe R^2	Cercano a 0,40 ó 0,6	0,43

Además se validó el grado de ajuste de los caudales simulados al compararse con los caudales medidos, mediante las gráficas de la curva de duración y de la serie de tiempo de dichos caudales. En la Figura 5 se presenta el hidrograma visualizado en una escala mensual. Al cotejar la precipitación con los caudales medidos y simulados; se observa que éstas variables están directamente relacionadas, aunque se tienen algunos picos en los que el caudal simulado es notablemente inferior al caudal medido, es decir, que el modelo no representa adecuadamente los flujos muy altos.

En la Figura 6 se muestra la curva de duración de flujo, en la que se relaciona el porcentaje de tiempo que un caudal determinado sea igualado o excedido a lo largo del periodo analizado; esta información resulta muy útil para evaluar el desempeño del modelo durante el proceso de calibración. En el caso analizado, el modelo está subestimando las probabilidades de ocurrencia de los mayores caudales, aunque se

tiene una zona en la que ocurre todo lo contrario, indicando que el modelo sobreestima la probabilidad de igualar o superar un caudal dado. Estos resultados coinciden con las observaciones analizadas a partir del hidrograma, en el que hay algunos picos que no están bien representados por la simulación.

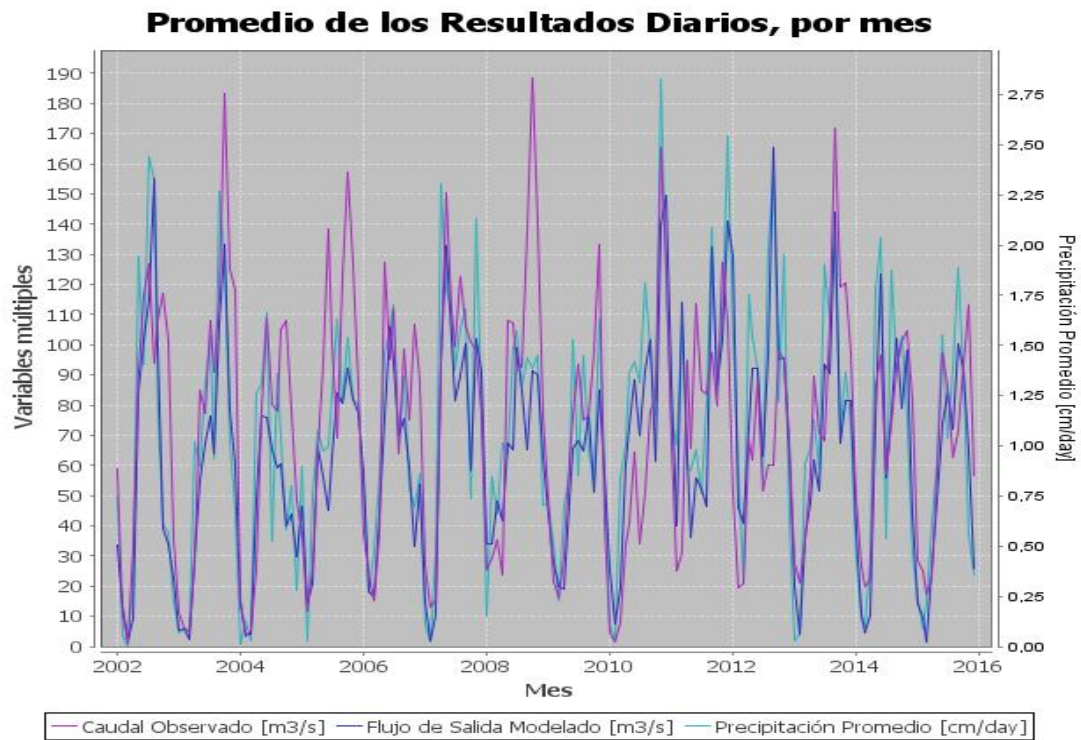


Figura 5. Series de tiempo para los Caudales Observados y los Caudales Modelados en la calibración (subcuencas hasta la estación Barranquillita).

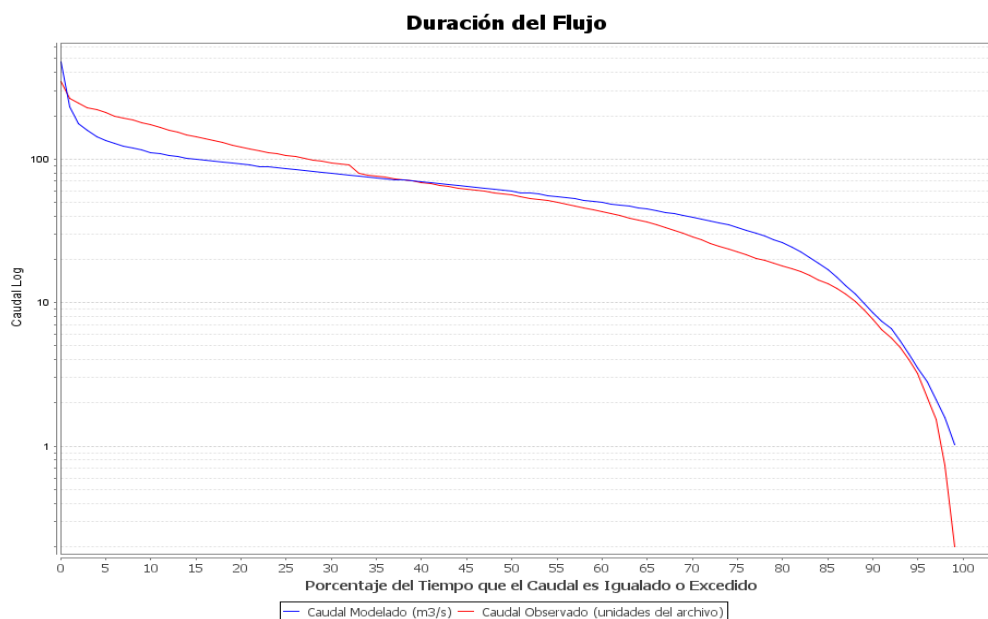


Figura 6. Curva de duración para los Caudales Observados y los Caudales Modelados en la calibración (subcuencas hasta la estación Barranquillita).

También se obtuvo el diagrama de dispersión resultante de la modelación. Esta gráfica, que corresponde a la Figura 7, permite visualizar la correlación al comparar los caudales simulados con los caudales observados, y estimar la exactitud de los resultados. Si bien hay una concentración importante de puntos alrededor de la línea de regresión creciente, lo que indica que hay una buena correlación y que ésta es positiva, se aprecian muchos puntos por fuera de la nube de puntos de la tendencia, especialmente para los valores en los que la simulación sobreestima los caudales.

