

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

“ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA  
SUBCUENCA DEL RIO CHAGRES BAJO DIVERSOS ESCENARIOS  
DE CAMBIO CLIMÁTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN  
DE LA HERRAMIENTA HYDRO-BID”

MARIA DEL ROSARIO HERRERA QUINTERO

8-969-1960

PANAMÁ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ

2021

“ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE LA SUBCUENCA  
DEL RIO CHAGRES BAJO DIVERSOS ESCENARIOS DE CAMBIO  
CLIMÁTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN  
DE LA HERRAMIENTA HYDRO-BID”

TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL TÍTULO  
DE INGENIERO EN CUENCAS Y AMBIENTE

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL  
DEBE SER OBTENIDA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

APROBADO:

DR. CARLOS HIM GONZÁLEZ

\_\_\_\_\_

DIRECTOR

MGTR. AARON CONTE FALCÓN

\_\_\_\_\_

ASESOR

MGTR. AMILCAR BEITIA MENDOZA

\_\_\_\_\_

ASESOR

PANAMÁ

REPÚBLICA DE PANAMÁ

2021

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiar mis pasos, haberme permitido llegar hasta este punto importante de mi vida y culminar con éxito este trabajo de investigación.

A mi director de tesis, Dr. Carlos Alberto Him González, por aceptar y continuar con el trabajo de investigación propuesto y prestarme sus conocimientos, apoyo, paciencia, por la confianza, por cada una de sus palabras que me guiaron durante el desarrollo de este trabajo.

Al Mgtr. Ing. Aaron Conte, mi asesor de tesis y guía en el manejo del software HydroBID, por su dedicación, ayuda incondicional y paciencia a mis constantes preguntas y dudas. A la

Mgtr. Ing. Aris Pitty, por su apoyo durante la elaboración del presente trabajo de titulación, gracias a sus consejos de metodología, dirección, y guía ha hecho posible la culminación de este.

A mi abuela, la profesora Rosario Tristán de Herrera, por tomarse el tiempo para revisar, corregir y orientarme a lo largo de la redacción de mi trabajo de titulación.

Al Consejo Nacional del Agua (CONAGUA), a la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), a la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA) y al Banco Interamericano de Desarrollo (BID), por el apoyo brindado con la información y el asesoramiento técnico para desarrollar la presente investigación.

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Panamá por ser el templo de sabiduría que permitió mi crecimiento personal y profesional y a todo el personal administrativo y docente por su voluntad y entrega al brindar su ayuda, impartir sus conocimientos y consejos durante mi paso por la academia.

A mi madre, Maria Elena Quintero Sánchez, por guiarme, por hacerme quien soy, porque fue un apoyo fundamental durante mi vida académica, exigiéndome, cuestionándome y sosteniéndome.

A los grandes amigos que encontré durante estos años de carrera, que siempre estuvieron para compartir, para crecer, para descubrir y con quienes he disfrutado grandes momentos y experiencias.

A Jacobo Batinovich por creer en mí, consentirme, apoyarme durante estos años de carrera y especialmente por financiar el desarrollo de este estudio.

A todos los que invirtieron su tiempo para echarle un vistazo a este proyecto de titulación. Gracias a todos.

## DEDICATORIA

*A mis abuelos, Ovigildo Herrera Marcucci (D. E. P) y Petra Sánchez Samaniego (D. E. P) quienes han sido una inspiración en mi vida.*

*A mi madre, Maria Elena Quintero gracias por siempre estar para mí, por exhortarme a descubrir mi pasión y por siempre apoyarme mientras persigo mis sueños. Te Amo*

## RESUMEN

El cambio climático acelerado por la intervención antropogénica debido a la emisión de gases de efecto invernadero afecta cada zona del planeta de manera distinta. Específicamente, en América latina y el Caribe, se prevé mayor frecuencia de fenómenos de precipitación extremos. Motivo por el cual, en el presente trabajo, se desarrolló e implementó una metodología para lograr la estimación de la influencia del cambio climático en la subcuenca del río Chagres de la Ciudad de Panamá. Esta metodología, se desarrolló con un enfoque de ayuda para la toma de decisiones por parte de las autoridades, para comprobar la confiabilidad de la herramienta para aproximarse al comportamiento real de sus cauces.

La zona de estudio comprende la subcuenca del río Chagres, perteneciente a la cuenca Hidrográfica del Canal 115, localizada en la provincia de Panamá, con un área aproximada de 44,893 ha. La información climática histórica requerida para la modelación fue proporcionada por La Autoridad del Canal de Panamá (ACP), el departamento de hidrometeorológica de la Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA) y El proyecto “Predicción de los recursos energéticos mundiales” (POWER) de la NASA, dicha información incluye datos diarios de 6 estaciones climáticas disponibles en la cuenca, para el periodo 2000-2015.

Hydro-BID aplica el modelo de Factor de Carga de Cauces Generalizados en conjunto con una metodología de tiempo de retardo-enrutamiento. Para su modelación; requiere del ingreso de series diarias completas de precipitación y temperatura; los datos de suelo vienen almacenados en la base SQLite del modelo con la posibilidad de no representar las condiciones actuales de suelo de la zona para el periodo de estudio y los parámetros como el número de curva, el coeficiente de evapotranspiración, coeficiente de recesión de agua subterránea y contenido de agua disponible en el suelo, se utilizan para calibrar manualmente el modelo. Se estimó el rendimiento del modelo por medio del cálculo del error de volumen general, el coeficiente de correlación, el índice de correlación modificado y la eficiencia de Nash-Sutcliffe, que genero resultados aceptables. Las salidas del modelo se presentan como series mensuales y anuales de los caudales de agua simulados. La disponibilidad de agua en la zona es de alrededor de 2.75 millones de m<sup>3</sup> al año. Posteriormente se realizó la simulación basada en los escenarios de cambio climático 2.6a (escenario 1), 2.6b (escenario 2) y 8.5 (escenario 3) establecidos por la IPCC, y los resultados obtenidos en este estudio sugieren que para el escenario 1 presenta una disminución del caudal moderado (11%) mientras que para el Escenario 2 se presenta una disminución del 30% con respecto al escenario base.

**Palabras clave: HydroBID, Cambio Climático, Simulación Hidrológica, Cuenca del Río Chagres.**

## ABSTRACT

Climate change accelerated by anthropogenic intervention due to the emission of greenhouse gases affects each zone of the planet differently. Specifically, in Latin America and the Caribbean, a greater frequency of extreme precipitation events is expected. For this reason, in the present work, a methodology was developed and implemented to estimate the influence of climate change in the sub-basin of the Chagres River in Panama City. This methodology was developed with an approach to help decision making by the authorities, to verify the reliability of the tool to approximate the real behavior of its streamflow.

The study area constitutes the sub-basin of the Chagres River, which belongs to the Canal 115 hydrographic basin, located in the province of Panama, with an approximate area of 44,893 ha. The historical climatic information required for the modeling was provided by the Panama Canal Authority (ACP), Hydrometeorology Department, Empresa De Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA) and NASA's "Prediction of World Energy Resources" (POWER) project, which includes daily data from 6 climatic stations available in the basin, for the period 2000-2015.

Hydro-BID applies the Generalized Streamflow Load Factor model in conjunction with a time-delay-routing methodology. For its modeling, it requires the input of complete daily series of precipitation and temperature; the soil data are stored in the SQLite database of the model with the possibility of not representing the actual soil conditions of the area for the study period and parameters such as curve number, evapotranspiration coefficient, groundwater recession coefficient and soil available water content are used to manually calibrate the model. Model performance was estimated by calculating the overall volume error, correlation coefficient, modified correlation index and Nash-Sutcliffe efficiency, which generated acceptable results. The model outputs are presented as monthly and annual series of simulated water flows. Water availability in the area is about 2.75 million m<sup>3</sup> per year. The simulation was then carried out based on climate change scenarios 2.6a (scenario 1), 2.6b (scenario 2) and 8.5 (scenario 3) established by the IPCC, and the results obtained in this study suggest that for scenario 1 there is a moderate decrease in flow (11%) while for scenario 2 there is a 30% decrease with respect to the base scenario.

**Key words: HydroBID, Climate Change, Hydrological Simulation, Chagres River Basin.**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁG.
PAGINA DE APROBACIÓN.....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vi
ÍNDICE DE CUADROS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS .....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>1.1.    Planteamiento del problema</b> .....	3
<b>1.2.    Antecedentes</b> .....	4
<b>1.3.    Justificación</b> .....	15
<b>1.4    Objetivos</b> .....	16
<b>1.4.1  Objetivo general</b> .....	16
<b>1.4.2  Objetivos específicos</b> .....	16
<b>1.5    Hipótesis</b> .....	16
<b>1.6    Alcances y limitaciones</b> .....	17
<b>2.  REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	18
2.1 El ciclo hidrológico .....	18
2.2 La escorrentía superficial .....	19
2.3 Características de la cuenca que afectan la escorrentía superficial.....	19
2.4 Características climatológicas que afectan la escorrentía superficial .....	20
2.5. El recurso hídrico en Panamá.....	20
2.6 Herramientas de evaluación de procesos hidrológicos y modelación de cauces ..	21
2.7 Descripción del software hydrobid .....	25
2.8 El factor de carga de cauces generalizados (gwlf) .....	27
2.9 La base de datos analítica (ahd) de hydrobid .....	29
2.10 Base de datos sqlite .....	31

2.11. El sistema de visualización geográfica qgis.....	32
2.12 Algunos métodos de relleno de datos.....	32
2.13. Métodos de evaluación de rendimiento.....	35
2.14. Aplicación de herramientas de evaluación de los procesos hidrológicos .....	39
2.15. Subcuenca del rio chagres de la cuenca del canal de panamá n.º 115 .....	43
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>52</b>
3.1 Materiales .....	52
3.2 Metodología.....	55
<b>4.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>61</b>
4.1Corrida información .....	61
4.2 Calibración y validación del modelo hydro-bid .....	62
4.3 Simulación hydro-bid escenario actual .....	69
4.4 Simulación Hydro-bid escenario de cambio climático.....	72
<b>5.0 CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>6.0 RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
<b>7.0. REFERENCIAS CITADAS .....</b>	<b>79</b>
<b>8.0 ANEXOS.....</b>	<b>83</b>



## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁG.
I PRINCIPALES PARÁMETROS DEL GWL.....	28
II INVESTIGACIONES BASADAS EN EL USO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN EN DIVERSAS CUENCAS DE AMÉRICA Y PANAMÁ. ....	39
III DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	53
IV LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN HIDROMETEREOLÓGICA SELECCIONADA PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	54
V DATOS DE ENTRADA PARA LA HERRAMIENTA HYDRO-BID PARA CONDICIONES ACTUALES.....	54
VI INFORMACIÓN GENERAL DE LA MODELACIÓN DE HYDRO-BID.....	61
VII RESUMEN PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN EN LAS CUENCAS.....	62
VIII ESTADÍSTICAS GENERALES DE FLUJO.....	62
IX FLUJOS MENSUALES PROMEDIOS.....	63
X FLUJOS ANUALES PROMEDIOS.....	64
XI ESTADÍSTICAS GENERALES DE FLUJO EN LA VALIDACIÓN.....	65
XII BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO ACTUAL.....	69
XIII BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 2.6A.....	72
XIV BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 2.6B.....	72
XV BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 8.5.....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>PAG</b>
1 Métodos de estudio de un sistema .....	10
2 Clasificación de modelos hidrológicos según su concepción.....	12
3 Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la forma, aleatoriedad, variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos.....	13
4 Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la representación espacial, (a) modelos de tipo agregado, (b) semi-distribuido y (c) distribuido.....	14
5 Mapa físico de la subcuenca del río Chagres.....	44
6 Mapa 1:380000 de la altimetría de la subcuenca.....	46
7 Mapa 1:380000 cobertura boscosa 2013 de la subcuenca.....	49
8 Porcentaje de disponibilidad de datos de las estaciones meteorológicas.....	53
9 Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas.....	55
10 Balance hídrico, caudales anuales.....	64
11 Caudal simulado (m <sup>3</sup> /s).....	66
12 Variabilidad interanual en el periodo del 2000-2010.....	66
13 Resultados mensuales de caudales modelados vs observados.....	68
14 Relación entre el balance de caudal y la precipitación anual.....	70
15 Precipitación acumulada en el periodo de estudio.....	71
16 Evapotranspiración, temperatura y heliofanía mensual en la cuenca.....	71
17 Comparativo de caudales de los escenarios de la cuenca del río Chagres.....	74
18 Variación promedio del caudal mensual simulado para los distintos escenarios de cambio climático.....	76

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO</b>	<b>PAG</b>
1 Datos de población de las comunidades de la cuenca.....	83
2 Mapa 1:380000 de las estaciones de la cuenca.....	85
3 Balance general de la cuenca bajo escenario actual.....	86
4 Balance general de la cuenca bajo el escenario 2.6a.....	87
5 Balance general de la cuenca bajo el escenario 2.6b.....	88
6 Balance general de la cuenca bajo el escenario 8.5.....	89

## INTRODUCCIÓN

El patrimonio hidrológico de la República de Panamá ha sido valorado con cualidades muy eficientes, tanto que, nos posiciona como uno de los mejores ejemplos en la escala global de un país impulsado por el agua. Esta consideración se sustenta en el volumen de precipitación promedio anual nacional de 2,924 l/m<sup>2</sup>, con un mínimo de 1,000 l/m<sup>2</sup> y un máximo de 7,000 l/m<sup>2</sup>, mayor valor registrado para Centroamérica, según el Banco Mundial (2015), y con más de 500 ríos que dividen nuestro territorio en 52 cuencas hidrográficas oficiales. Sin embargo, en los últimos años este escenario de abundancia ha sido puesto en duda debido al aumento de los conflictos por el uso del agua y las crisis hídricas recurrentes durante la estación seca, que afectan de manera importante, las cuencas de cauces naturales que sirven para el abastecimiento de la población.

El crecimiento poblacional, el rápido desarrollo económico, la urbanización, los efectos adversos del cambio climático global y el propio deterioro ambiental continúan aumentando la presión sobre los recursos hídricos, de tal manera que se registran condiciones de escasez en el arco seco e inundaciones en aquellas zonas del occidente del país donde las lluvias sobrepasaron los promedios, particularmente, en zonas rurales y periurbanas con baja o inexistente inversión pública en seguridad hídrica.

Las predicciones sobre el cambio del clima sugieren que los eventos extremos, como la sequía y las inundaciones, podrían llegar a ser más frecuentes y graves por lo que la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico dependerá del acceso a programas de modelación que se aproximen cada vez más a la realidad de las cuencas hidrográficas por medio de la representación de los diferentes procesos que se presentan en ella, como transformar inicialmente, una cierta precipitación en escorrentía (Pascual y Diaz, 2016) y su capacidad para estimar la disponibilidad del recurso para satisfacer las demandas presentes y futuras, en todas las actividades que dependen de esta como el consumo humano, la producción agropecuaria, el sector industrial, la producción de energía hidroeléctrica, el transporte, por mencionar algunos, y de esta manera, tomar medidas preventivas para mitigar

los impactos e incrementar la resiliencia de la población y las infraestructuras ante fenómenos meteorológicos extremos con el fin de reducir los efectos que se puedan presentar.