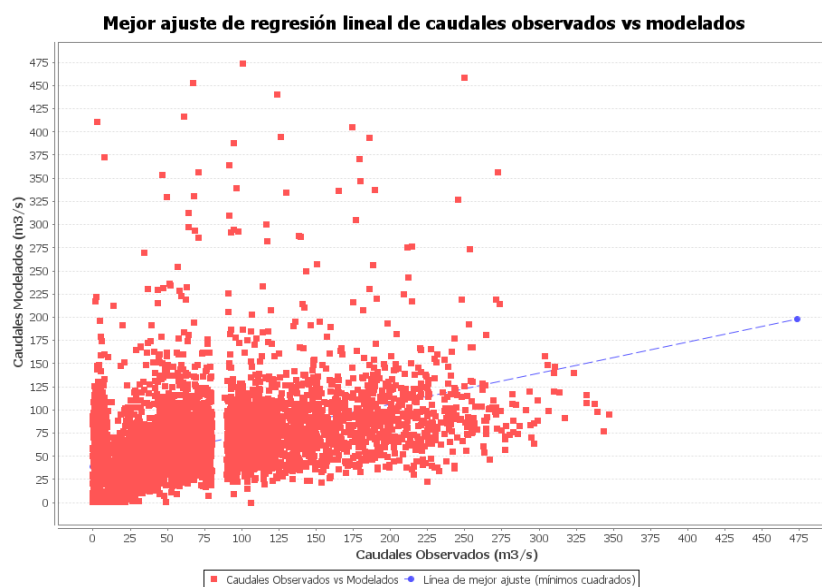


Figura 7. Correlación lineal entre los Caudales Observados y los Caudales Modelados en la calibración (subcuencas hasta la estación Barranquillita).

Finalmente se obtuvieron los resultados del balance hídrico, entendido como los valores anuales para todas las variables estimadas por el modelo. En la Tabla 5 y en la Figura 8 se proporciona el resumen del balance hasta la estación Barranquillita. La precipitación promedio para el período simulado es de 649 m³/año, mientras que la evapotranspiración promedio es de 93 m³/año y la escorrentía de 41 m³/año. En promedio, el flujo total es de 5,5 millones de metros cúbicos por año; se observa además que el año con menor precipitación acumulada es el 2004, en contraste con los registros del año 2012, que los superan en más del 80%, siendo el año más lluvioso de los analizados.

La Figura 9 muestra las series temporales para algunas de las anteriores variables, percibiéndose la correspondencia entre las variaciones de la precipitación, escorrentía, percolación profunda y evapotranspiración, aunque sin un total ajuste.

Tabla 5. Balance Hídrico para las subcuencas hasta la estación Barranquillita.

Modelo calibrado.

Rango de datos	Precipitación	Evapotranspiración	Escoorrentía	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total (Mm ³)	Contribución Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2002	603,79	83,78	27,32	486,18	5,14	0,00	3,23	5,43E-09
2003	602,63	95,48	36,34	459,65	4,96	0,00	3,05	1,34E-08
2004	452,00	81,01	11,48	364,42	3,76	0,00	2,42	-1,21E-08
2005	648,83	104,67	23,01	503,92	5,27	0,00	3,35	2,30E-08
2006	594,31	91,80	32,85	475,87	5,09	0,00	3,16	-1,55E-08
2007	759,87	103,92	63,37	572,74	6,36	0,00	3,80	2,65E-08
2008	651,02	93,68	25,82	540,03	5,66	0,00	3,59	-2,00E-08
2009	559,97	96,15	18,34	434,26	4,53	0,00	2,88	1,38E-08
2010	764,86	110,40	60,04	581,62	6,42	0,00	3,86	1,48E-08
2011	804,55	96,64	84,68	607,42	6,92	0,00	4,04	1,95E-08
2012	828,75	92,24	80,70	677,23	7,58	0,00	4,50	-4,29E-08
2013	661,08	94,66	36,57	527,58	5,64	0,00	3,50	-2,04E-09
2014	601,34	88,07	42,22	476,34	5,19	0,00	3,16	-1,40E-08
2015	516,94	70,86	35,41	408,34	4,44	0,00	2,71	-6,33E-10

Nota: Unidades generales en m³

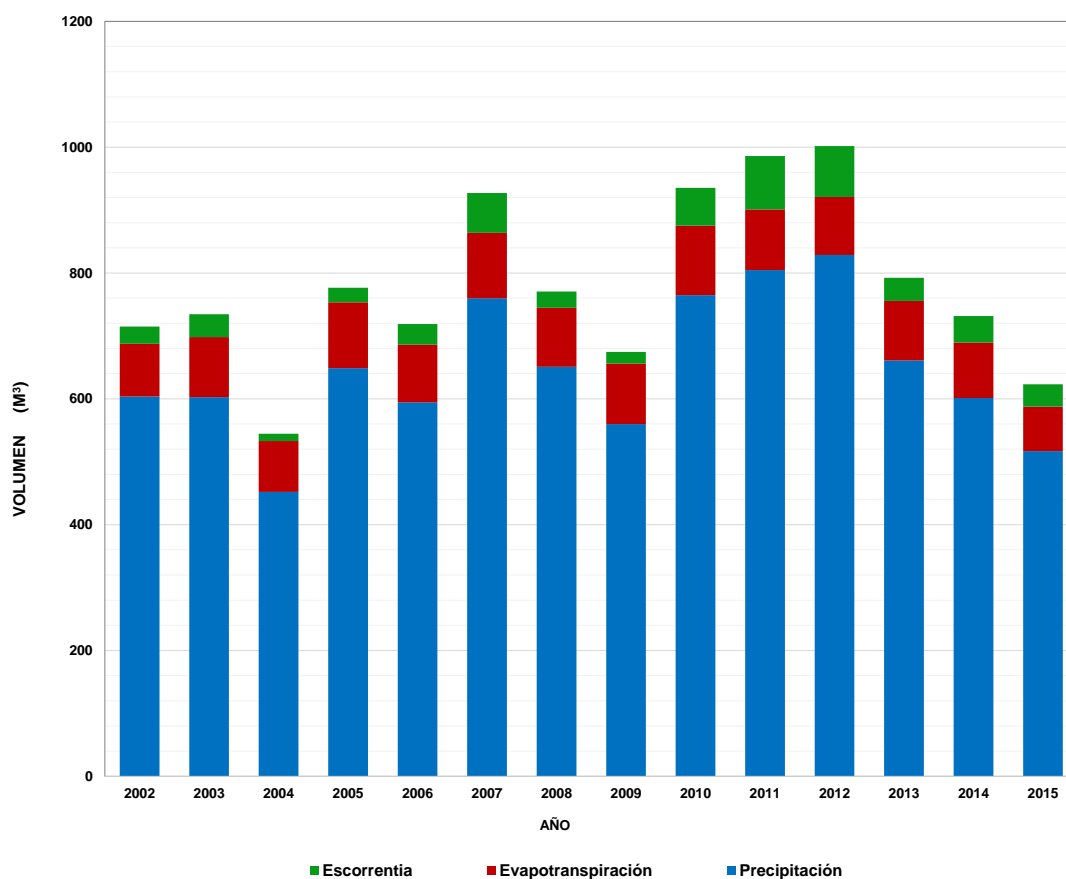


Figura 8. Balance Hídrico para las subcuencas hasta la estación Barranquillita.

Modelo calibrado.