Actualmente, existen muchos programas utilizados para la simular la escorrentía en las cuencas, entre los que destacan el software matemático desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos para la simulación de procesos hidrológicos en sistemas de cuencas detríticas (HEC-RAS); el “*International River Surface*”, software desarrollado para la prevención de riesgos mediante la visualización de la simulación del cauce del río, el “SWAT”, herramienta diseñada para evaluar el suelo y predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelos en los cauces de la cuenca o el modelo de agua subterránea desarrollado por el servicio geológico de los Estados Unidos, (MODFLOW) que es capaz de simular el flujo de agua subterránea en dos o tres dimensiones y sus principales procesos físicos. Sin embargo, algunos de estos no cuentan en la actualidad con opciones de simulación de cambios climáticos lo que los cataloga como poco eficaces a la hora de gestionar los recursos hídricos futuros, o se especializan en dar un resultado puntual en la obtención de la escorrentía superficial de una cuenca en particular para la solución de un problema de ingeniería, en contraste con la herramienta HydroBID desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), que se orienta a la determinación del balance y la producción hídrica de una región o cuenca y que mediante sus resultados, se pueden elaborar planes de acción y gestión del recurso hídrico ante escenarios de cambio climático.

Con base en lo expuesto, se optó por ensayar la eficiencia del modelo HydroBID en una cuenca prioritaria de la República de Panamá, en la que por su gestión y aprovechamiento constituya un reto para las autoridades correspondientes.

## **1.1. Planteamiento del problema**

Durante estos últimos años se ha observado un cambio progresivo en las condiciones climáticas del mundo, que a su vez han conllevado al incremento de la frecuencia y severidad de fenómenos/eventos meteorológicos extremos.

Específicamente en Panamá, estos eventos son el incremento de la precipitación y las consiguientes inundaciones y/o deslizamientos sobre pendientes inestables y aquellos que acentúan el estrés hídrico físico como El fenómeno del Niño (ENSO) que generalmente, se presenta en aquellas zonas situadas en la costa del pacífico. A su vez, la incidencia de los fenómenos de crecimiento económico, el cambio de uso de suelo y el aumento de la vulnerabilidad a las inundaciones y/o sequías, generan una constante presión sobre el recurso hídrico a tal punto que esta da paso a potenciales conflictos entre los usuarios y el riesgo de desplazamiento, principalmente en los asentamientos informales.

Por otro lado, los registros de disponibilidad de agua zonales exhiben solo los promedio anuales, y estos al ser altamente variables de una temporada a otra pueden no mostrar períodos extremos, mucho menos si los datos se presentan combinados a nivel nacional ya que pueden ocultar grandes diferencias en la disponibilidad de agua a lo largo de varias cuencas hidrográficas dentro del país, lo que muchas veces impide el correcto uso de los datos para la planificación de proyectos urbanísticos; aunado al mayor número de personas afectadas o que perdieron la vida a causa de los impactos de las inundaciones, las sequías y los conflictos de uso, en contraste con aquellas afectadas por servicios inadecuados de agua potable y saneamiento.

Tomando estos aspectos en cuenta, se genera la necesidad de implementar modelos de simulación hidrológica que nos apoyen en la toma de decisiones por medio de la previsión de distintos escenarios climáticos futuros y la aprobación de proyectos de desarrollo sostenible que nos garanticen no solo una retribución económica a largo plazo, sino el funcionamiento del sistema sin el decremento del medio o la población circundante.

## **1.2. Antecedentes**

### 1.2.1 La cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica, concebida como el territorio delimitado por los escurrimientos superficiales que convergen a un mismo cauce, es la unidad mínima unidad, de conservación, preservación y desarrollo sostenible de los ecosistemas naturales. Este sistema se compone de elementos bióticos, físicos y antrópicos que se relacionan, creando por tanto un conjunto único e inseparable en permanente cambio. (Dourojeanni, 2002).

En la cuenca hidrográfica, se distinguen por lo general tres sectores característicos: Alto, Medio y Bajo. Arreola-Muñoz (s/f), establece que “las cuencas tienen un funcionamiento territorial altitudinal ya que implica la relación directa entre las partes altas, cercanas al parteaguas, la zona de tránsito o intermedia y la parte baja de deposición y desembocadura, de tal forma que la parte alta afecta de manera determinante a la parte baja”.

Según Rendón (2003), esta unidad del territorio aporta bienes y servicios ecosistémicos como:

#### **Abastecimiento de agua.**

Las cuencas son un elemento fundamental para la obtención de agua potable a largo plazo, debido a los procesos naturales de infiltración que se producen en estas, ya que, cuando el agua llega al acuífero está más limpia que cuando comenzó a filtrarse sobre el área de la cuenca, a tal punto que cumplen la misma función que un sistema depurador con las tecnologías más modernas en el tratamiento de aguas residuales. Esta agua de los acuíferos suele extraerse para abastecer la demanda generalmente en zonas rurales.

#### **Regulación de la cantidad de agua.**

Los bosques y pantanos de las tierras altas de la cuenca retienen el agua de la estación lluviosa y hacen que esta fluya más lentamente, de manera que en la época seca puede disponerse del líquido; por esta razón, muchos ríos siguen siendo una fuente segura de agua durante todo el año. Si se rectifican las corrientes y se elimina la cobertura vegetal, la

aceleración de los escurrimientos generará inundaciones en la época lluviosa y no dejará nada para la sequía del verano.

### **Efectos benéficos en el clima.**

La preservación de los sistemas hidrológicos naturales como humedales, pantanos y bosques dentro de la cuenca tiene efectos climáticos beneficiosos como el mejoramiento de la calidad del aire y/o la regulación del clima.

### **La evapotranspiración**

Estos sistemas mantienen los niveles locales de humedad y de precipitaciones ya que, en las áreas con vegetación arbórea, gran parte del agua de las lluvias vuelve a pasar de los árboles a la atmósfera por evaporación o transpiración, y a caer en forma de lluvia en la zona circundante. (Rendón, 2003)

## **1.2.2 EL BALANCE HÍDRICO**

El ciclo hidrológico es el proceso global por el cual se considera al agua un recurso natural renovable, debido a que en esa circulación espontánea y continua el líquido vital se purifica y retorna temporalmente a sus fuentes que la ponen al alcance de sus múltiples demandantes. (Llerena, 2003).

El balance hídrico implica un cambio continuo de grandes masas de agua de un estado físico a otro, así como de un lugar a otro. El estudio del balance hídrico es la aplicación de la ecuación de continuidad en hidrología. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y las salidas totales se equilibrará con el cambio del almacenamiento de agua dentro del volumen. (Sokolov & Chapman, 1974)

La ecuación de balance hidrológico es una expresión muy simple, a pesar de que la cuantificación de sus términos es normalmente complicada por la falta de mediciones directas en campo y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas en acuíferos y de las variaciones del agua almacenada en la cuenca (Llerena, 2003)

Como respuesta a estas dificultades, generalmente se asume que las pérdidas profundas son despreciables, además las variaciones del agua almacenada en la cuenca no se toman en cuenta para un período suficientemente largo, generalmente de un año. (Ordoñez Galvez, 2011)

La fórmula general que se utiliza en el balance hidrológico establece que, la parte de entrada de la ecuación del balance hídrico comprende la precipitación representada por la letra P, cuando la lluvia y la nieve se reciben en la superficie del suelo, al igual que la entrada de agua superficial y subterránea en la cuenca o cuerpo de agua desde el exterior. Y reconoce como flujo de salida a la evaporación de la superficie del cuerpo de agua (E) y el flujo de salida superficial y subsuperficial de la cuenca o cuerpo de agua (I), como se describe en la siguiente ecuación:  $BH=I-E$  (Sokolov & Chapman, 1974)

De modo que, cuando el flujo de entrada excede el flujo de salida, aumenta el almacenamiento total de agua en el cuerpo y viceversa; un ingreso menor que el flujo de egresos da como resultado una disminución del almacenamiento. El balance hídrico es una herramienta que contribuye a una mejor toma de decisiones en el campo de la disponibilidad y el manejo del recurso sobre todo si se considera de manera integral, ya que a través de sus resultados se logra conocer la cantidad de agua que se tiene disponible y a partir de esta diseñar u optimizar proyectos de aprovechamiento de agua. (Programa Hidrológico Intergubernamental en América Latina y el Caribe (PHI-LAC), 2006)

#### 1.2.4 DISPONIBILIDAD DEL AGUA

La disponibilidad natural del recurso o escurrimientos naturales que se generen en la cuenca hidrológica están relacionados con la oferta hídrica, aquella porción de agua conocida como escorrentía superficial que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales y llega directa o indirectamente al mar; volumen disponible de agua es el que se emplea para satisfacer la demanda generada por las actividades antropogénicas. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004) Esta se puede determinar por medio de métodos empíricos, mediciones en campo o modelos.



### 1.2.5 LA GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS HÍDRICOS

La gestión integral de los recursos hídricos (GIRH) es un proceso que promueve el desarrollo coordinado y la gestión del agua, la tierra y los recursos relacionados, a fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. (Global Water Partnership, 2000). Esta es una definición precisa de la GIRH que expresa la necesidad del desarrollo del agua para el desarrollo socioeconómico, al tiempo que se mantienen los ecosistemas saludables. Para hacer esto, se necesita comprender las necesidades de los ecosistemas relacionadas con el agua y las implicaciones de las actividades humanas para los ecosistemas.

Gestionar los recursos hídricos implica redirigir las actividades humanas de manera que satisfagan tanto las necesidades humanas, así como la de los ecosistemas; realizar cambios no solo de las instituciones involucradas en la gestión del agua y en la forma como tratan con sus partes interesadas, sino también de las propias partes interesadas. (Schrevel & Terwisscha van Scheltinga, 2004)

Durante la Cumbre de la Tierra de Río de 1992 se reflejó un amplio consenso global con respecto a que la gestión moderna de los recursos hídricos debe basarse en tres principios fundamentales, conocidos como “los Principios de Dublín”. En el documento presentado por el banco mundial “*Water resources sector strategy*” se describe una nueva interpretación de los principios de Dublín; “Primero está el principio ecológico, que argumenta que la administración independiente del recurso por parte de diferentes sectores que usan el agua no es apropiada, que la cuenca debe ser la unidad de análisis, que la tierra y el agua deben ser administradas juntas y que se necesita prestar mucha más atención al medio ambiente. El segundo es el principio institucional, que argumenta que la gestión de los recursos hídricos se realiza mejor cuando participan todos los interesados, incluidos el estado, el sector privado y la sociedad civil; que las mujeres necesitan ser incluidas; y que la gestión de recursos debe tener en cuenta el principio de subsidiariedad con acciones tomadas en el nivel más bajo apropiado. Tercero es el principio del instrumento, que argumenta que el agua es un recurso escaso y que se debe hacer un mayor uso de incentivos y principios económicos para mejorar la distribución y la calidad” (The World Bank, 2004)

En Panamá la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) se hizo oficial mediante el decreto ejecutivo N.º 84 del nueve de abril de 2007, y es por medio de este que se establecieron los instrumentos de planificación, “Plan Nacional de Gestión Integrada de Recursos Hídricos 2010-2030” y “El Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050” que contribuyen a orientar y coordinar las decisiones públicas y privadas, con el fin de maximizar la función económica, ambiental y social del agua. Además, mediante la ejecución de estos dos instrumentos hemos logrado una implementación media del indicador “ODS 6.5.1: Grado de implementación de gestión integrada de los recursos hídricos” que es mayor al desarrollado por el resto de los países de Latinoamérica con excepción de Costa Rica. (Organización de las Naciones Unidas (ONU) Ambiente, 2018)

Actualmente, se están desarrollando herramientas de gestión para incluir medidas técnicas para programas de monitoreo y gestión eficaces a largo plazo centrados en la cantidad de agua, la contaminación, el riesgo ambiental y la adaptación al cambio climático; en la política la gestión integrada de los recursos hídricos fue precursora del desarrollo del anteproyecto de denominado “Ley General de Recursos Hídricos” que tiene como objetivo es regular el uso de las aguas continentales e insulares del Estado, garantizando su sostenibilidad en disponibilidad, calidad y cantidad, a través de la gestión integrada de los recursos hídricos.

#### 1.2.6 LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

Debido a la complejidad de los procesos hidrológicos que ocurren en un ecosistema natural, se recurre a la implementación de los modelos hidrológicos para simular su comportamiento y predecir los efectos que estos tienen sobre las cuencas hidrográficas; estos modelos están constituidos por supuestos tomados de relaciones matemáticas o lógicas, con el fin de obtener una cierta comprensión de cómo se comporta el sistema.

Los modelos hidrológicos buscan representar la parte terrestre del ciclo hidrológico, transformando la precipitación que cae sobre la cuenca de flujo en una sección dada de un río. Inicialmente, el análisis de cada uno de los procesos como evaluación de precipitaciones, interceptación de plantas, evapotranspiración, infiltración y percolación, equilibrio hídrico

en las capas superiores y fondo del suelo y escurrentía, subsuperficiales, subterráneos y en ríos, canales y lagos estaba fragmentado. (Tucci, 2010)

El modelado hidrológico se utiliza como herramienta para la obtención de conocimientos más en profundidad sobre los fenómenos físicos involucrados y escenarios de pronóstico. (Moriasi, 2012). El modelo hidrológico incluye un sistema de ecuaciones y procedimientos compuesto por variables y parámetros que están siendo cada vez más utilizado en estudios para ayudar a comprender el impacto de cambios en el uso de la tierra y para predecir cambios ecosistémicos futuros. (Silva, 2007).

Según Tucci (2010), los modelos hidrológicos surgieron con la necesidad de obtener series hidrológicas más largas y representativas de flujos para diferentes proyectos de los recursos hídricos. Además, con la modificación de las cuencas por construcción de obras hidráulicas y reformas en el uso de la tierra, las series de flujo ya no son ser homogéneo o estacionario. Empezando desde precipitación, es posible determinar o estimar flujos desconocidos para los nuevos escenarios cuencas existentes o previstas.

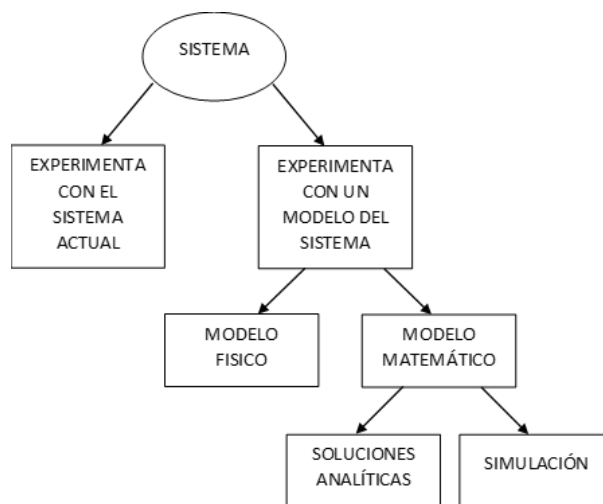
A inicios del siglo XIX, surgieron modelos hidrológicos, basados en la ecuación de algunos procesos hidrológicos, como, por ejemplo, el Método Racional, propuesto por Mulvaney por alrededor de 1850, diseñado para predecir el caudal máximo debido a un evento de lluvia. Este método fue registrado en la literatura por sus aplicaciones en diseño de redes de alcantarillado en los últimos años del siglo XIX.

Según Fayal (2008), los grandes avances comenzaron, de hecho, a partir de 1930, cuando las agencias gubernamentales de los países desarrollados comenzaron a desarrollar sus propios programas de investigación hidrológica. Los modelos desarrollados en estas investigaciones trataron de describir los procesos de cada componente del ciclo hidrológico. En 1932, Sherman desarrolló el hidrograma unitario. En 1933, Horton desarrolló la teoría de la infiltración. Con la propagación del uso de computadoras en la década de 1960 y 1970 y la mayor disponibilidad de datos hidrometeorológico, el enfoque espacial distribuido comenzó a aplicarse en el modelado hidrológico (Freeze & Harlan, 1969).

Kelton en su obra titulada “*Simulation Modeling and Analysis*” explica que principalmente existen dos tipos de modelos, los físicos y matemáticos; sin embargo, los primeros,

generalmente, no son de interés en la investigación de operaciones o análisis de sistemas; la gran mayoría de los modelos construidos para tales propósitos son matemáticos, ya que logran representar las relaciones lógicas y cuantitativas presentes en el sistema y que luego se manipulan para ver cómo reacciona el modelo y, por lo tanto, el sistema en el caso de que este sea válido. (1991). Agrega que, para lograr su validación, el modelo debe estudiarse bajo simulación, nutriéndolo con datos para comprobar como las entradas afectan el rendimiento de los datos de salida. (Kelton, 1991).

Como lo presenta el diagrama (figura 1), un sistema puede estar basado en dos tipos de experimentación y cada uno de estos experimentos aplicar un modelo específico. En el caso de la experimentación de un modelo del sistema puede emplear un modelo físico o matemático y este último generará resultados analíticos o simulaciones.



Fuente: Tomado de “Simulation Modeling and Analysis” de LAW, A., D. KELTON, 1991

Figura 1 Métodos de estudio de un sistema

En 1994 Chow, simplifica el concepto de modelación del sistema hidrológico como una representación simplificada de los fenómenos que ocurren durante el ciclo hidrológico. Desde entonces, la modelización hidrológica se ha desarrollado y ha dado lugar a diversos modelos, variando según los objetivos y escala de aplicación, a partir de modelos destinados a dimensionamiento de depósitos hasta modelos cuyo objetivo es predecir cambios en los caudales de una cuenca debido al cambio climático.

Se han utilizado modelos para predecir eventos futuros potencialmente dañinos para la sociedad, relacionados con el régimen hídrico y para ayudar en los procesos de toma de decisiones en políticas públicas. Dado que los modelos se pueden utilizar para predecir condiciones futuras por medio de la simulación, son herramientas muy útiles para afrontar problemas medioambientales y posibles alternativas para mitigar impactos.

En general, en las últimas décadas, los modelos hidrológicos se han desarrollado en dos direcciones: modelos que buscan representar con mayor precisión y de forma distribuida, procesos hidrológicos; y modelos que tratan empíricamente la distribución de parámetros en zonas de gran magnitud. Esta visión es relacionada con la escala de procesos en el sistema físico. (Fayal, 2008)

## 1.2.7 CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

### SEGÚN SU CONCEPCIÓN

Un modelo formal es una serie de ecuaciones que simbolizan una situación idealizada, compartiendo las propiedades estructurales del sistema original; debido a su concepción van a ser clasificados como determinísticos o estocásticos.

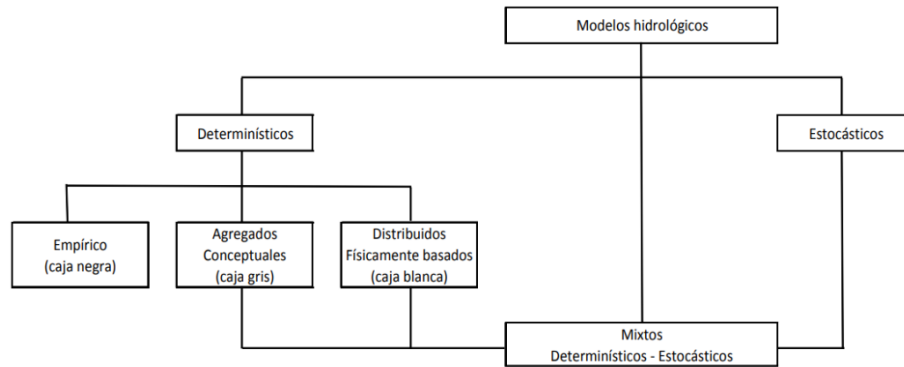
#### **Modelos determinísticos**

Modelos de simulación en donde los variables de entrada como precipitación o contenido de humedad no poseen una distribución de probabilidad o aleatoriedad y que en conjunto con sus interacciones determinan las salidas del sistema como escorrentía, variación del contenido de humedad o nivel freático en función del tiempo a través de una relación de causalidad. (González, 1989)

#### **Modelos estocásticos**

Se definen como aquellos modelos a los que se les incorpora un elemento aleatorio. Estos apuntan a predecir el valor de alguna variable hidrológica en tiempos no observados o en ubicaciones no observadas, al tiempo que trata de cuantificar los errores en los resultados del modelo.

Los modelos de simulación estocástica producen resultados que son en sí mismos aleatorios y, por lo tanto, deben tratarse solo como una estimación de las características verdaderas del modelo. (Bierkens & Geer, 2012) El diagrama (ver figura 2) presenta un esquema de la distribución de los modelos según su concepción.



Fuente: Tomado de “Distributed Hydrological Modelling” de Refsgaard y Abbott, 1996.

Figura 2 Clasificación de modelos hidrológicos según su concepción

## SEGÚN LA VARIACIÓN DEL ESPACIO Y TIEMPO

Debido a la complejidad de ajustar un modelo que depende de las tres dimensiones espaciales y el tiempo, es necesario simplificar el modelo depreciando alguna de estas variables, en este sentido, según (Chow, 1994), los modelos se clasifican según:

### **Espacio**

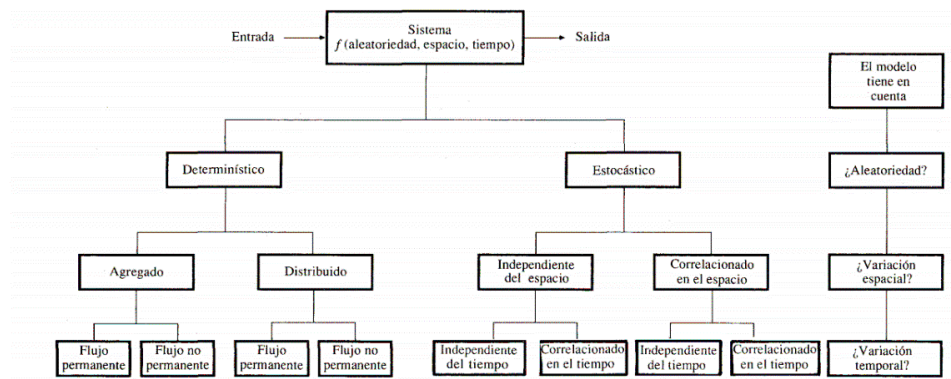
Ya sea depreciando las dimensiones en el modelo determinístico agregado, en donde el espacio se considera como un punto único como se aplica en los modelos que relacionan las variables precipitación y escorrentía; en ellos la entrada de precipitación se asume como uniforme en toda la cuenca, ignorando las variaciones espaciales de flujo; o aquellos que consideran que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio, por lo que se definen las variables del modelo en función de las dimensiones espaciales, por ejemplo, el modelo determinístico distribuido.

En el caso de los modelos estocásticos, se clasifican en independientes o correlacionados en el espacio, de acuerdo con la influencia que las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos. (Chow, 1994)

## Tiempo

Con respecto a la variabilidad temporal, los modelos determinísticos se clasifican en modelos de flujo permanente, es decir que no se altera con el tiempo y modelos de flujo no permanente.

Los modelos estocásticos siempre tienen salidas que son variables en el tiempo por lo que se clasifican según su independencia y correlacionados o aquellas secuencias en las cuales el evento siguiente está parcialmente influenciado por el evento anterior y posiblemente por otros. A continuación, el diagrama (figura 3) detalla la diversificación de los distintos modelos que se dan si se toman en cuenta diversos factores a la vez.



Fuente: Tomado de Hidrología Aplicada de Chow et al., 1994

FIGURA 3 Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la forma, aleatoriedad, variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos

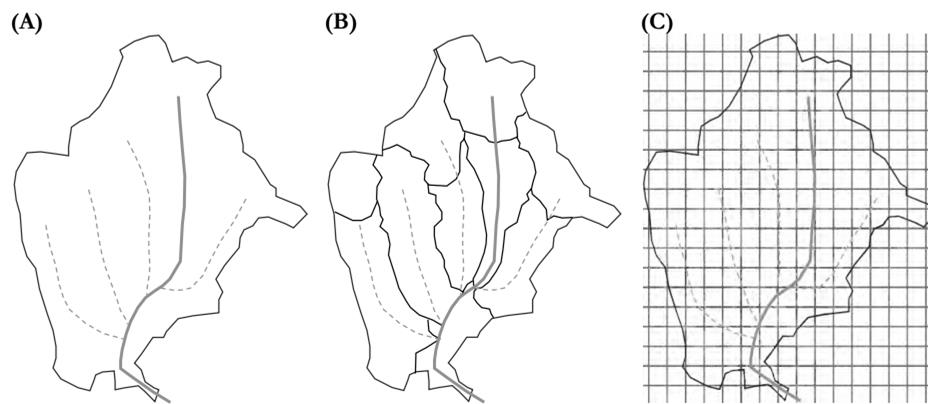
## SEGÚN SU REPRESENTACIÓN ESPACIAL

La homogeneización de la cuenca tanto en sus flujos superficiales como subterráneos es la respuesta a la falta de conocimiento del suelo y los procesos involucrados en los flujos subterráneos, por lo que, independientemente de los procesos que considere, se asume que la

cuenca es el único elemento presente y con características constantes, dando paso a los modelos agrupados.

Al incrementar las áreas de estudio, la posibilidad de que las características sean las mismas en toda la cuenca disminuye por lo que se desarrolla el modelo semi-distribuido, aquel que da una representación intermedia de la diversidad espacial, utilizando zonas de comportamiento teóricamente similares que se consideran como agregadas, analizar cada una de ellas de forma independiente para luego superponer sus efectos. (Xu, 2002)

Los modelos distribuidos, se emplean con el fin de alcanzar la mayor representatividad en la cuenca, consisten en dividir la cuenca en elementos mucho más pequeños, de geometría usualmente uniforme, llamados “grillas” y realizar un balance hídrico en cada una, transmitiendo su efecto a las grillas adyacentes. El mapa (ver figura 4) muestra un esquema de la representación espacial de una cuenca bajo estos tres tipos de modelo.



Fuente: Tomado de La Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS de Pascual & Díaz, 2016

Figura 4 Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo con la representación espacial, (a) modelos de tipo agregado, (b) semi-distribuido y (c) distribuido



### **1.3. Justificación**

La constitución Política de la República de Panamá, en su sección tercera (TÍTULO III - DERECHOS Y DEBERES INDIVIDUALES Y SOCIALES), capítulo séptimo (Régimen Ecológico), artículo 118, establece que, “Es deber fundamental del Estado garantizar que la población viva en un ambiente sano y libre de contaminación, en donde el aire, el agua y los alimentos satisfagan los requerimientos del desarrollo adecuado de la vida humana” Constitución política de la República de Panamá (1972)

El Plan Nacional de Seguridad Hídrica de la República de Panamá establece en el reto dos, “Disponibilidad para sectores productivos ante un clima cambiante”, que: las proyecciones al año 2050 para Panamá reflejan un aumento generalizado de las temperaturas entre 0.5 °C y 2 °C, así como de la variabilidad de los patrones de lluvia y ya que los vínculos entre agua, energía, ambiente y desarrollo sostenible son muchos y muy estrechos, requieren de políticas coherentes e integradas y estrategias innovadoras, debido a que las interacciones entre ellos pueden facilitar o dificultar los esfuerzos por construir comunidades estables y garantizar una vida digna para todos. Es por lo que una de sus metas es: “asegurar agua para un desarrollo económico inclusivo”.

Además, la incertidumbre intrínseca en los estudios hidrológicos que afectan los resultados de las estimaciones ya sea de índices o de extremos hidrológicos; hace evidente la necesidad de contar con modelos de simulación que nos permitan evaluar el potencial de cambio en la disponibilidad de agua de manera que se ejecuten acciones a tiempo para garantizar que los proyectos de infraestructura cumplan con sus metas operacionales, financieras y económicas; así como, las implicaciones que tales proyectos tendrían en la distribución de los recursos hídricos disponibles entre los usuarios y los usos del agua que compiten entre sí, con el fin de mitigar potenciales conflictos y asegurar que dichos proyectos puedan satisfacer los planes de desarrollo regional de largo plazo y la preservación de los servicios esenciales de los ecosistemas determinados en la mayoría de los casos por los caudales ambientales. (Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016)

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Estimar la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Chagres bajo diferentes escenarios de cambio climático mediante la aplicación de la herramienta Hydro-BID.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar el perfil del área de estudio.
- Estimular la aplicación y desarrollo del modelo HydroBID en la cuenca de estudio.
- Calibrar el Modelo HydroBID con series históricas de flujos observados en la cuenca de estudio.
- Generar flujos futuros basados en los escenarios de cambio climático de la IPCC por medio del programa HydroBID.

## **1.5 Hipótesis**

### Hipótesis Nula (H<sub>0</sub>)

Mediante la modelación de escenarios de cambio climático se estima que no existirán variaciones en el caudal del cauce principal de la subcuenca.

### Hipótesis Alternativa (H<sub>1</sub>)

Mediante la modelación de escenarios de cambio climático se estima que existirán variaciones en el caudal del cauce principal de la subcuenca del río Chagres.

## **1.6 Alcances y limitaciones**

El presente estudio corresponde al área de la hidrología con la aplicación de una herramienta informática de simulación hidrológica del software libre HydroBID desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), para analizar el recurso hídrico de una cuenca prioritaria de la República de Panamá. esta abarca la delimitación geográfica de la subcuenca N°115 conocida como río Chagres, localizada en la zona occidental del país, en la provincia de Panamá, así como sus unidades hídricas aportantes. La recopilación de la información requerida por el modelo, el relleno de la información se efectuará por medio de métodos estadísticos cuando sea necesario y el control de calidad de la información. El producto final de esta investigación será el balance hídrico para proyectar diversos escenarios hidrológicos basados en las variaciones climáticas propuestas por el Panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) para dicha cuenca.

La información requerida será suministrada por la dirección de Hidro-meteorología de la Empresa de transmisión eléctrica S.A. (ETESA) y la Autoridad del canal de Panamá (ACP) a través de los registros meteorológicos disponibles de las estaciones hidrometeorológicas y pluviométricas circundantes a la cuenca.

La principal limitación del estudio es la falta de registros completos por parte de las estaciones de aforo y/o pluviométricas o que presentan una extensa falta de datos, pues limita la capacidad del modelo para aproximarse a la realidad, ya que el levantamiento de datos o generación de estos queda fuera del alcance del presente trabajo.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El ciclo hidrológico

Según el United States Geological Survey, en el 2007. El 97 por ciento del agua que se localiza en la tierra se encuentra en los océanos, del tres por ciento restante, el 77 está en forma de glaciares y capas de hielo, 22 por ciento de esta porción es agua subterránea y el porcentaje restante corresponde a los ríos y lagos.