Promedio de los Resultados Diarios, por mes

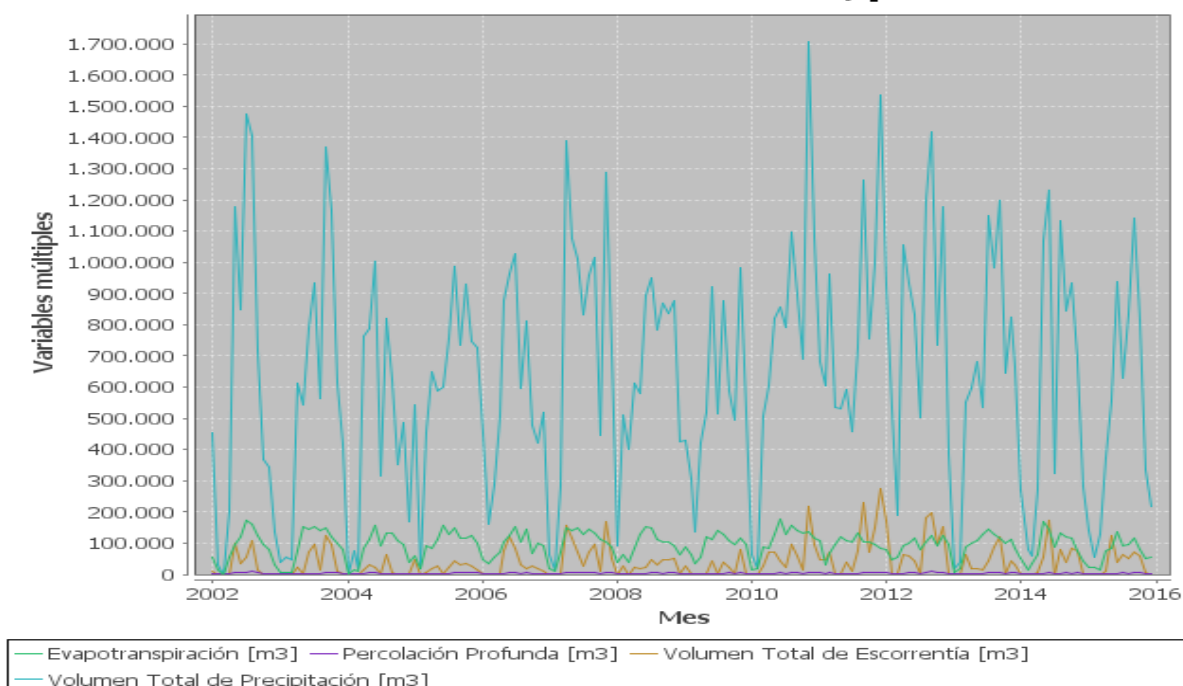


Figura 9. Series temporales del Balance Hídrico para las subcuencas hasta la estación Barranquillita. Modelo calibrado.

Una vez concluido el proceso de calibración, con el que se trata de garantizar que el modelo represente lo más correctamente posible los datos medidos, se implementó una simulación del balance hídrico de toda la cuenca en el escenario actual (escenario base) y en escenarios de cambio climático. Es importante mencionar que no se realizó una validación del modelo calibrado, debido a que en la información recopilada no se dispone de datos históricos de otras estaciones hidrométricas; no obstante, la validez de estos análisis se sustenta en el hecho de que las curvas de duración de caudales y los parámetros estadísticos obtenidos tienen un buen ajuste, lo que coincide con el propósito fundamental de la herramienta Hydro-BID.

De ese modo, en la Tabla 6 y en la Figura 10 se presentan los resultados en el escenario base para la cuenca del río León, a su descarga en el mar Caribe sobre el Golfo de Urabá. Se observa que en este caso también hay una correlación entre la precipitación y las demás variables del balance. El volumen promedio de precipitación en la cuenca del río León es cercano a los 2065 m³/año, mientras que para la evapotranspiración y para la escorrentía es de 392 m³/año y 97 m³/año, respectivamente. Además, el volumen promedio del flujo total es cercano a 16 millones de metros cúbicos por año.

Tabla 6. Balance Hídrico de la Cuenca del río León.

Rango de datos	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total (Mm ³)	Contribución Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2002	1875,49	368,35	61,18	1357,85	14,19	0,00	52,14	1,62E-08
2003	2013,73	377,45	90,28	1446,96	15,37	0,00	60,47	1,77E-08
2004	1621,04	343,05	61,41	1200,61	12,62	0,00	52,44	-1,68E-08
2005	2159,79	412,24	96,67	1544,27	16,41	0,00	64,32	1,94E-08
2006	1981,73	398,37	86,15	1462,32	15,48	0,00	59,67	-1,14E-08
2007	2376,54	406,71	145,35	1703,04	18,48	0,00	66,23	2,54E-08
2008	2072,75	401,52	64,02	1592,15	16,56	0,00	62,49	-2,18E-08
2009	1948,80	411,95	53,86	1398,93	14,53	0,00	60,55	1,08E-08
2010	2367,56	429,95	146,40	1667,31	18,14	0,00	63,47	2,78E-08
2011	2392,59	419,94	139,60	1766,46	19,06	0,00	66,42	8,13E-11
2012	2371,47	403,62	137,56	1838,83	19,76	0,00	63,72	-3,32E-08
2013	2104,26	398,89	94,35	1543,56	16,38	0,00	60,19	3,34E-09
2014	1890,81	373,72	97,81	1404,39	15,02	0,00	54,67	-1,83E-08
2015	1729,83	353,05	81,17	1243,51	13,25	0,00	51,57	2,45E-10