Por lo que se estima que la cantidad de agua que es "almacenada" en los océanos por largos períodos, es mucho mayor que la que actualmente se encuentra en movimiento en el ciclo del agua. Se estima que, de los 1.386.000.000 kilómetros cúbicos (332.500.000 millas cúbicas) que hay de agua en la tierra, alrededor de 1.338.000.000 kilómetros cúbicos (321.000.000 millas cúbicas) son almacenados en los océanos. Esto es, alrededor de un 96.5 por ciento, así como también que, los océanos proveen un 90 por ciento del agua que se evapora hacia la atmósfera. (United States Geological Survey (USGS), 2017)

El ciclo hidrológico inicia en los océanos: El sol, que dirige el ciclo del agua, calienta el agua de los océanos, la cual se evapora hacia el aire como vapor de agua; las corrientes ascendentes de aire llevan el vapor a las capas superiores de la atmósfera, donde la menor temperatura causa que el vapor de agua se condense y forme las nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes sobre el globo, las partículas de nube colisionan, crecen y caen en forma de precipitación. Parte de esta precipitación cae en forma de nieve, y se acumula en capas de hielo. En los climas más cálidos, la nieve acumulada se derrite cuando llega la primavera. La mayor parte de la precipitación cae en los océanos o sobre la tierra, donde, debido a la gravedad, corre sobre la superficie como escorrentía superficial. Una parte de esta escorrentía alcanza los ríos en las depresiones del terreno; en la corriente de los ríos el agua va de vuelta a los océanos.

No toda el agua que se precipita en la cuenca fluye hacia los ríos, una gran parte es absorbida por el suelo como infiltración. Parte de esta agua permanece almacenada en las capas superiores del suelo, y vuelve a los cuerpos de agua y a los océanos como descarga de agua subterránea o es evapotranspirada por las plantas. Otra parte del agua subterránea encuentra salida la superficie y emerge como manantiales de agua dulce. El agua

subterránea que se encuentra a poca profundidad es tomada por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas, regresando a la atmósfera. Otra parte del agua infiltrada alcanza las capas más profundas de suelo y recarga los acuíferos, los cuales la almacenan por largos períodos. A lo largo del tiempo, esta agua continúa moviéndose y eventualmente parte de ella retornará a los océanos (USGS, 2019)

## 2.2 La escorrentía superficial

El flujo superficial comúnmente observado en los cauces de una cuenca es el resultado de la suma de flujos generados por escurrimiento superficial. La escorrentía superficial o directa es la concentración de los flujos por exceso de infiltración, exceso de saturación del suelo y/o el deshielo. El exceso de infiltración es un término comúnmente utilizado y aceptado internacionalmente para referirse al flujo Hortoniano que es aquella precipitación que no queda detenida en las depresiones del suelo, y que escapa de los fenómenos de evapotranspiración.

Este flujo se produce cuando se satisface la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y se satura el suelo o la capacidad de infiltración es inferior a la intensidad de la lluvia, lo cual genera encharcamiento y por consiguiente esta llega a la red de drenaje, moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad, según su pendiente y es frenada por las irregularidades del suelo y por la presencia de vegetación. Por otra parte, el flujo por exceso de saturación ocurre cuando el nivel freático está muy cercano a la superficie, donde se junta con los otros componentes que constituyen la escorrentía total. (Hernández Anguiano, 2011)

## 2.3 Características de la cuenca que afectan la escorrentía superficial

### **La pendiente**

A mayor pendiente de la cuenca mayor velocidad presentará la escorrentía, de modo que los caudales pico son mayores y la infiltración menor.

### **La Forma**

En la medida en que el coeficiente de forma de una cuenca determinada sea más bajo, estará menos sujeta a crecientes que otra con la misma área, pero con mayor coeficiente de forma

### **Numero de orden y densidad de drenaje**

La forma como estén conectados estos cauces en la cuenca influye en la respuesta de ésta a un evento de precipitación, aquella bien drenada tendrá una mejor respuesta en comparación con una cuenca con muchas depresiones superficiales. Esta variable es posible cuantificarla por medio de la medición de las longitudes de cursos por unidad de área o mediante el número de uniones de cursos por unidad de área. (Quillatupa Espejo & Cárdenas Baquerizo, 2016)

#### 2.4 Características climatológicas que afectan la escorrentía superficial

La escorrentía superficial está ligada, proporcionalmente, a la Intensidad, magnitud, duración y distribución de la precipitación pluvial sobre la cuenca hidrográfica. Adicionalmente, se deben tomar en consideración otras condiciones meteorológicas y climáticas que afectan como: la temperatura, el viento, la humedad relativa y la temporada.

#### 2.5. El recurso hídrico en Panamá

La República de Panamá cuenta con un patrimonio hidrológico extraordinario, respaldado por una extensa red hídrica integrada por más de 500 ríos que en su gran mayoría nacen en la divisoria continental y escurren hacia las costas, que presentan un volumen de precipitación total de 233.8 mil millones de m<sup>3</sup> al año. (Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica, 2016)

De acuerdo con el Plan Nacional de Seguridad Hídrica (PNSH) 2015-2050: Agua para todos, la oferta total de agua dulce en Panamá alcanza los 119 mil millones de metros cúbicos, aproximadamente 29,000 metros cúbicos de agua dulce per cápita disponibles, de los cuales, se emplea 25 por ciento (uso energético; 89.61 por ciento; transporte por el

Canal de Panamá; 7.39 por ciento; seguridad alimentaria; 1.68 por ciento, consumo humano; 1.27 por ciento; industria y otros rubros menos de 0.05 por ciento)

Sin embargo, en los últimos años, se refleja un incremento en los conflictos por el uso del agua debido al crecimiento poblacional ligado al rápido desarrollo económico, los cambios en el uso de la tierra, asociados a la urbanización, los efectos adversos del cambio climático global y el propio deterioro ambiental que incrementan la presión sobre este recurso, a tal punto que ya se registran condiciones de aparente escasez, particularmente en zonas periurbanas.

Los problemas del agua urbana son especialmente importantes ya que más del 60 por ciento de la población mundial vive en ciudades y este número aumenta cada año. Según el último censo del 2010, el 66 por ciento de la población del país (2,249,394 personas) vive en 224 ubicaciones urbanas (ciudades con más de 1500 habitantes) y la urbanización va de la mano con la intensificación en el uso de los recursos hídricos para las necesidades humanas; a su vez, los sistemas hidrológicos juegan un papel en el desarrollo y el crecimiento de las ciudades, no solo como fuente de agua potable sino también para la deposición de desechos (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2015)

Según el Consejo Nacional del Agua para que nuestro país siga creciendo, debemos hacer las inversiones necesarias en nuevas herramientas de evaluación de los procesos hidrológicos, que permitan asegurar que contamos con la disponibilidad de agua que nuestros sectores productivos requieren, así como la conservación de los cursos de agua existentes. (2015)

## 2.6 Herramientas de evaluación de procesos hidrológicos y modelación de cauces

Dentro de la ingeniería hidrológica existen una gran variedad de softwares que ayudan a modelar, examinar, crear series, evaluar, comparar y proyectar. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), destaca que los modelos son representaciones simplificadas de la realidad que ofrecen grandes bondades a los que toman decisiones cuando se trabajan adecuadamente, sin embargo, ningún modelo es perfecto y

puede cambiar con el tiempo y/o los contextos. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018). A continuación, se detallan algunas características de las herramientas más populares dentro de este campo como lo son:

### **SWAT**

La herramienta desarrollada para la evaluación del suelo y el agua de una cuenca o una sección del río específica, desarrollada por el Dr. Jeff Arnold para el servicio agrícola de investigación del United State Department of Agriculture (USDA) con el objetivo principal de predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo en el agua, el sedimento y el efecto de la producción de sustancias agrícolas químicas en las cuencas sobre un tiempo prolongado.

Requiere información detallada sobre el área de estudio como el clima y tiempo; el suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo; y permite a los usuarios estudiar diferentes procesos físicos, los impactos a largo plazo y cuantificar el impacto relativo de los datos de entrada como prácticas de gestión, clima o vegetación, pueden afectar la calidad de agua u otras variables de interés, por lo que el modelo no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado. (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2015)

### **iRIC**

El software de La International River Interface Cooperative (IRIC) es una plataforma de simulación numérica gratuita que admite una amplia variedad de solucionadores computacionales, para problemas en ciencias e ingeniería del agua como: predicciones de inundaciones, generación de escorrentía de lluvia, propagación de tsunamis, flujos de escombros, evaluación de hábitat. Estos resultados pueden ser importados y utilizados por los usuarios con fines de análisis, mitigación y prevención de desastres, mediante la visualización de los resultados de la simulación del río.

La interfaz IRIC altamente flexible permite importar varios solucionadores, o puede utilizar uno de los solucionadores IRIC. Al seleccionar el solucionador, IRIC



selecciona funciones adecuadas para el solucionador y prepara el entorno de simulación óptimo. (International River Interface Cooperative, 2018)

### **HEC-RAS**

El sistema de análisis de ríos (HEC-RAS) del Centro de ingeniería hidrológica (CEIWR-HEC) desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, es un software integrado que permite al usuario realizar cálculos unidimensionales de flujo constante, unidimensionales y bidimensionales de flujo inestable, cálculos de transporte de sedimentos / lecho móvil, modelado de la temperatura y calidad del agua de complejas redes de canales naturales o construidas, zonas de inundación, áreas protegidas, mediante el gradiente y la topografía.

El programa provee un conjunto de funciones como una interfaz de registro y edición de data geoespacial, administración y almacenamiento de datos, tabulación y creación de gráficos de información de entrada y salida, mapeos de zonas inundables y animación de propagación de agua.

Una ventaja del sistema es que los cuatro componentes emplean data de representación geográfica y rutinas hidráulicas de computación comunes. Además, contiene una extensa data espacial y un sistema de mapeo integrado. (Brunner, 2020)

### **PRMS**

El Sistema de Modelado de Precipitación-Escorrentía (PRMS) desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos – USGS, es un sistema de modelado determinista, de parámetros distribuidos, basado en los procesos físicos que se desarrollan en las cuencas hidrográficas, para evaluar la respuesta de varias combinaciones de clima, geomorfología, vegetación, tipo y uso de suelo en el caudal y la hidrología general de las cuencas.

El manual técnico del sistema de modelado de escorrentía de precipitación (PRMS) enumera sus principales objetivos como:

1. Simular procesos hidrológicos que incluyen evaporación, transpiración, escorrentía, infiltración e Inter flujo según lo determinado por los presupuestos de energía y agua del dosel de la planta, la capa de nieve y la zona del suelo sobre la base de la información climática distribuida (temperatura, precipitación y radiación solar);
2. Simular los presupuestos hídricos hidrológicos a escala de la cuenca para escalas temporales que van desde días hasta siglos;
3. Integrar PRMS con otros modelos utilizados para la gestión de recursos naturales o con modelos de otras disciplinas científicas;
4. Proporcionar un diseño modular que permite la selección de algoritmos alternativos de procesos hidrológicos de la biblioteca de módulos PRMS estándar. (Regan, Markstrom, & LaFontaine, 2020)

### **HEC-HMS**

El sistema de modelado hidrológico (HEC-HMS) está diseñado con el objetivo principal de simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas. El software incluye muchos procedimientos tradicionales de análisis hidrológico, como infiltración de eventos, hidrogramas unitarios y enrutamiento hidrológico, los procedimientos necesarios para la simulación continua, como la evapotranspiración, radiación de onda corta, radiación de onda larga, el deshielo y la contabilidad de la humedad del suelo, así como, capacidades avanzadas para la simulación de escorrentía en cuadrícula utilizando la transformación de escorrentía lineal casi distribuida (ModClark). También se proporcionan herramientas de análisis complementarias, para la optimización del modelo, pronosticar el caudal, la reducción del área de profundidad, evaluar la incertidumbre del modelo, la erosión y el transporte de sedimentos y la calidad del agua.

El programa es un sistema de modelado generalizado capaz de representar muchas cuencas hidrográficas diferentes. En el que se construye un modelo de la cuenca

hidrográfica separando el ciclo hidrológico en partes manejables y estableciendo límites alrededor de la cuenca de interés. Cualquier flujo de masa o energía en el ciclo se puede representar con un modelo matemático. En la mayoría de los casos, se encuentran disponibles varias opciones de modelo para representar cada flujo. Cada modelo matemático incluido en el programa es adecuado en diferentes entornos y bajo diferentes condiciones. Hacer la elección correcta requiere el conocimiento de la cuenca, los objetivos del estudio hidrológico y el juicio técnico.

El software presenta un entorno de trabajo completamente integrado que incluye una base de datos, utilidades de entrada de datos, motor de cálculo y herramientas de informes de resultados. Una interfaz gráfica de usuario permite al usuario moverse sin problemas entre las diferentes partes del software. Los resultados de la simulación se almacenan en un sistema de almacenamiento de datos y se pueden usar junto con otro software para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de flujo, impacto de urbanización futura, diseño de aliviadero de embalses, reducción de daños por inundaciones, regulación de llanuras de inundación y funcionamiento de los sistemas.

## 2.7 Descripción del software hydrobid

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), mediante el Instituto Triángulo de Investigaciones (RTI), desarrolló el sistema de simulación de hidrología y gestión de recursos hídricos regionales para América Latina y el Caribe conocido como HydroBID; con el propósito de evaluar la disponibilidad (volúmenes y caudales) de agua dulce a escalas regional, de cuencas y subcuencas bajo escenarios de cambio, como clima, uso del suelo y población. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014)

Esta herramienta informática, modela el comportamiento hidrológico, proporciona información para comprender los fenómenos extremos y los efectos del cambio climático; permite el análisis de los problemas del recurso hídrico en múltiples escalas como la evaluación de la cantidad y calidad del agua; hace posible la gestión y planificación de los

recursos hídricos de manera eficiente, y, aunque no es posible controlar los cambios en los fenómenos climáticos, permite adaptarlos y sobrellevarlos con el menor impacto posible mediante la determinación de necesidades de infraestructura, el diseño de estrategias y proyectos de adaptación en respuesta a estos cambios; estimar los costos y beneficios de estas de manera que sirva de apoyo para ayudar a los entes responsables de tomar decisiones en la escogencia entre diseños alternativos de proyectos de infraestructura y/o políticas de gestión de recursos hídricos. (Rineer, Bruhn, Miralles-Wilhelm, & Castillo, 2014); sin embargo, como toda herramienta posee limitaciones una de las cuales es que no permite el análisis hidrodinámico.

El software HydroBID trabaja con la plataforma libre QGIS, que permite visualizar, gestionar, editar y analizar datos, y diseñar mapas, específicamente el QGIS5, puede tener complementos mejor conocidos como “*plug-ins*” que pueden ser instalados y que extienden la funcionalidad del programa, es por medio de esta que RTI desarrolló una base de datos hidrográfica analítica para Latino América y el Caribe, conocida como ADH-LAC bajo el nombre de AHDTools. La herramienta a su vez emplea una base de datos SQL que relaciona los datos geográficos con este, para analizar la disponibilidad de volúmenes y caudales a varias escalas. Cabe señalar que para el correcto funcionamiento del software se deben instalar los siguientes programas en un orden específico: primero instala el programa SQLite, luego el ejecutable HydroBID y finalmente la base de datos AHD.

Para el hidrólogo Jorge Escurra, (RTI-HYDROBID, 2018) hay tres componentes importantes al tratar el modelo HydroBID: la base analítica de datos AHD-LAC, la base de datos SQLITE y el modelo hidrológico lluvia-escorrentía que es un algoritmo que permite generar caudales diarios mediante un modelamiento tipo tanques. Estos tres componentes interactúan para realizar un mejor modelamiento hidrológico dentro del software.

El funcionamiento lógico del software consta primero de los insumos como fuente de datos, los cuales se dividen en dos grupos, unos están dados en las carpetas de instalación y otros como los datos meteorológicos (temperatura, caudal y precipitación) deben ser ingresados por el usuario una vez el programa posea los datos de entrada mediante, algoritmos propios, se entrelazan los datos ingresados y/o seleccionados, y se produce una nueva base de datos

con la caracterización propia de la cuenca en estudio. Posteriormente, se ingresan valores de ajuste en el software HydroBID y se corre nuevamente con algoritmos propios del programa. Finalmente, los outputs o datos de salida son los hidrogramas, y el balance hídrico de la cuenca de estudio en el interfaz del software, y archivos de Excel para ser procesados en QGis u otros programas informáticos. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014)

## 2.8 El factor de carga de cauces generalizados (gwlf)

El modelo hidrológico lluvia-escorrentía se basa en el método de la función generalizada de carga de cuencas, conocido como “Factor de carga de cauces generalizados” o “GWLF” por sus siglas en inglés (The Generalized Watershed Loading Function). Este es un modelo estándar, que se desarrolló en 1987 y sirve para analizar la calidad del agua de las cuencas, también brinda la capacidad de simular escorrentías desde una cuenca hidrográfica no puntual, con variabilidad de tamaño y uso de suelo; utiliza los datos hidro-meteorológicos diarios y sigue realizando los cálculos de balance de agua. “Los parámetros requeridos por el GWLF son los datos históricos del clima, datos de transporte como tamaño de la cuenca, uso del suelo, número de curva, coeficientes de cobertura, Coeficientes de erosionabilidad, horas de luz y meses de luz, temporada de cultivo en meses, datos de nutrientes del suelo, entre otros”. (Waseem, Schilling, Kachholz, & Tränckner, 2020)

El HydroBID aplica una parte del modelo GWLF en conjunto con “*lag-routing*” que es conocido como método retardo-enrutamiento, que de acuerdo con Moreda et al. (2014), El modelo calcula la escorrentía desde las precipitaciones que el modelador ingresa en cada cuenca, posteriormente determina la evaporación y la infiltración de la capa no saturada, para tener un flujo base por cada cuenca de captación, luego se realiza un ajuste por percolación y se deduce el volumen almacenado de agua en las capas de suelo, para entregar un balance en cero. La simulación calcula un promedio ponderado de la distancia entre los centroides de las cuencas ( $Z(x)$ ), la distancia a la ubicación de las estaciones y homogeniza las cuencas que están cerca con respecto a condiciones de comportamiento hídrico, pondera de acuerdo con los valores medidos, es decir que los lugares cercanos

tienen mayor influencia sobre los lugares lejanos disminuyendo el peso en función de la distancia. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014)

### Parámetros del GWLF

La mayoría de los parámetros requeridos por el GWLF se acoplan en una base de datos para cada cuenca de la AHD, por lo que mediante la numeración única de cada cuenca (COMID) el sistema adquiere la estimación del número de curva, la capacidad disponible de agua del suelo y los parámetros de percolación según los tipos y usos de suelo registrados en esta. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014) Los parámetros principales del GWLF se describen en el CUADRO I “Principales Parámetros del Generalized Watershed Loading Function”.

CUADRO I PRINCIPALES PARÁMETROS DEL GENERALIZED WATERSHED LOADING FUNCTION

Parámetros	Descripción	Método de estimación
Capacidad disponible de Agua del Suelo (U)	Este parámetro activa el inicio de la percolación	Puede ser estimado por las características del suelo.
Número de Curva (CN)	Controla la cantidad inicial de abstracción y usada para calcular la detención	Se escoge usando el uso del suelo y el tipo de clasificación del suelo
Coefficiente de la Curva de Evaporación (CV)	Representa la variación estacional de la evaporación debido al crecimiento de la vegetación	Se estima mensualmente.
Coefficiente de Recesión de Aguas Subterráneas (r)	Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde la zona saturada	En estaciones de aforo en las cuencas, el parámetro de recesión puede ser estimado usando técnicas de separación hidrográfica.

Parámetros	Descripción	Método de estimación
Parámetro de Percolación (s)	Controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas	Dependiendo de la formación geológica, los valores de percolación pueden ser muy variables

Fuente: Tomado del Manual “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos” de Moreda et al., 2014.

## 2.9 La base de datos analítica (ahd) de hydrobid

La Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) es una base de datos apoyada en un sistema de información geográfica (GIS) de aguas superficiales. Sirve como una plataforma espacial regional para integrar datos dispersos que se necesitan para apoyar los modelos de hidrografía regional. Provee un marco para la parametrización de modelos de una manera consistente, que provee la conectividad del flujo aguas arriba/aguas abajo necesarias para dichos modelos, y provee los datos necesarios para mostrar los resultados en forma gráfica.

La AHD tiene cuatro características claves que permiten el desarrollo y la implementación de herramientas de análisis de recursos hídricos en el contexto de su dinámica en una red hidrográfica; en la nota técnica: “base de datos hidrográficos para América Latina y el Caribe” presentada por: Rinner J., Bruhn M., Miralles -Wilhelm F., Muñoz R., las describen de la siguiente manera: “Provee un marco para la parametrización de modelos en una manera consistente, atributos descriptivos que proveen la conectividad del flujo aguas arriba / aguas abajo necesarias para dichos modelos, y provee la data necesaria para mostrar los resultados en forma gráfica” (Rineer, Bruhn, Miralles-Wilhelm, & Castillo, 2014)

Cada segmento fluvial en la AHD maneja información geográfica, como alturas máximas de las cadenas montañosas, valles, longitud de los cauces, pendientes y otras particularidades geométricas, que permiten al usuario obtener los datos necesarios para la caracterización física de la cuenca. Además, cada cuenca en la AHD puede ser relacionada

con datos basados en el área relevante a los modelos que se desarrollaran, por ejemplo, área, capa vegetal y uso de suelos, inclinación promedio, tipos de suelos predominantes y datos climáticos.

Este programa fue desarrollado en dos partes: América Central y América del Sur, ya que el Caribe está incluido principalmente en la parte de América Central. Según la nota técnica: “base de datos hidrográficos para América Latina y el Caribe” presentada por: Rinner J., Bruhn M., Miralles -Wilhelm F., Muñoz R. “Aproximadamente 37.000 cuencas y segmentos fluviales fueron creados en América Central. El área promedio de captación en América Central tiene aproximadamente 83 kilómetros cuadrados, y la longitud promedio de los segmentos fluviales es de 10 kilómetros. En América del Sur fueron creados aproximadamente 193.000 cuencas y segmentos fluviales. El área promedio de captación es de 92 kilómetros cuadrados, y la longitud promedio de los segmentos fluviales es de aproximadamente 11 kilómetros”. (Rineer, Bruhn, Miralles-Wilhelm, & Castillo, 2014)

La información de la Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe (AHDLAC), está basada en las imágenes satelitales de STRM de la NASA (RTI-HYDROBID, 2018).

Se puede trabajar de manera flexible y adaptable a cada necesidad de modelamiento. La AHD (Base de Datos de Hidrología Analítica) sigue el patrón del software NHDPLUS y de HydroSHEEDS, por lo que se puede utilizar un modelo de base vectorial en las que los atributos están representados como puntos, líneas y polígonos en vez de un ráster, en donde la data es almacenada en una celda “*grid*”, que permite, de esa manera, una aproximación a la realidad de los caudales, sus relaciones y la hidrografía. Esta base de datos se diferencia de las imágenes satelitales o de los mapas estáticos de hidrografía, porque la conectividad del sistema hidrológico está codificada en la data.

La AHD se deriva principalmente de un único conjunto de datos de elevaciones disponible a nivel global. Los segmentos fluviales y los correspondientes cauces contenidos en la AHD se desarrollan mediante un algoritmo automatizado utilizando solamente estos datos de elevaciones. Esto significa que los segmentos fluviales son derivados y no están



necesariamente ubicados en localidades reales tal como se encuentran en un mapa o una imagen satelital.

Estos datos se presentan en formato “*shape files*” para tener compatibilidad en el software QGIS, que trabaja con un sistema único de identificación de cuencas, mediante el uso de polígonos usando una codificación especial para toda Latinoamérica (COMID); realiza una interconexión entre cauces principales correspondientes a la misma cuenca, para comprender mejor el caudal y la relación entre subcuencas que aportan al cauce principal. También, contiene atributos descriptivos como: uso de tierras, tipos de suelos precargados para poder calcular mejor la curva de escurrimiento. Finalmente, tiene la opción de ingresar datos históricos como precipitaciones y temperatura para caracterizar hidrometeorológicamente el área de estudio, así realizar modelamientos más ajustados a la realidad de cada cuenca de estudio. Esto permite realizar modelos de balance hidrológico que incluyan eventos extremos como inundaciones, sequías, impactos ambientales y acción antropogénica como la construcción de embalses. (Rineer, Bruhn, Miralles-Wilhelm, & Castillo, 2014)

Este complemento viene en las carpetas de instalación del programa HydroBID, se llama AHDTTools. Para que este plugin sea activado en HydroBID se deben seguir los siguientes pasos:

1. Copiar AHDTTools en la carpeta de ejecución del QGIS
2. Reconocer AHDTTools en a la pestaña de complementos
3. Utilizar en los archivos tipo shapes que también fueron proporcionados en la carpeta de instalación del HydroBID.

## 2.10 Base de datos sqlite

SQLite es una biblioteca en lenguaje de programación tipo C que implementa un motor de base de datos SQL pequeño , rápido , autónomo ,confiable y con todas las funciones; es el motor de base de datos más utilizado en el mundo y está integrado en todos los teléfonos

móviles y la mayoría de las computadoras. Además, su código fuente es de dominio público por lo que puede ser utilizado para cualquier propósito.

Para el modelo hidrológico HydroBID, se tienen datos indexados de clima, uso de tierras, tipo de suelos; conjuntamente se puede rellenar esos datos de modo que el modelo sea fiel a la realidad, con datos observados en cada cuenca. Esta base de datos organiza, parametriza y relaciona la información que tiene la base de datos AHD mediante el COMID, que es un número asignado por esta herramienta informática. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014)

Otros usos populares del programa son: base de datos para Internet principalmente, teléfonos móviles, PDA, reproductores MP3, decodificadores; analizar grandes conjuntos de datos. Además, debido a que no requiere configuración y almacena información en archivos de disco normales, SQLite es una opción popular como base de datos para respaldar sitios web de tamaño pequeño a mediano. (Hipp, Wyrick & Company, Inc., 2020)

#### 2.11. El sistema de visualización geográfica qgis

El Quantum Geographic Information System (QGIS), QGIS es un sistema de información geográfica de código abierto. El proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como proyecto en SourceForge en junio del mismo año. Este software de uso libre maneja sistemas de información geográfica, los cuales se emplean como base en el software HydroBID para obtener modelos de la geomorfología de la zona de estudio, curvaturas, áreas, perímetros, entre otras características básicas de una cuenca. Además, se puede exportar los datos resultados para hacer curvas isométricas, área de captación, longitud del cauce principal y total de la red de flujo, así como otros mapas, mediante mallas de información. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014)

#### 2.12 Algunos métodos de relleno de datos

El relleno de datos es un procedimiento que se utiliza comúnmente para completar series que a falta del operador o fallas instrumentales contengan datos vacíos o erróneos, y

obtener series continuas con la mayor cantidad de datos posibles por medido de los datos de estaciones índices, que contengan los datos completos y que se seleccionan a partir de la distancia y la altitud, es decir, que estén lo más cerca posible y sean de altitud parecida a la estación en estudio.

Solo se deben emplear registros que presenten disponibles los valores de al menos un 80 por ciento de los años registrados y no falten los valores de más de tres años consecutivos. (Organización Meteorológica Mundial, 2018)

Existen varios métodos de relleno que pueden ser aplicados para precipitación y temperatura como:

### Promedio Aritmético

Es el resultado de sumar todos los valores que toma la variable en el conjunto y dividir esa cantidad entre el número de elementos del conjunto. Por definición, cada conjunto tiene sólo un promedio; es considerado el método más simple para obtener la precipitación media sobre un área empelando las cantidades de lluvia medidas en dicha área. Se aplica cuando la diferencia entre las mediciones anuales de las estaciones utilizadas en el promediado y la estación con los datos faltantes sea inferior al 10 por ciento. A continuación, se introduce parte de la simbología usada en el análisis estadístico y que permite generalizar los resultados, en cualquier caso (Moya de Madrigal, 1986).

Sea:

X = variable en estudio  
 N = número de elementos en el conjunto  
 $\mu_x$  = promedio aritmético de la variable en el conjunto total  
 $\Sigma$  = símbolo de sumatoria  
 $X_i = X_1, X_2 \dots X_N$  = los valores de la variable en los "N" elementos del conjunto.

Los subíndices: 1, 2, ... N simplemente señalan el orden del elemento en el conjunto.  
 Según esta simbología el promedio aritmético de una variable X se expresa así:

$$\text{Promedio aritmético } (\mu_x) = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} = \frac{\text{Suma de X desde } X_1 \text{ hasta } X_N}{N}$$

Ecuación 1 - Simbología del análisis estadístico. Fuente: Moya de Madrigal, 1986.

### Razón Normal

Según Guevara Díaz (2003), este método se fundamenta en el mismo principio que el método del cociente, pero en lugar de utilizar la razón del periodo concurrente, emplea la razón de los valores normales de tres estaciones próximas y distribuidas uniformemente alrededor de la estación cuyo dato se debe calcular; igualmente, considera promedios de precipitación y/o temperaturas anuales en periodos iguales y aplicable cuando los promedios anuales de la estación a rellenar difiere más de un 10 por ciento de los promedios anuales de alguna de las estaciones cercanas.

La expresión es:

$$X_j = 1/3 \left[ \left( \frac{\bar{X}}{\bar{A}} A_j \right) + \left( \frac{\bar{X}}{\bar{B}} B_j \right) + \left( \frac{\bar{X}}{\bar{C}} C_j \right) \right]$$

Donde:

$X_j$  es el dato a estimar en la estación  $X$

$\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$  y  $\bar{X}$  son las lluvias medias normales en las estaciones  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $X$

Ecuación 2 - Expresión de la razón normal. Fuente: Guevara Díaz,2003.

### Razón Q

Se aplica a pares de estaciones, en donde una tiene los datos completos y la otra no, para el mismo periodo de tiempo, por lo que la razón q entre los valores mensuales, anuales o medios, tiende a ser constante. Si se poseen dos estaciones, A y B, entonces la Relación Q puede obtenerse sumando los datos de cada estación y luego calculando la relación entre ellas. (RTI International, 2019). A través de la expresión:

$$Q = \frac{\sum B_i}{\sum A_i}$$

Donde,  
 $A$  = estación con datos completos  
 $B$  = estación con datos faltantes  
 $i$  = frecuencia temporal de las series

Ecuación 3 - Expresión de la razón Q. Fuente: RTI INTERNATIONAL,2019.