Nota: Unidades generales en m³

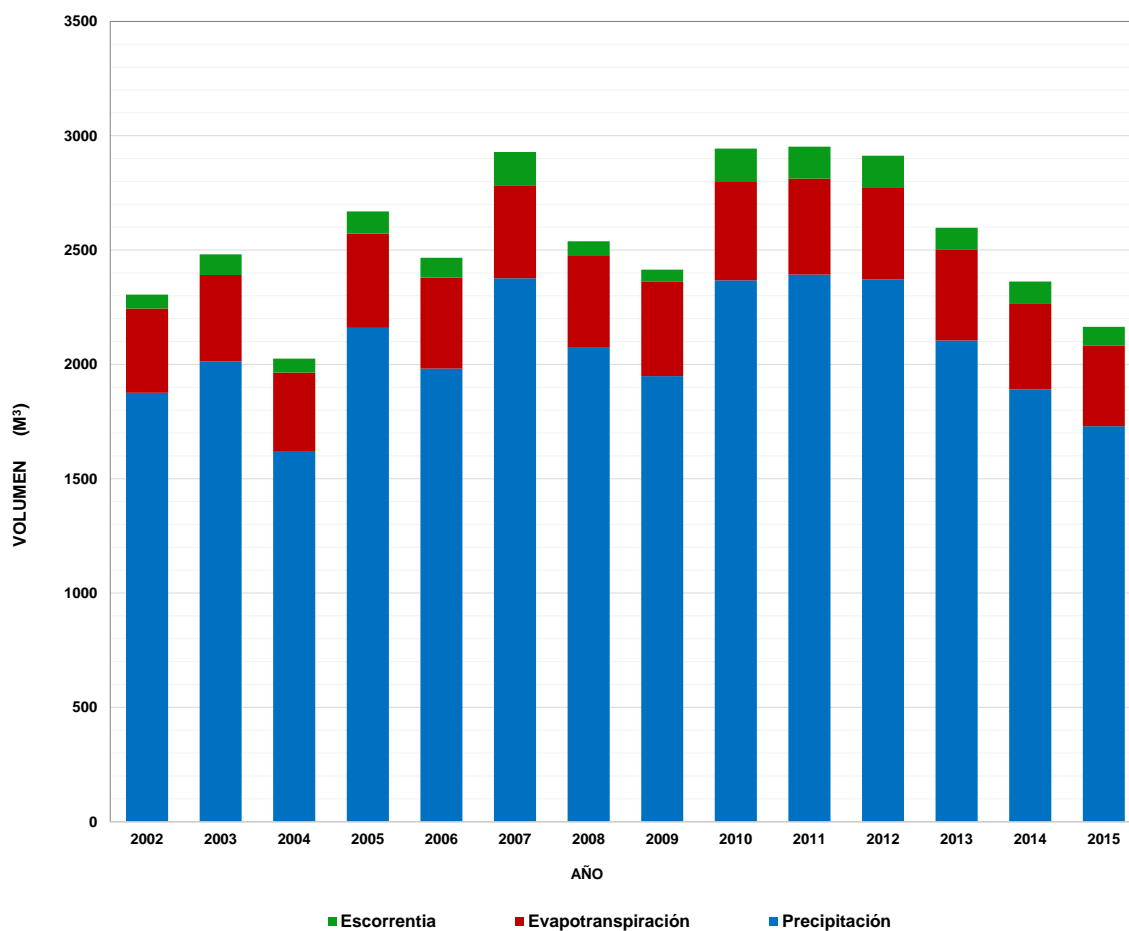


Figura 10. Balance Hídrico de la Cuenca del río León.

En cuanto a las proyecciones de cambio climático descritas en la metodología, Hydro-BID simula el efecto en los caudales diarios debido a la variabilidad climática considerada. Los análisis de sensibilidad de los impactos a nivel de cuenca se presentan para cada uno de los dos escenarios configurados.

En la Tabla 7 y en la Figura 11 se resumen los resultados para el balance hídrico con los supuestos diseñados en el *Escenario 1*. En este caso, el volumen promedio de precipitación en la cuenca cercano a los 2478 m³/año, mientras que para la evapotranspiración y para la escorrentía es de 455 m³/año y 167 m³/año, respectivamente. El volumen promedio del flujo total para el período analizado es de aproximadamente 19 millones de metros cúbicos por año.

En contraste, los resultados para el balance hídrico con los supuestos diseñados en el *Escenario 2* se presentan en la Tabla 8 y en la Figura 12. Se observa un volumen promedio de precipitación en la cuenca cercano a los 1652 m³/año, mientras que para la evapotranspiración y para la escorrentía es de 432 m³/año y 46 m³/año, respectivamente. Así mismo, el volumen promedio del flujo total para el período analizado es de aproximadamente 12 millones de metros cúbicos por año.

Al comparar el volumen de flujo total en el escenario base y en los dos escenarios de cambio climático planteados, se obtienen las curvas mostradas en la Figura 13. La simulación estima trayectorias similares en estas curvas, aunque con unos marcados desfases entre sí. Comparando con el volumen de flujo total del escenario base, en el *Escenario 1* se tiene un aumento aproximado de 19%, mientras que en el *Escenario 2* hay una reducción cercana al 25%.

Con las perturbaciones en los valores de temperatura y precipitación simulados en cada escenario, en ambos casos se evidencia un aumento de la evapotranspiración, siendo mayor en el *Escenario 1* (con un 16% y 10%, respectivamente), lo que es consistente con el aumento de temperatura proyectado. De manera similar, en la escorrentía superficial se tiene un aumento cercano al 72% para el Escenario 1, mientras que en el Escenario 2 hay una disminución aproximada de 53%.

Tabla 7. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el *Escenario 1* de cambio climático

Rango de datos	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total (Mm ³)	Contribución Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2002	2250,59	425,10	112,05	1611,72	17,24	0,00	61,66	1,80E-08
2003	2416,47	436,33	157,88	1705,05	18,63	0,00	70,89	2,13E-08
2004	1945,25	396,94	110,88	1419,41	15,30	0,00	61,52	-2,00E-08
2005	2591,74	477,50	163,82	1824,46	19,88	0,00	75,40	2,32E-08
2006	2378,08	462,86	149,60	1725,21	18,75	0,00	70,09	-1,36E-08
2007	2851,85	470,64	248,12	1991,66	22,40	0,00	77,12	2,95E-08
2008	2487,30	466,61	119,46	1882,39	20,02	0,00	73,62	-2,52E-08
2009	2338,56	478,62	104,77	1655,49	17,60	0,00	71,45	1,30E-08
2010	2841,08	498,10	245,33	1955,15	22,00	0,00	74,30	3,13E-08
2011	2871,11	488,05	232,26	2073,57	23,06	0,00	78,04	-3,73E-10
2012	2845,76	467,46	230,10	2154,87	23,85	0,00	74,98	-3,75E-08
2013	2525,11	461,14	163,44	1821,65	19,85	0,00	70,76	3,73E-09
2014	2268,97	431,81	168,07	1652,45	18,21	0,00	64,00	-2,18E-08
2015	2075,80	408,00	137,60	1468,44	16,06	0,00	60,77	4,57E-10