## Regresión y Correlación Lineal

Este método emplea el conocimiento o los datos de una estación con los registros completos que se considera la variable independiente para pronosticar o estimar la variable dependiente, es decir, la estación que deseamos rellenar, cuando previamente se ha establecido una relación lineal entre ambas por medio de una gráfica de dispersión y se determine que el grado de relación mediante el coeficiente de correlación,  $r$  es mayor a 0.8. (Hanke & Wichern, 2006).

Por medio de la expresión:

$$Y = mX + b \quad r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2][n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Donde,

$X$  = Medida de la estación base (con datos completos)

$Y$  = Medida de la estación que se desea completar

$m$  y  $b$  = Constantes de regresión

Ecuación 4 - Expresión Regresión y Correlación Lineal. Fuente: RTI INTERNATIONAL, 2019.

### 2.13. Métodos de evaluación de rendimiento

Los estadísticos que se describen a continuación son el conjunto que posee HydroBID en uno de sus módulos, que calcula estadísticas de calibración mediante la comparación de las series simuladas y las series de datos observados con el fin de evaluar el rendimiento del modelo. Para ello, estas deben contar con una serie de criterios tales como: los datos deben estar registrados en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), ambas series deben estar registradas con datos diarios, se debe contar con series completas de datos observados para el periodo que se evaluara, entre otros.

A continuación, se detallan los cálculos de estadísticas después de cada corrida del modelo que se describen en el Apéndice B: Estadísticas de Calibración de Hydro-BID de la nota

técnica “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos” preparado por: Moreda, Fekadu, Miralles-Wilhelm, Fernando y Muñoz Castillo Raúl. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014)

### 1. Generar el flujo promedio mensual

Para ambos flujos observado y simulado, los flujos mensuales promedios  $O(m, y)$  y  $S(m, y)$  se calculan según la siguiente ecuación (Ecuación 1). Donde “m” es el mes y “y” es el año, y “NDAYS” es el número de días en el mes.

$$O(m, y) = \frac{\sum_{t=1}^{NDAYS} O_t}{NDAYS_{my}} \qquad S(m, y) = \frac{\sum_{t=1}^{NDAYS} S_t}{NDAYS_{my}}$$

Ecuación 5 – Ecuación para generar el Flujo promedio mensual de la cuenca. Tomada de la nota técnica “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos” preparado por: Moreda, Fekadu, Miralles-Wilhelm, Fernando y Muñoz Castillo Raúl, 2014.

### 2. Error de volumen general (Overall volume error) (ove)

Este parámetro indica la media del porcentaje de error entre los caudales simulados y los observados. En la ecuación (Ecuación 2), donde “N” es el número de días de la simulación sin el primer año. El  $t=1$  comienza el primer día del segundo año de la simulación, para evitar el impacto de la condición inicial de la simulación del modelo.

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

Ecuación 6 - Error de volumen general de la cuenca. Tomada de la nota técnica “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio

Climático sobre los Recursos Hídricos” preparado por: Moreda, Fekadu, Miralles-Wilhelm, Fernando y Muñoz Castillo Raúl, 2014.

### 3. Error de Volumen Anual (Annual volume error) (ave)

Este parámetro indica la media del porcentaje de error entre los caudales simulados y los observados de cada año individualmente. Para el error de volumen anual se utiliza la misma ecuación (Ecuación 2), pero calcula para cada año por separado.

### 4. Error de Volumen Mensual (Monthly volume error) (mve)

Este parámetro indica la media del porcentaje de error entre los caudales simulados y los observados para cada uno de los 12 meses, se calcula el error de volumen mensual al agrupar los flujos del mismo mes de cada año, mediante la ecuación descrita anteriormente. (Ecuación 2).

## **Coefficientes de correlación**

Para tener una medida cuantitativa precisa de la correlación entre las variables se calcula un coeficiente de correlación. Los coeficientes de correlación se expresan por un número con varios decimales entre -1 y 1, donde -1 y 1 indican correlaciones perfectas, negativas y positivas respectivamente y 0 indica correlación nula. Es muy importante entender que una correlación, incluso alta, entre dos variables no quiere decir que la relación entre ellas es de causa y efecto. Esta solo indica que existe una relación matemática entre dos variables, no nos indica cómo interpretarla ni mucho menos sobre sus causas y efectos.

A continuación, se detallan tres de ellos, el coeficiente de Pearson, el Coeficiente de correlación modificado y el Índice de Eficiencia de Nash- Sutcliffe, (R<sup>2</sup>), este último es el más utilizado para describir el rendimiento de un modelo de simulación.

### **Coeficiente Pearson**

Es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas, es independiente de la escala de medida de las variables, es decir, son la expresión numérica que indica el grado de relación existente entre las dos variables y en qué medida se relacionan. (Dietrichson, 2019)

### **Coefficiente de correlación modificado (rmod)**

El índice propuesto por McCuen y Snyder en 1975 relaciona las mínimas y máximas desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas mediante la ecuación (Ecuación 3). Donde “ $\sigma_{obs}$ ” y “ $\sigma_{sim}$ ” son desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observados y simulados, respectivamente. (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Raúl, 2014)

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

Ecuación 7 – Coeficiente de correlación modificado. Tomada de la nota técnica “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos” preparado por: Moreda, Fekadu, Miralles-Wilhelm, Fernando y Muñoz Castillo Raúl, 2014.

### **índice de Eficiencia de Nash- Sutcliffe, R2**

El criterio de Nash-Sutcliffe es uno de los más usados en hidrología debido a que mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación por medio de la ecuación (ecuación 4). Si la simulación es perfecta, la eficiencia equivale a 1, si se intenta ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces  $E=0$ ; sin embargo, los resultados menores a cero indican que el valor medio observado es mejor predictor que el valor simulado. (Ortiz, 2020)

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

Ecuación 8 – índice de Eficiencia Nash- Sutcliffe. Tomada de la nota técnica “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos” preparado por: Moreda, Fekadu, Miralles-Wilhelm, Fernando y Muñoz Castillo Raúl, 2014.



## 2.14. Aplicación de herramientas de evaluación de los procesos hidrológicos

Análisis basado en la información revisada en fuentes bibliográficas, acerca del uso de herramientas informáticas en simulaciones hidrológicas en cuencas alrededor del país. Los estudios presentados son de aplicaciones como SWAT, IBER, HEC-HMS, entre otras. Además, se describen algunos casos de aplicación de HydroBID en varias cuencas hidrográficas de Colombia, Perú, Uruguay y Ecuador. En el siguiente cuadro (CUADRO II) se detallan los documentos y artículos revisados y se describe el resumen, los objetivos y las principales conclusiones de cada estudio.

CUADRO II INVESTIGACIONES BASADAS EN EL USO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN EN DIVERSAS CUENCAS DE AMÉRICA Y PANAMÁ

AÑO	RESUMEN Y OBJETIVOS	CONCLUSIÓN
2007	La investigación buscaba determinar con mayor confiabilidad los parámetros hidrológicos que influyen en el uso de los modelos hidrológicos empleados, para la estimación de los volúmenes de agua que se aporta a la cuenca del Canal de Panamá en situaciones propias de un bosque tropical húmedo; con el objetivo de desarrollar una base de datos de campo de variables hidrológicas básicas y calibrar el modelo <b>hidrológico Hydrus 2D/3D</b> en la zona no saturada, microcuenca experimental en cerro Pelado, Gamboa. (ACP; Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas UTP, 2007)	Se logró mejorar la comprensión del ciclo hidrológico en aspectos propios del trópico, y recopilar información, tanto desde el punto de vista técnico, como desde la óptica del establecimiento de políticas de aprovechamiento del recurso hídrico en la cuenca del Canal, así como mejorar el balance hídrico
2016	El estudio de factibilidad de actuaciones de mitigación de inundaciones en la cuenca baja de	Para crecidas en un tiempo de 100 años de periodo de

AÑO	RESUMEN Y OBJETIVOS	CONCLUSIÓN
	<p>Juan Díaz contempla el análisis, a nivel de prefactibilidad, de las actuaciones necesarias para la mitigación de los problemas señalados por medio del modelo hidrológico distribuido HEC-HMS y el modelo <b>hidráulico bidimensional InfoWorks ICM</b>, la estimación de las pérdidas del aguacero y de transformación de la lluvia neta a escorrentía. (Instituto de Hidraulica Ambiental de España, 2016)</p>	<p>retorno, se produce el desbordamiento del río en diferentes puntos, las mareas máximas alcanzan la Av. Domingo Díaz y la zona baja de Ciudad Radial, en especial Metro Park.</p>
2016	<p>El cálculo del balance hídrico y la determinación de valores de caudal ambiental utilizando los valores de salida generados del modelo <b>hidrológico SWAT</b> junto con la ecuación del balance hídrico descrita por UNESCO, así como los resultados para dos escenarios considerados; un escenario que corresponde a las condiciones existentes y un escenario que considera la reducción del caudal a partir de la subcuenca 6 de la cuenca hidrográfica de río Indio (111). El objetivo general del proyecto es contribuir a la gestión integral realizando los estudios científicos, ambientales y sociales necesarios, para determinar la oferta y demanda hídrica, el balance hídrico superficial y el caudal ambiental en esta cuenca. (Environmental Resources Management (ERM), 2016)</p>	<p>De acuerdo con los cálculos de este estudio, existe disponibilidad de agua en las subcuencas de río indio bajo condiciones existentes. Las subcuencas ubicadas al este de la cuenca 5 y 18, junto con la subcuenca 6 podrían verse impactadas por la presencia de nuevas demandas y/o proyectos. El caudal ambiental que se recomienda para esta cuenca oscilaría entre un 15por ciento y un 27por ciento para garantizar la demanda.</p>
2019	<p>El objetivo específico de este trabajo desarrollar con <b>Hydro-BID</b> un modelo que permita</p>	<p>De incorporarse nuevas plantaciones de eucaliptus en</p>

AÑO	RESUMEN Y OBJETIVOS	CONCLUSIÓN
	<p>determinar las aportaciones de agua en la Cuenca Alta del río Negro (Uruguay), considerando distintos escenarios futuros y comprobar si para un escenario en que la temperatura media aumente 1.3 °C, la incorporación de nuevas hectáreas de eucaliptus significará cambios en el ciclo hidrológico, siendo perceptibles en la evapotranspiración total El proceso de calibración y validación se ha realizado utilizando series temporales de caudal en cuatro estaciones de aforo del período 1995-2018. (Blanco &amp; Pascual-Aguilar, 2020)</p>	<p>la cuenca no pone en riesgo el cumplimiento de los caudales ambientales, tal como los define la normativa vigente. Sin embargo, en caso de que se manifieste un escenario climático por el que se incremente la temperatura media, sin que lo hagan las precipitaciones, la presión sobre el recurso puede ser importante.</p>
2019	<p>El estudio trata de la modelización de la cuenca 128, cuyo afluente principal es el Río La Villa en la región del Arco Seco de la República de Panamá mediante el programa <b>HydroBID</b>. Con el objetivo de familiarizarse con la descarga de datos hidrometeorológicos para trabajar con el sistema de modelado HydroBID y modelar una cuenca cuyos resultados permitan interpretar proyecciones climáticas para poder establecer escenarios hidrológicos futuros y establecer necesidades futuras; se emplearon 20 años de registros para calibrar y se seleccionaron 8 estaciones meteorológicas con datos de precipitación y temperatura. (Domínguez, 2019)</p>	<p>Los resultados muestran una proyección hidrológica hacia los años 2021-2041, con un escenario establecido al realizado previamente por expertos de Brasil y Costa Rica con el modelo Eta y CHIRPS, en el que indica que los volúmenes de agua en el río La Villa irán disminuyendo paulatinamente debido al incremento de la temperatura</p>
2019	<p>La presente investigación se concentró en modelar hidráulicamente el río Amojú a lo largo del tramo urbano de la ciudad de Jaén, Perú, a</p>	<p>las zonas con mayores áreas de inundación para un tiempo de retorno de 140 años y un</p>

AÑO	RESUMEN Y OBJETIVOS	CONCLUSIÓN
	<p>fin de identificar zonas de mayor probabilidad de inundación frente a fenómenos pluviométricos de gran intensidad. Se empleó el análisis de los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Amojú, se tomó como punto de salida el extremo del tramo efluente de la ciudad de Jaén y se realizó el análisis hidrológico aplicado a las intensidades máximas de precipitación de la Estación Meteorológica en Jaén, se empleó un periodo de retorno de 140 años, para concluir la simulación hidráulica utilizando el modelo <b>numérico bidimensional IBER</b>. (García Tocto, 2019)</p>	<p>riesgo admisible de 0.25, se encuentran en la zona 1 con 0.929 hectáreas inundables; zonas 2, con 0.482 hectáreas inundables; zona 5, con 0.504 hectáreas inundables; y la mayor área de inundación se encuentra en la zona 6, que corresponde al sector San Camilo con un área de inundación de 2.633 hectáreas.</p>
2019	<p>El proyecto evalúa la vulnerabilidad del recurso hídrico superficial de la cuenca del río Pamplonita ante escenarios de cambio climático, establecidos por el IPCC como Representative Concentration Pathways (RCP), los escenarios seleccionados fueron RCP 2.6, RCP 4.5 Y RCP 8.5 para los periodos 2015 a 2040, 2041 a 2070 y 2071 a 2100; del modelo de circulación global CCSM4, al que se le realizó la reducción de escala por medio de un método estadístico basado en la teoría del caos. Por consiguiente, se usó <b>Hydro-BID</b> para generar los caudales futuros y se analizó los impactos sobre el régimen hidrológico producido por el cambio climático, empleando el Índice de Regulación Hídrica (IRH), el IUA e IVH usando la metodología del ENA 2014,</p>	<p>se obtuvo como resultado que para los tres escenarios hay un posible aumento de la disponibilidad hídrica con respecto a los registros históricos, ya que los resultados de la simulación demuestran que el IRH es muy alto y el IUA alto, lo que indica que la cuenca tiene una vulnerabilidad media para los tres escenarios de cambio climático, donde se identificó como posible impacto la demanda exhaustiva del recurso hídrico por parte de</p>

AÑO	RESUMEN Y OBJETIVOS	CONCLUSIÓN
	donde se establecieron medidas de mitigación. (Castañeda & Ordoñez, 2019)	los municipios presentes en la cuenca.
2020	La investigación contempla el desarrollo de un plan de gestión del recurso hídrico de una microcuenca en la región interandina a través del modelamiento hidrológico utilizando el software <b>HYDROBID</b> , que permita utilizar una tendencia tecnológica para adoptar estrategias cuyo objetivo es proveer del recurso hídrico en cantidad y calidad dentro del área donde se desarrollan las comunidades y en especial las ubicadas en el callejón interandino. Mediante la realización de análisis fisicoquímicos, microbiológicos, aforos de caudales y una serie de datos que abarca el periodo de 2001 al 2010. (Guanquiza, 2020)	Se concluyó que la aplicación de HydroBID para modelos hidrológicos en una microcuenca interandina permite implementar medidas de adaptación al cambio climático, y adoptar medio de vida resilientes. El incremento poblacional resulta ser más influyente en la disponibilidad de agua que poseen las vertientes por tal razón el uso que se le dé es esencial para sostener el sistema de abastecimiento.

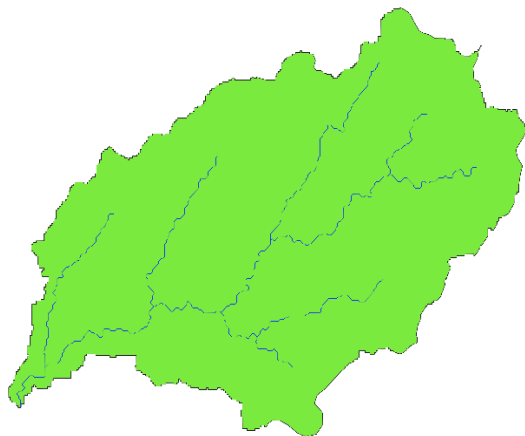
Fuente: Tomado de diversos documentos de investigación. Elaboración: Propia.

## 2.15. Subcuenca del río Chagres de la cuenca del canal de Panamá n.º 115

### 2.15.1 Ubicación

La subcuenca del Río Chagres (No. 115), posee extensión territorial de 44,893 ha, lo que representa alrededor del 45 por ciento de la superficie de captación del sistema del lago Alajuela. Nace en la cordillera de San Blas, aproximadamente a unos 609 msnm; y finaliza el drenaje en el lago Alajuela (ACP 2006a).

Ubicada entre las coordenadas geográficas 9°05' de latitud Norte y 79°41' de longitud occidental, en medio de la zona central e interoceánica del país, en su totalidad, se localiza



Elaboración: Propia. Fuente: CONAGUA

Figura 5 Mapa físico de la subcuenca del río Chagres.

Chico y Pequení, al Sur con las subcuencas de los ríos Piedra y Las Cascadas, al Oeste con el Lago Alajuela y al Este con el Parque Nacional Chagres.

en la provincia de Panamá, distrito de Panamá, en el corregimiento de Caimitillo y debido a que en esta se encuentra el parque nacional Chagres, solo se establecieron 6 comunidades de las cuales 1 es indígena (Comunidad Emberá Drúa o 260, Parara Purú, Tusípono) según censo del 2010.

Sus límites geográficos son:

Al Norte con las subcuencas de los ríos

### 2.15.2 Características Físicas

El diagnóstico técnico de la subcuenca del río Chagres - lago Alajuela establece que el río Chagres se caracteriza por presentar pendientes empinadas a lo largo de su recorrido y poseer poca capacidad de almacenamiento en sus valles. Además, señala que su drenaje es de tipo dendrítico, ya que posee una cantidad grande de afluentes secundarios que corren por cañones profundos hasta desembocar en él, tales como los ríos Chico, Limpio, Esperanza, Las Cascadas, Piedra, la quebrada Fea y quebrada Las Palmas, entre otros afluentes menores. Este patrón de drenaje es el más común en la Cuenca Hidrográfica del Canal; los ríos corren en forma paralela sobre rocas, formando amplias secciones que captan agua hasta el tercer orden de ramificación, descargando finalmente las aguas al lago Alajuela. La esorrentía estimada para la subcuenca del río del Chagres es de aproximadamente 2,996 mm.

### 2.15.3 Topografía

La subcuenca del río Chagres presenta elevaciones mínimas de 76 metros sobre el nivel del mar (msnm), en el sector del lago Alajuela y máximas de aproximadamente 1,000 msnm hacia las tierras montañosas en el nacimiento del río Chagres, con una pendiente

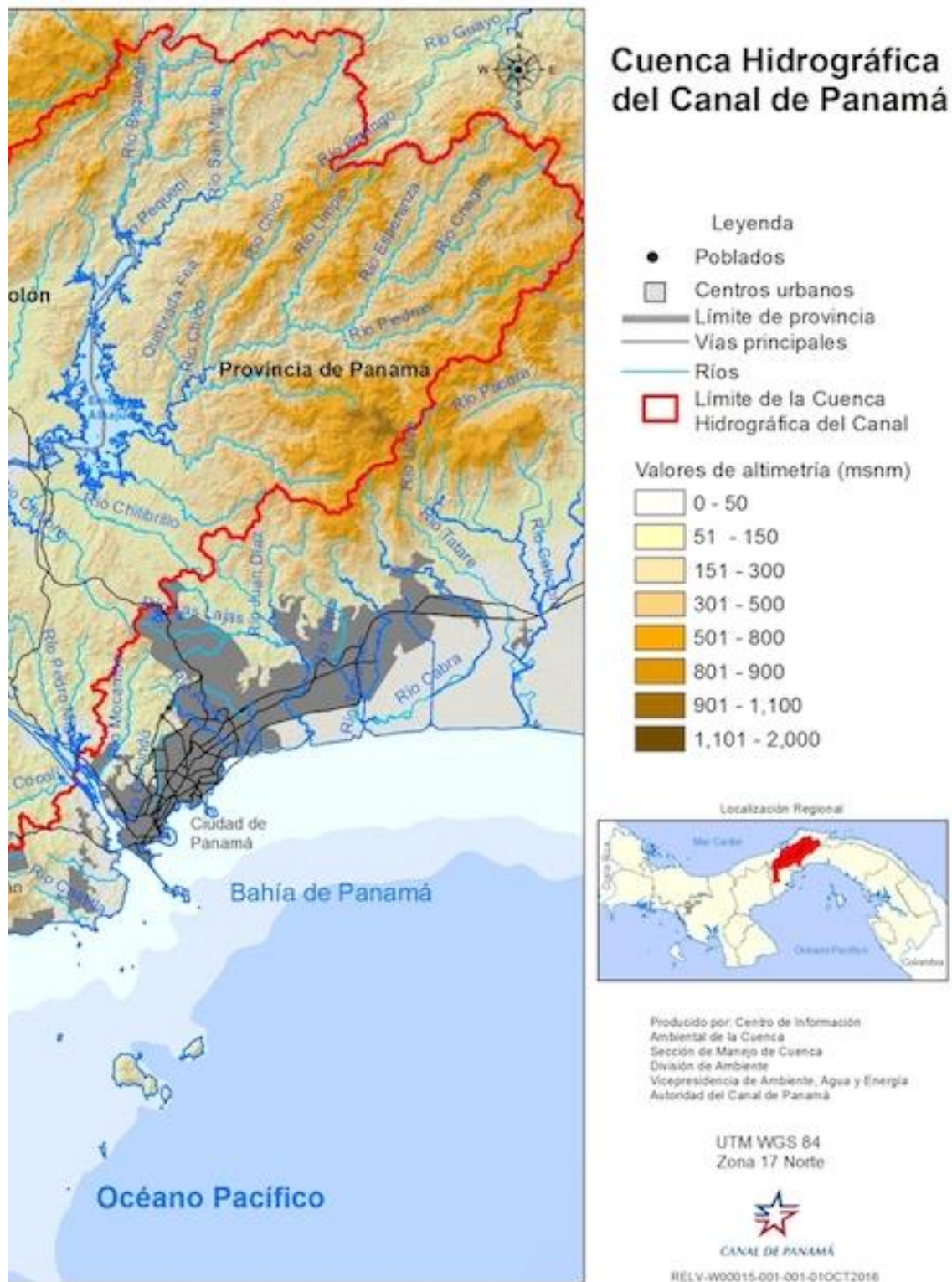
media de 55.9 por ciento. La topografía de la subcuenca se caracteriza por tener pendientes fuertes, rápidas y con cauces de corta longitud (URS 2004.). La misma, está conformada por un relieve de montañas (500- >1,000 msnm) que se encuentra hacia el norte de la subcuenca, en el nacimiento del río Chagres, con pendientes fuertes, inclinadas y abruptas, que presentan rangos mayores a 45 por ciento. El relieve de colinas (350-500 msnm), constituido por picos y cimas medianas, se localiza en las secciones medias de la subcuenca, con pendientes fuertemente inclinadas con un rango entre 20 a 45 por ciento.

Presenta el relieve de terrazas (70-350 msnm), que incluye las llanuras y colinas bajas en los alrededores del lago Alajuela, el cual es más estable que los relieves de colinas y montañas, presenta pendientes ligeras y medianas entre rangos de 8 a 20 por ciento (URS 2004; ANAM et al. 2005) (ver mapa) (FIGURA 6)

#### **2.15.4 Clima**

Con un clima tropical seco, según la clasificación de Köppen, se han identificado para la subcuenca tres tipos de climas:

**Clima tropical muy húmedo (Afi)**, presente principalmente en el sector norte de la subcuenca del río Chagres, con temperaturas medias anuales de 25.5 – 26.5°C y precipitaciones abundantes entre 3,000 a 4,000 mm y una estación seca corta de 4 a 10 semanas; **Clima tropical húmedo (Ami)**, es el clima predominante en toda la subcuenca del río Chagres y se caracteriza por presentar promedios anuales de temperatura entre 26.5 – 27.5°C en las tierras más bajas (0-200 msnm) y a medida que aumenta la elevación, la temperatura disminuye hasta 20°C a los 1,000 msnm. Se observa una precipitación elevada que oscila entre 2,500-3,500 mm, en las regiones bajas como en la desembocadura del lago Alajuela alcanza los 2,454 mm y aumenta hacia las tierras más altas, sobrepasando los 3,000 mm. El clima muestra una estación seca corta de 3 a 4 meses, siendo un poco más larga y acentuada en las montañas y los piedemontes; **Clima tropical de sabana (Aw)**, se manifiesta hacia la parte media de la subcuenca del río Chagres. La temperatura está entre los 27 - 28°C, con una precipitación total menor a los 2,500 mm, regularmente entre 1,000-2,000 mm, con una estación seca que puede durar entre 3 a 6 meses. (Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM), 2005)



Fuente: Centro de información ambiental de la cuenca del canal de Panamá, Autoridad del Canal de Panamá (ACP)

Figura 6 mapa 1:380000 de la altimetría de la subcuenca



### **2.15.5 Suelos**

La documentación existente de la cuenca abarca resultados de análisis de laboratorio que determinan que los suelos de la zona presentan características muy similares, tanto en textura como estructura, y una extrema pendiente; baja fertilidad; pobres en nutrientes; baja capacidad de retención de agua y una alta acidez. (Autoridad del Canal de Panamá, 2007)

En su mayoría, los suelos de la subcuenca son oxisoles, caracterizados por su coloración rojiza a pardo, arcillosos con profundidades de moderadas a profundas, con horizontes bien definidos y una buena permeabilidad. Hacia las partes bajas, se presentan suelos inceptisoles, los cuales son producto de depósitos aluviales con un mal drenaje. Por último, en las partes más altas de la subcuenca, se encuentran los suelos ultisoles, que son suelos ácidos de regiones húmedas que se desarrollan bajo los bosques, son de bajo contenido de materia orgánica, baja fertilidad y su primer horizonte es arcilloso, el cual es sometido a una intensa lixiviación, y propensos a la erosión (URS 2004)

De acuerdo con lo anterior, se ha determinado que, las principales limitaciones para el uso de los suelos en la subcuenca Chagres-Alajuela, están basadas en la fertilidad, topografía, drenaje interno y profundidad efectiva del suelo para el crecimiento radicular (Intercarib, S.A./Nathan Associates Inc. 1996, URS 2004).

Con relación a la capacidad de uso de suelo (URS 2004), probablemente más del 90 por ciento del terreno de la subcuenca Chagres-Alajuela es Clase VII. Estos son suelos no arables con limitaciones muy severas que pueden ser utilizados para bosques y tierras de reservas, se ubican hacia las partes altas y media de la subcuenca; en la parte baja de la subcuenca, se presentan suelos Clase V, correspondiendo a suelos no arables con poco riesgo de erosión, pero con otras limitaciones, aptos para bosques y pastos.

### **2.15.6 Uso de Suelo**

La mayor parte de la subcuenca Chagres-Alajuela se encuentra cubierta de bosques maduros, ubicados principalmente hacia las partes altas y medias de la subcuenca del río Chagres. Producto del establecimiento de asentamientos humanos y con ello la práctica de actividades agropecuarias, algunos pocos bosques maduros han sido intervenidos en el

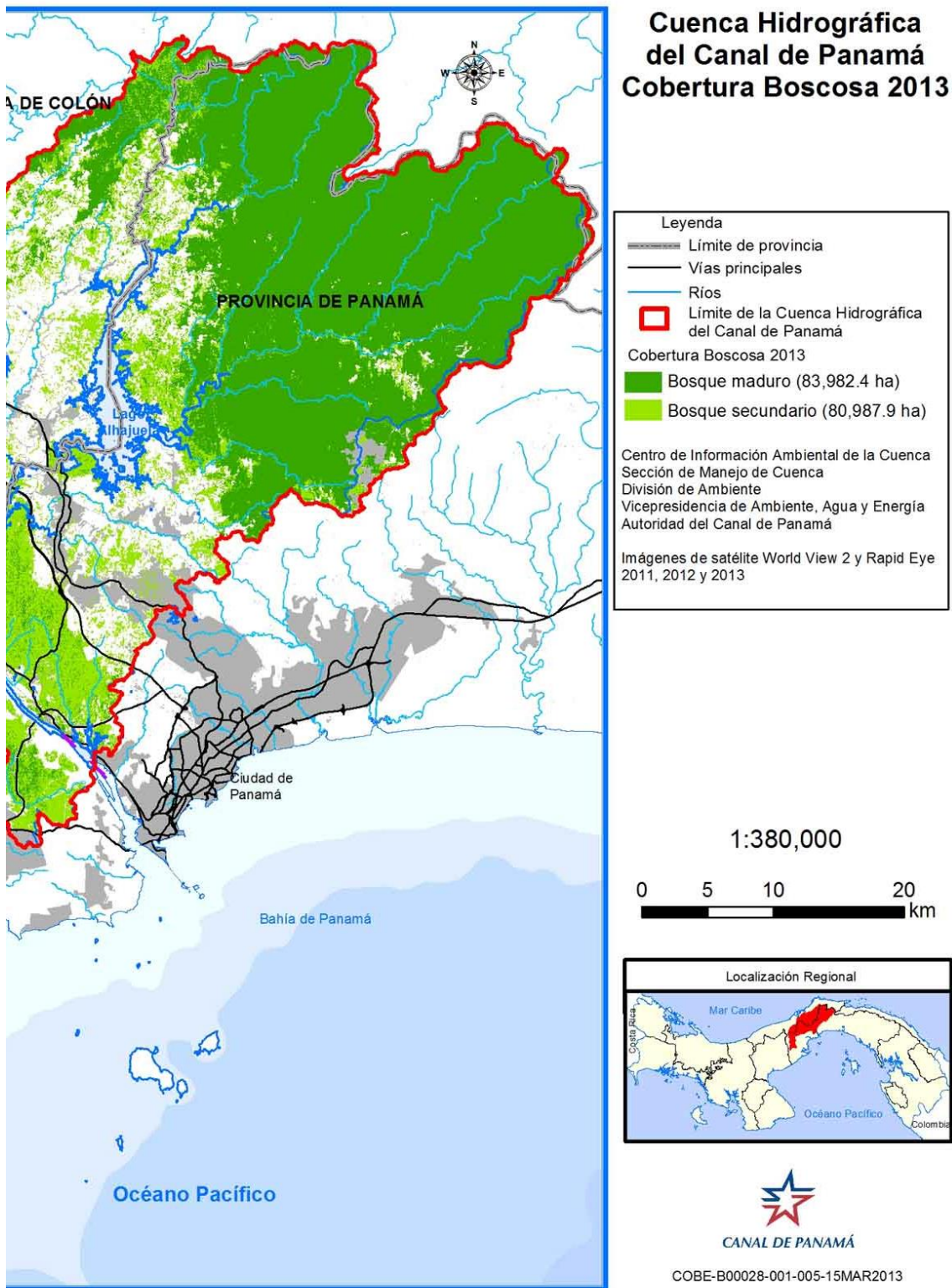
pasado, identificándose actualmente, como bosques secundarios en regeneración; también se presentan en baja proporción, zonas de rastrojo, áreas de cultivo y potreros; toda esta intervención se localiza, puntualmente, en la desembocadura del Chagres en el referido lago. (ver con mayor detalle en la FIGURA 7) (Intercarib, S.A./Nathan Associates Inc. 1996, URS 2004).