Nota: Unidades generales en m³

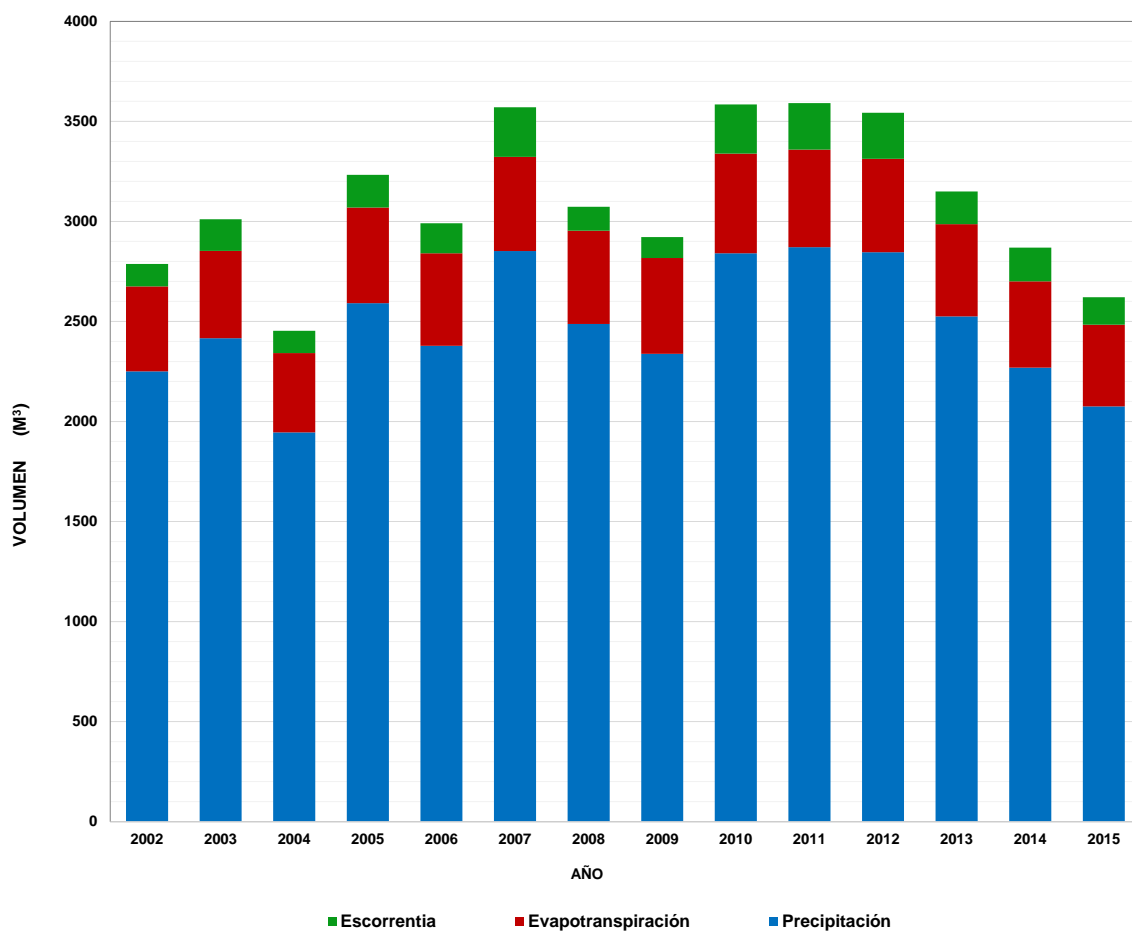


Figura 11. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el *Escenario 1* de cambio climático

Tabla 8. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el *Escenario 2* de cambio climático

Rango de datos	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total (Mm ³)	Contribución Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2002	1500,39	406,32	26,48	1002,33	10,29	0,00	38,97	1,19E-08
2003	1610,98	412,11	42,01	1080,68	11,23	0,00	46,07	1,38E-08
2004	1296,84	376,54	28,30	881,33	9,10	0,00	39,92	-1,34E-08
2005	1727,83	451,80	47,71	1145,49	11,93	0,00	49,14	1,55E-08
2006	1585,39	441,14	37,95	1081,15	11,19	0,00	45,18	-9,20E-09
2007	1901,23	445,07	69,80	1290,87	13,61	0,00	50,92	2,05E-08
2008	1658,20	446,16	26,60	1176,13	12,03	0,00	47,17	-1,74E-08
2009	1559,04	454,41	22,69	1017,98	10,41	0,00	45,43	8,51E-09
2010	1894,05	468,57	72,24	1254,19	13,26	0,00	48,32	2,33E-08
2011	1914,07	466,03	71,21	1324,93	13,96	0,00	50,22	7,77E-10
2012	1897,17	448,62	68,29	1393,43	14,62	0,00	48,43	-2,83E-08
2013	1683,41	438,94	43,93	1148,88	11,93	0,00	45,59	2,79E-09
2014	1512,65	410,51	49,09	1042,69	10,92	0,00	41,39	-1,43E-08
2015	1383,87	383,18	41,30	922,52	9,64	0,00	38,88	-9,25E-10

Nota: Unidades generales en m³

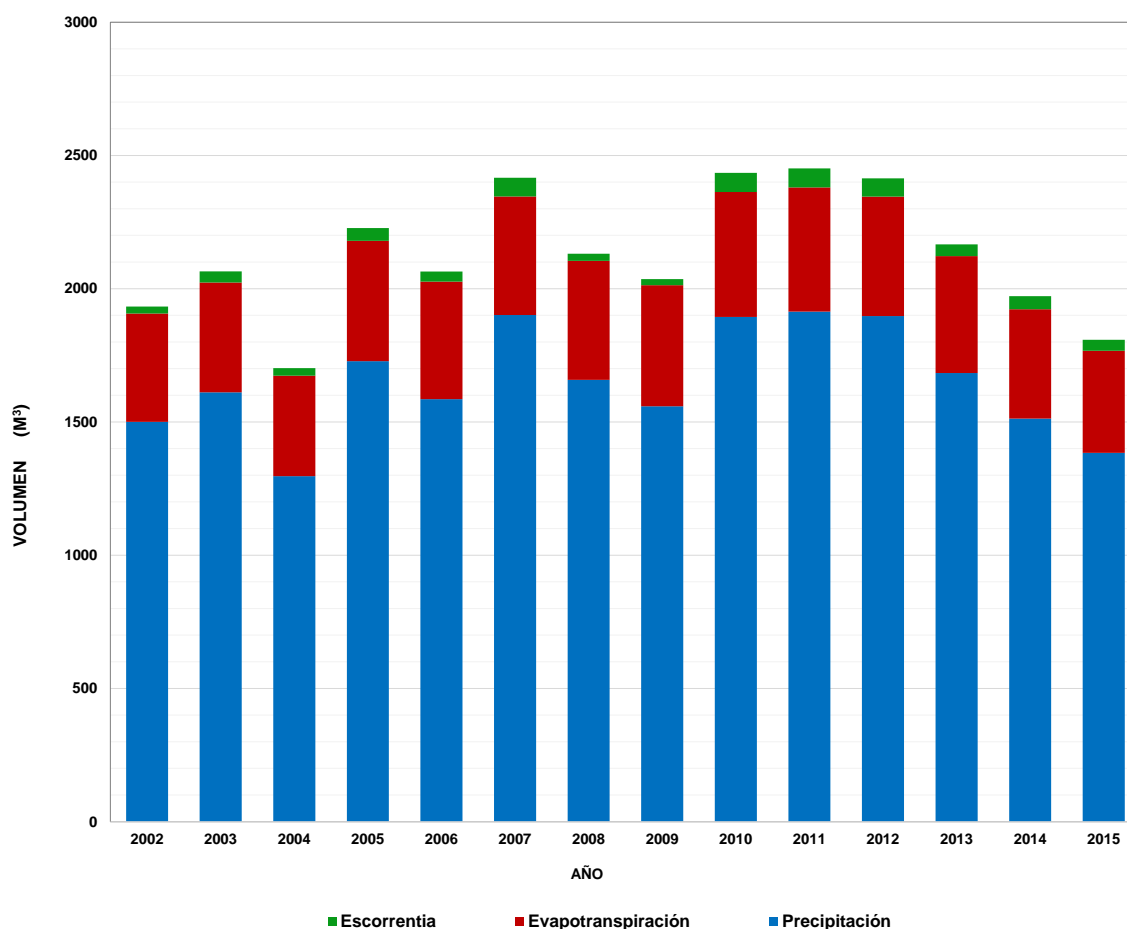


Figura 12. Balance Hídrico de la Cuenca del río León bajo el *Escenario 2* de cambio climático

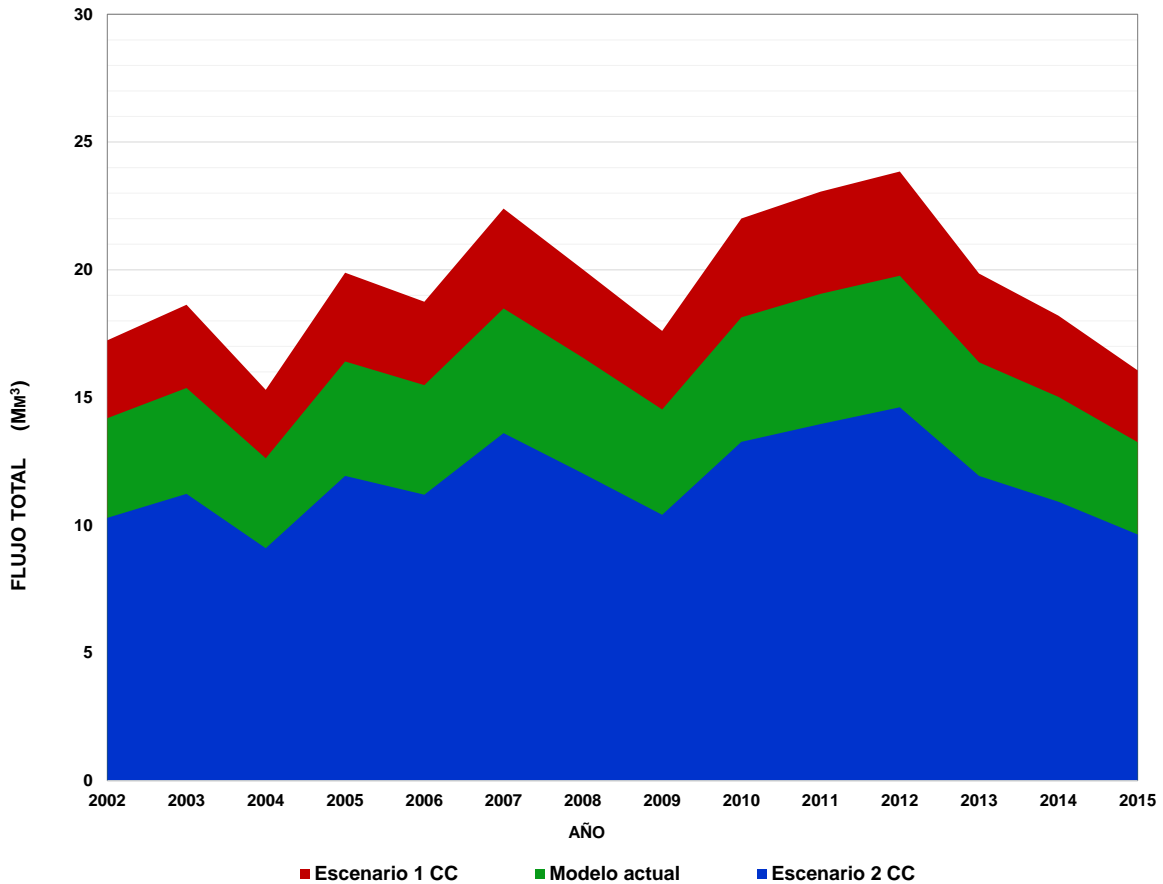


Figura 13. Volumen de flujo total en la cuenca del río León bajo diferentes escenarios de análisis

5. DISCUSIÓN

Como parte de la caracterización hidrológica de la cuenca del río León a través de la herramienta Hydro-BID, en esta sección se analizan las implicaciones de los resultados. a la luz de lo reportado en la literatura y de las condiciones y conocimientos que se tienen de la cuenca.

Confrontando los parámetros obtenidos con la calibración y que se resumen en la Tabla 3, se observan peculiaridades con los valores para el Número de Curva ($NC=0,5$) y el Contenido Disponible de Agua ($CDA=0,001$), ya que los valores calibrados están por fuera del rango recomendado por Mamaní (2018). Si bien el valor de NC no se ajusta a la escala descrita, sí es consistente con el rango recomendado en la *Tabla de Consulta del Número de Curva* en la que se basa Hydro-BID (Moreda et al, 2016). En esta tabla se involucran las características de uso y tipo de suelo que predominan en las subcuencas utilizadas para la calibración, estableciéndose un

rango entre 0,36 y 0,60 para zonas con bosque denso alto y con suelos de grano fino a muy grueso, que son las condiciones que prevalecen en las subcuencas hasta la estación Barranquillita, las cuales conforman la parte alta de la cuenca del río León (CORPOURABÁ, 2019). Respecto al valor del *CDA*, que es el parámetro que activa el inicio de la percolación, un valor menor que 0,1 corresponde a texturas de suelo predominantemente arenosas, en las que la capacidad de almacenamiento es baja (USDA, 1998), las cuales también se pueden encontrar en la zona estudiada.

Al analizar las curvas resultantes del proceso de calibración (Figura 5 y Figura 6), se puede validar la similitud entre la serie de los datos medidos en la estación Barranquillita y los simulados con Hydro-BID. Esto aumenta la confiabilidad del proceso, y de manera consecuente, la de las estimaciones realizadas para toda la cuenca. Del balance hídrico obtenido se destaca además la correlación directa entre las variaciones en la precipitación y las del flujo total, así como la incidencia de la precipitación en otras de las variables, como la escorrentía, percolación profunda y evapotranspiración.

Por otro lado, con los datos consignados en la Tabla 4, se puede establecer que el desempeño del modelo es aceptable para los propósitos de este trabajo, ya que los volúmenes de error y de coeficientes de correlación se encuentran dentro de los límites admisibles, mostrando un buen ajuste entre los valores modelados y los observados. No obstante, algunos de los picos históricos en los caudales observados no son bien representados por la simulación, pudiéndose a tribuir al hecho de que las subcuencas analizadas tiene un potencial de torrencialidad muy alto, relacionado con las intensas precipitaciones que logran presentarse en la zona, como resultado de los vientos provenientes del Pacífico, así como con la cobertura vegetal, tipo de suelo y morfología característica del terreno (CORPOURABA, 2019).

En el escenario base de la cuenca del río León, entendido como la situación actual, se sigue manteniendo la correlación entre la precipitación y los demás parámetros del balance hídrico. De ese modo, el rendimiento medio de la cuenca es de 85 l/s/km², que es un valor muy cercano a los 83 l/s/km² reportados por el IDEAM (2001) y Duque & Posada (2011). Esta validación también sugiere que la simulación implementada con Hydro-BID es una buena representación del contexto hídrico de la cuenca. Si

además se tiene en cuenta que el rendimiento medio para Colombia es de 56,2 l/s/km², para Latinoamérica es de 21 l/s/km² y a nivel mundial es de 10 l/s/km² (IDEAM, 2019), se puede establecer que la cuenca del río León tiene altos excedentes de agua, sustentados en el régimen natural de lluvias, coincidiendo con lo establecido por CORPOURABA (2019).

Al evaluar los resultados bajo supuestos escenarios de cambio climático, se hace evidente la relación entre la precipitación y los demás parámetros del balance hídrico. El rendimiento hídrico medio en el *Escenario 1*, que se configuró a partir de un incremento en la precipitación y en la temperatura, es cercano a 103 l/s/km². En contraste, en el *Escenario 2*, configurado con el mismo incremento en la temperatura y una reducción proporcional en la precipitación, éste disminuye a 62 l/s/km². Este comportamiento permite interpretar que la precipitación es el factor modulador de los cambios en el recurso, a pesar de los eventuales incrementos en la temperatura. Si bien en el peor de los escenarios hay una reducción cercana al 27%, la producción de agua en la cuenca sigue siendo alta, comparada con el promedio nacional.

Un aspecto importante a resaltar, evidenciado en las tendencias de la Figura 10, la Figura 11 y la Figura 12, que muestran la variación en los volúmenes de escorrentía, evaporación y precipitación en el escenario base y en los dos escenarios de cambio climático, es la notoria tendencia decreciente de los volúmenes de precipitación desde el año 2012. Pese a que la serie de tiempo considerada no permite corroborar esta tendencia (sólo hay datos disponibles hasta el 2015), los descensos son prolongados. Esto constituye un aspecto que podría aumentar el grado de vulnerabilidad de la disponibilidad del recurso, más aún si la precipitación es el factor modulador de los cambios en la oferta hídrica. Por la vocación agrícola y ganadera de la región, este aspecto cobra relevancia en la planeación y gestión hídrica de la cuenca del río León.

Si además se observa la Figura 13, en la que se compara el volumen de flujo total a la salida de la cuenca, en el escenario base y los dos escenarios de cambio climático, no sólo se percibe la tendencia decreciente de los flujos; también se aprecia con claridad el efecto del fenómeno de *El Niño* del fenómeno ENSO en la región. Entre los años 2004 y 2005, 2006 y 2007, 2009 y 2010, y 2014 a 2016, se tienen registros de ocurrencia del fenómeno (IDEAM, 2018); a su vez, estos son periodos que concuerdan

con los picos mínimos de flujo que se presentan en el histograma. De manera particular, los dos últimos periodos de ocurrencia de *El Niño* han coincidido con eventos de sequía nacional, situación que no siempre sucede (IDEAM, 2018); en el histograma estos son los descensos más pronunciados en el volumen total del flujo en la cuenca. Estos resultados corroboran la fuerte dependencia y grado de afectación del fenómeno climático ENSO en Colombia, puntualmente en las regiones Caribe y Andina del país, haciendo que el nivel de los ríos disminuya considerablemente, tal como en la cuenca estudiada.

Otro aspecto a tener en cuenta es la consecuente vulnerabilidad a eventos de inundación que podrían presentarse en la parte baja de la cuenca, como resultado de los cambios en el régimen de precipitación y en la hidrodinámica del cauce. Si bien este estudio no se enfocó en el análisis de este tipo de amenazas, en la zona se reportan comportamientos persistentes y cíclicos de este tipo de eventos, representados en un 52% del área bajo condiciones de amenaza alta (CORPOURABA, 2019).

Bajo este panorama, se resalta la gestión del agua que se está haciendo en la cuenca, a través del *Consejo de Cuenca* del río León en el *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica* (POMCA), integrado por los actores que viven y desarrollan actividades en ella. Este plan que ya se está adoptando, busca fortalecer el uso coordinado del suelo, aguas, flora, fauna, y el manejo de las intervenciones antrópicas de tal modo que se establezca el equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de los recursos, y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca, especialmente del recurso hídrico (CORPOURABA, 2019; COLOMBIA, 2012).

6. CONCLUSIONES

En la actualidad el cambio climático se ha configurado como uno de los mayores desafíos a nivel mundial. Las perturbaciones en la temperatura, la precipitación y el caudal de los ríos, desencadenan múltiples efectos negativos en el planeta, por su estrecha relación con el ciclo hidrológico. En ese sentido, los modelos hidrológicos ayudan a entender espacio-temporalmente los procesos relacionados con el recurso

hídrico, lo que a su vez facilita la toma de decisiones estratégicas, eficientes y sostenibles en la gestión del territorio.

Como caso particular, al implementar el modelo de Hydro-BID en la cuenca del río León (Colombia), inicialmente se estableció una relación de calibración entre la simulación y datos históricos hidroclimáticos registrados en la zona de estudio, en términos de parámetros incidentes en las dinámicas del flujo de agua en la cuenca, buscando mejorar la capacidad predictiva del mismo. De ese modo se obtuvo un buen desempeño del modelo, evaluado a partir de los volúmenes de error y las correlaciones estadísticas derivadas. Vale la pena mencionar que mientras mayor sea el conocimiento, disponibilidad, calidad y confiabilidad de los datos asociados a los parámetros de entrada del modelo, mejor será el desempeño del mismo, dadas las particularidades de la metodología empleada por Hydro-BID.

Los resultados del modelo respecto al rendimiento medio de la cuenca son muy cercanos a los reportados en estudios previos, lo que a su vez permite validar el nivel de predictibilidad alcanzado, y la eficiencia del proceso de calibración. Estos resultados muestran que la cuenca tiene altos excedentes de agua, comparada con el resto del país y el mundo. No obstante, se encontró una deficiencia al simular los picos máximos del caudal del río León, ya que sus valores son más bajos que los registrados. Esto podría entenderse si se considera el potencial de torrencialidad de la cuenca, que es muy alto.

En lo que tiene que ver con los escenarios de cambio climático, Hydro-BID facilita la estimación de proyecciones en el balance hídrico de la cuenca, ante eventuales perturbaciones de precipitación y temperatura en la región de interés. En el caso de la cuenca del río León, se prevén incrementos en la temperatura media, así como incrementos en la precipitación. De los resultados, se observa la incidencia de la precipitación como el factor modulador de la respuesta hídrica de la cuenca. Ante los escenarios considerados, se encontró que la cuenca continuaría con altos excedentes de agua, a pesar de que puede haber una reducción en el rendimiento medio, si se tiene una reducción en los valores de precipitación. En este punto se menciona la importancia del análisis de vulnerabilidad ante eventos de inundación, especialmente en la parte baja de la cuenca, ante las posibles variaciones en el régimen de

precipitación, condicionado además por los comportamientos persistentes y cíclicos de este tipo de eventos en gran parte de la misma.

En ese sentido, y teniendo en cuenta las condiciones de complejidad de la cuenca del río León (topográficas, de usos del suelo y actividades de producción, de alta biodiversidad, particularidades de la población y su localización en el trópico), los estudios interdisciplinarios del recurso hídrico son cruciales en la gestión sostenible del territorio. Si bien se pudieron hacer apreciaciones respecto a las dinámicas al interior de la cuenca, relacionadas con los factores incidentes y los cambios en la oferta hídrica, se hace necesario ahondar en este tipo de estudios, de tal modo que se haga una aproximación y una lectura adecuada de lo que sucede en la naturaleza.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A. M. (2016). Retos de América Latina: Agenda para el Desarrollo Sostenible y Negociaciones del siglo xxi. *Problemas del desarrollo*, 47(186), 9-30.
- Arana Medina, V. (2015). Análisis y valoración de los servicios de los ecosistemas de humedales asociados al río León (Urabá Antioqueño, Colombia), su relación con el sistema hídrico subterráneo y con el bienestar humano (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Arroyave-Rincón, A., Blanco, J. F., & Taborda, A. (2012). Exportación de sedimentos desde cuencas hidrográficas de la vertiente oriental del golfo de Urabá: influencias climáticas y antrópicas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11(20), 13-30.
- Barbier, E., & Hochard, J. (2018). Poverty, rural population distribution and climate change. *Environment and Development Economics*, 23(3), 234-256.
- Canchala, T., Loaiza Cerón, W., Francés, F., Carvajal-Escobar, Y., Andreoli, R. V., Kayano, M. T. & Ferreira de Souza, R. A. (2020). Streamflow Variability in Colombian Pacific Basins and Their Teleconnections with Climate Indices. *Water*, 12(2), 526.
- COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2012). Decreto 1640. 2 de agosto de 2012. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial*. Bogotá

D.C.No 48510. p 1-28.

- CORPOURABA, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá. (2019). Ajuste del plan de ordenación y manejo de la cuenca del río León SZH (1201) localizada en el departamento de Antioquia en jurisdicción de CORPOURABA. Fase de diagnóstico. Caracterización básica de la cuenca. POMCA río León.
- Duque, O. & Posada, L. (2011). Simulación hidráulica de confluencias y difluencias, aplicación al río león en el Urabá Antioqueño, Colombia. Memorias del Quinto Simposio Regional sobre hidráulica de ríos. Santiago del Estero, Argentina. ISBN 978-987-1780-05-1.
- García, D. M., & Mahecha, D. C. G. (2018). Puerto de Urabá: Oportunidad logística para las exportaciones en Colombia. Estudio de caso (Port of Urabá: Opportunity logistics for exports in Colombia. Case study). Revista En-contexto/ISSN: 2346-3279, 6(8), 109-126.
- García, M. C., Botero, A. P., Quiroga, F. A. B., & Robles, E. A. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de Ingeniería, (36), 60-64.
- Hernández, G., & Santos, G. R. (2019). Predicción hidrológica en cuencas no instrumentadas - Estado del arte. Memorias Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería, ACOFI -2019.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin, 56, 275-230.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá, D. C.452 páginas. ISBN:978-958-5489-12-7.
- IDEAM. (2001). La difluencia del río León hacia el caño Tumaradó, región de Urabá. Informe técnico presentado a CORPOURABA.
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable

- development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- Jordán Fuchs, R., Riffo Pérez, L., & Prado, A. (2017). Desarrollo sostenible, urbanización y desigualdad en América Latina y el Caribe: dinámicas y desafíos para el cambio estructural.
- Leverí-Amaya, F., & Pascual A, J. A. (2020). Caracterización hidrológica de la cuenca del río Coello (departamento del Tolima, Colombia) con el programa Hydro-BID. Escenarios de Cambio Climático en Colombia y Uruguay. Explorando el modelo hidrológico HYDROBID. Serie: Cuadernos de Geomática. Centro para el conocimiento del PAISAJE e Instituto Madrileño de Estudios Avanzados – Agua (IMDEA).1:55. ISBN: 978-84-09-17885-8.
- Mamani Cosi, S. (2018). Modelamiento hidrológico semidistribuido con aplicación de Hydro-BID: caso río Verde Puno-Perú. Ministerio de Agricultura y Riego. Autoridad Nacional de Agua. Perú.
- Margulis, S. (2016). Vulnerabilidad y adaptación de las ciudades de América Latina al cambio climático. CEPAL-UNIÓN EUROPEA Programa EUROCLIMA (CEC/14/001).
- Miralles-Wilhelm, F., Brantly, E., Borsellino, M., Castellano, E., Dykes, R., Moreda, F., ... & Wyatt, A. (2018). 12 La gestión de los recursos hídricos y la adaptación al clima en la cuenca del río Grande, Argentina. Agua y Ciudades en América Latina, 189.
- Mena, D., Solera, A., Restrepo, L., Pimiento, M., Cañón, M., & Duarte, F. (2019). An analysis of unmet water demand under climate change scenarios in the Gualí River Basin, Colombia, through the implementation of Hydro-BID and WEAP hydrological modeling tools. *Journal of Water and Climate Change*.
- Molnar, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Castillo, R. M. (2016). Technical Note 2. Hydro-BID: An Integrated System for Modeling Impacts of Climate Change on Water Resources. RTI International.
- Nalesso, M. Coli, P. (2017). Guía paso a paso. Manual de Hydro-BID. Banco

- Interamericano de desarrollo. División de agua y saneamiento.
- Nalesso, M. (2014). Hydro-BID. Banco Interamericano de desarrollo.
- Ortiz, A., Ruiz-Ochoa, A. M. & Rodríguez, J. P. (2017). Climatic Variability Patterns Associate to Water Resource Management Systems. *International journal of applied engineering research*, 12(20), 10043-10056.
- Poveda, G., Alvarez, D. M., & Rueda, O. A. (2011). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2233-2249.
- Vargas-Franco, V., & Restrepo-Tarquino, I. (2018). Construcción de índice con inteligencia artificial para evaluar vulnerabilidad al cambio climático en microcuencas andinas tropicales. Caso de estudio en Colombia. *Dyna*, 85(204), 194-203.
- Restrepo-López, J. C., Ortiz-Royero, J. C., Otero-Díaz, L., & Ospino-Ortiz, S. R. (2015). Transporte de sedimentos en suspensión en los principales ríos del Caribe colombiano: magnitud, tendencias y variabilidad. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(153), 527-546.
- Rincón L, P. V., & Pascual A, J. A. (2020). Caracterización hidrológica de la cuenca del río Chicamocha en Colombia, con el programa Hydro-BID. Escenarios de Cambio Climático en Colombia y Uruguay. Explorando el modelo hidrológico HYDROBID. Serie: Cuadernos de Geomática. Centro para el conocimiento del PAISAJE e Instituto Madrileño de Estudios Avanzados – Agua (IMDEA).113:141. ISBN: 978-84-09-17885-8.
- Strahler, A.N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: V.T. Chow (ed), *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw Hill Book Company, New York, Section4–11.
- Universidad de Antioquia. (2014). Convenio Interadministrativo de Cooperación 136 de 2013 Universidad de Antioquia-Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá. Medellín: CORPOURABA- Universidad de Antioquia.
- USDA, U.S. Department of Agriculture.(1998). Soli Quality Resource Concerns: Available Water Capacity. Soil Quality Information Sheet. January. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051279.pdf