En 1984 se declaró toda la subcuenca como parte del Parque Nacional Chagres. En las zonas de asentamientos humanos, los suelos no son apropiados para la práctica de la agricultura, éstos son ácidos, bajos en fósforo, poseen poca materia orgánica y poca capacidad de retención de agua, además de encontrarse la mayoría en pendientes > 25 por ciento, por lo que después de la primera siembra, se convierten en improductivos; sin embargo, se tiene un uso agrícola, principalmente de subsistencia, con presencia de arroz, maíz, frijol, otoo, ñame, plátano, jengibre, café, achiote, entre otros. En cuanto a la producción pecuaria se produce ganado vacuno, porcino, gallinas de engorde y ponedoras, principalmente la ganadería extensiva a pesar de que los suelos tampoco se consideran aptos para esta práctica debido a sus características antes descritas. (URS 2004)

#### **2.15.7 Calidad ambiental**

La calidad de agua en el río Chagres es muy buena ya que según los registros presentados por el informe “agua y bosques en la cuenca del canal, tendencias de largo plazo” del 2018 presentado por la ACP, durante el periodo de muestreo, se mantuvo un índice de calidad de agua (ICA) del 66.7 por ciento en la categoría de excelente y el resto del tiempo (33.3 por ciento) en buena. La misma se caracteriza por ser alcalina (pH promedio=7.88) y presentar una apariencia transparente-clara (turbiedad promedio=3.4 NTU).

No se conoce de desechos líquidos o sólidos vertidos directamente, al río Chagres, que pudieran poner en riesgo la calidad de sus aguas. Sin embargo, a pesar de que la mayoría de las comunidades cuentan con letrinas, existe la posibilidad de que algunas de éstas no se encuentren en buenas condiciones y estén descargando sus aguas residuales a los ríos y quebradas. En el río Chagres, debido a la actividad turística, las propias comunidades indígenas no permiten arrojar desperdicios a las aguas del río y el uso de jabones o detergentes para el lavado de la ropa o de enseres domésticos es muy poco empleado por ellos. (ACP,2018)



Fuente: Centro de información ambiental de la cuenca del canal de Panamá, (ACP)

Figura 7 Mapa 1:380000 cobertura boscosa 2013 de la subcuenca

### **2.15.8 Características socioeconómicas**

La subcuenca del río Chagres cuenta con una población de 141 personas que residen en 6 comunidades, según cifras del Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2010. Su densidad poblacional aproximada es de 0.00000031 hab./Km<sup>2</sup>, siendo el promedio de habitantes por vivienda de 3.3 personas. Con relación a la localización de la población en la subcuenca, el mayor porcentaje reside en la comunidad 260 (45 por ciento), seguido de San Cristóbal (33 por ciento) y Filo de Mamey (nueve por ciento). Dentro de esta subcuenca, se han formado 2 Comités de acueductos; Dichos acueductos suministran el agua por gravedad a través de tuberías provenientes directamente de los ríos sin recibir, en la mayoría de los casos, ningún tipo de tratamiento. Los pobladores en su mayoría se autoidentifican como mestizos e indígenas. La educación tiene varios aspectos a considerar: el 11.3 por ciento de los habitantes de la cuenca no saben leer ni escribir; el acceso a educación básica es del 23.4 por ciento, sin embargo, el acceso al bachillerato es del 4.96 por ciento y el acceso a la educación superior del 0.7 por ciento. Cabe señalar que son datos del censo del 2010, ya que no se cuenta con datos actualizados. Durante el censo del 2010 en la cuenca se encontró un total de 42 viviendas y según las características, 8 poseen piso de tierra, lo que representa alrededor del 19 por ciento; en lo que se refiere a servicios básicos la mayor parte de la población dispone de estos, sin embargo, 23.8 por ciento no dispone de agua potable, el 14.3 por ciento de las viviendas no tienen servicio sanitario y el 69 por ciento carece de energía eléctrica.

En lo que respecta a la economía, el desarrollo de esta subcuenca está basada en la venta de los excedentes agrícolas, ganaderos, pesca, turismo cultural, venta de artesanías, venta de jornal y comercio minorista o al detal (CEPSA 2007). La agricultura, es considerada como la actividad económica predominante de los pobladores no indígenas de la subcuenca Chagres.

Otro factor importante que limita el crecimiento socioeconómico de la cuenca es la accesibilidad. La falta de caminos de penetración dificulta la comercialización de los productos e impide el suministro de facilidades de infraestructura, tales como: servicios públicos, escuelas y centros de salud.

Del 48.2 por ciento de la población en edad productiva, un 28 por ciento tiene algún nivel de ocupación en actividades agropecuarias ya sea ganadería o agricultura y el resto se encuentran actualmente desocupados. Entre los cultivos anuales que se producen están: granos básicos como el maíz, ñame, otoi, culantro, jengibre, achiote, plátanos, frijoles y algunas hortalizas. La ganadería es extensiva y de baja productividad. Otra actividad de importancia económica para las comunidades en la subcuenca es la pesca. Ésta, se realiza principalmente en el lago Alajuela, y es ejercida por la mayoría de las comunidades que se localizan a orillas del lago. (Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), de la Contraloría General de República, 2010) En el anexo 1 se encuentra desarrollada en mayor detalle, la información obtenida por el Censo XI Censo de Población y VII de Vivienda.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### 3.1 Materiales

##### **3.1.1 Localización del área de estudio**

La zona de estudio (Mapa 2) comprende las partes alta y media de la subcuenca del río Chagres y las unidades hídricas que le aportan agua y que se encuentran incluidos dentro de la denominada área protegida Parque Nacional Chagres (PNCh). Posee un área de drenaje aproximada de 44.893ha, su afluente principal es el río Chagres, cuya longitud de cauce es de 50.8 km hasta su desembocadura en el lago Alajuela. La precipitación promedio anual en esta cuenca es de 3 000mm aproximadamente.

Las características ambientales predominantes en la región interoceánica del Canal de Panamá indican un clima isotérmico (variación normal de la temperatura media mensual y la temperatura horaria menor de 5 grados). De igual forma es macro térmico, con temperaturas relativamente altas y medias por encima de los 25° C. (Intercaribe S. A.; Nathan Associates Inc, 1996)

Ubicada en medio de la zona central e interoceánica del país, en la provincia de Panamá, específicamente, en las coordenadas geográficas 09° 15' 49". y 9° 24' 35 de latitud Norte y 79° 30' 35"y 79° 21' 08 de longitud occidental.

##### **3.1.2 Recolección de información base**

La herramienta HydroBID requiere de series diarias de precipitación y temperatura media para cada cuenca hidrográfica. En el mapa (ver figura 7), se muestra el mapa de la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

La información climática utilizada incluye datos de estaciones climáticas y pluviométricas disponibles para toda la zona de estudio; esta información fue proporcionada por las instituciones ACP y ETESA.

###### **3.1.2.1 Precipitación**

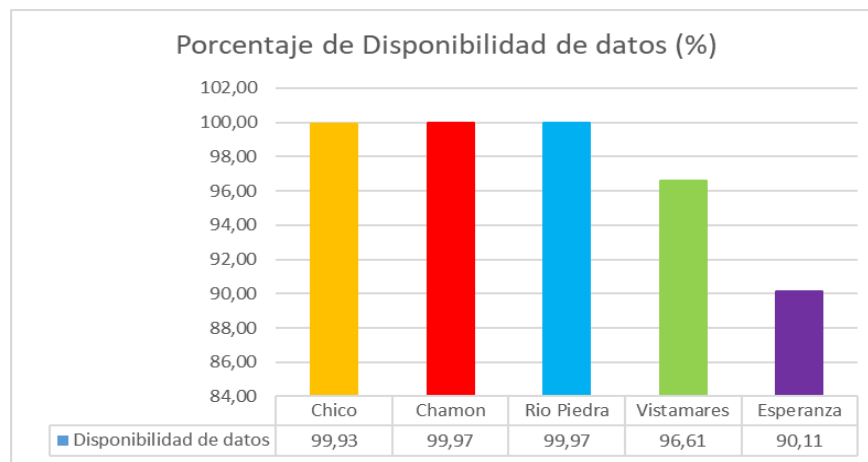
En esta investigación, se emplearon datos de 1 estación meteorológica y 4 pluviométricas

operadas por la ACP; lo que suma un total de 5 estaciones, las mismas que se describen en el CUADRO III. El periodo de datos disponibles en cada una de las estaciones se detalla en el grafico 1 y el porcentaje de datos diarios de precipitación disponibles de todas las estaciones mencionadas para el periodo 2000-2015 es de aproximadamente el 97.3 por ciento

CUADRO III DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Nº	OPERADOR	NOMBRE	CODIGO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA
1	ACP	CHICO	115-004	9,26333333	-79,50944444	104
2	ACP	CHAMON	115-107	9,28194444	-79,39944444	201
3	ACP	PIEDRAS	115-094	9,23722222	-79,40138889	969
4	ACP	VISTAMARES	115-103	9,40944444	-79,35249990	543
5	ACP	ESPERANZA	115-105	9,34138889	-79,31722222	640

Fuente: ETESA. Elaboración: Propia.



Fuente: ACP. Elaboración: Propia.

Figura 8 Porcentaje de disponibilidad de datos de las estaciones meteorológicas

### 3.1.2.2 Temperatura

Los datos de temperatura diaria para el periodo 2000-2015, fueron obtenidos de 4 estaciones

meteorológicas operadas por la ACP o la NASA, las mismas que se describen en el CUADRO III.

### 3.1.2.3 Datos Hidrológicos

La información hidrológica se recopiló considerando el periodo de datos disponibles y la posibilidad de delimitar subcuencas con estación hidrológica de cierre, quedando un total de una estación hidrológica, las mismas que se describe en el CUADRO IV. La ubicación de las estaciones hidrológicas utilizadas en el estudio se muestra en el mapa de la figura 7.

CUADRO IV LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN HIDROMETEREOLÓGICA SELECCIONADA PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Estación Hidrometereológica	Coordenadas geográficas		UTM	
	LATITUD	LONGITUD	X	Y
CHICO	9.263333	-79.509444	663694	1024242

Fuente: ACP. Elaboración: Propia.

Se recolectó y analizó la información histórica de las variables climatológicas de precipitación, temperatura y caudal, con el fin conocer mejor el clima actual del área del caso de estudio, así como la identificación de algunas condiciones naturales. En el cuadro se puede apreciar la información suministrada al modelo.

CUADRO V DATOS DE ENTRADA PARA LA HERRAMIENTA HYDRO-BID PARA CONDICIONES ACTUALES.

Tipo de datos	Fuente	Total, de información	Periodo disponible
Precipitación total diaria (mm)	información suministrada por la ACP	5 estaciones	2000-2015

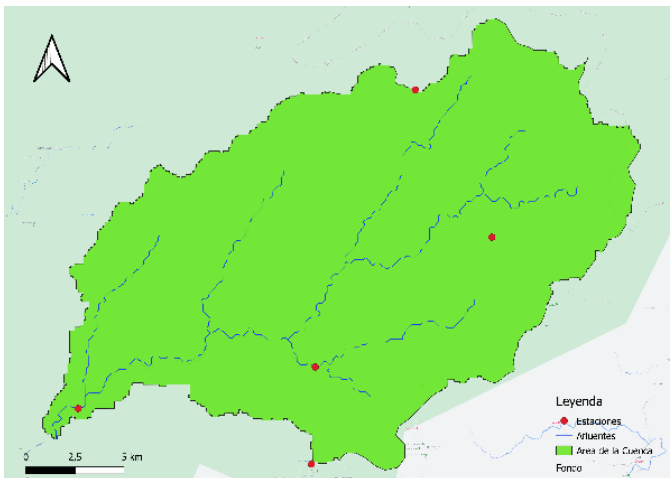


Temperatura media diaria (°C)	información suministrada por la NASA y ACP	4 estaciones	
Uso de la tierra	Base de datos AHD		
Tipo de suelo	Base de datos AHD		
Serie de caudales	información suministrada por la ACP	1 estación	

Fuente: ACP. Elaboración: Propia.

## 3.2 Metodología

### 3.2.1 Obtención de datos qgis



*Figura 9 Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas. Elaboración: propia. Fuente: ETESA*

Una vez instalado el complemento denominado “*AHD Tools*” en QGIS, este mostró en el menú principal del software, la serie de base de datos hidrográficos que permitió caracterizar los cauces, graficar la conectividad entre estas y delimitar la cuenca, ya que como se expresó anteriormente, el complemento posee

archivos *shape* georreferenciados de las cuencas y ríos de América. La

tabla de atributos con la conectividad de cauces (AHDFlow) y cada cuenca posee un número identificador denominado *COMID* mediante el cual se pudo seleccionar, el punto de cierre, que en este caso correspondió a la estación hidrológica “Estación Chico en el río Chagres” bajo el código 115-01-06, esta posee un caudal promedio de 36.0 m<sup>3</sup>/s que es el caudal de salida. Cabe destacar que es un poco mayor al área de drenaje de la estación debido a que la base de datos AHD Tools toma en cuenta el área completa de la subcuenca que contiene la estación hidrológica de cierre, o sea, el área aguas abajo de la estación hidrométrica en esa subcuenca.

Como se puede observar en el mapa 3, esta y el resto de las estaciones, se graficaron mediante la incorporación de las capas “*Shape*” estaciones climáticas y estaciones de caudal, “Climate-station.shp” y “Flow stations.shp,” respectivamente. En el ANEXO 2 se puede apreciar un mapa creado por la ACP, a mayor escala con el que se aprecia con mejor detalle la distribución de las estaciones en la subcuenca.

### 3.1.1. Organización del material

Una vez descargados los datos históricos meteorológicos e hidrológicos que se utilizarían, se acomodaron para su entrada al modelo en un archivo Excel separado por comas por cada estación, en dos columnas, una para la fecha en formato dd/mm/aaaa, y la otra con el dato en sí, precipitación (cm), temperatura (°C) o caudales (m<sup>3</sup>/s), se organizaron en subcarpetas y estas se agregaron en una sola carpeta como lo requiere el programa.

### 3.2.2. Depuración de la información base

La confiabilidad de los resultados de la simulación y que tanto esta logre representar la realidad, depende de la calidad de datos de entrada al modelo, por lo que se realizó un proceso de depuración de la información base por medio de un análisis estadístico en el que se pudo identificar la calidad y cantidad de datos faltantes.

Este proceso de depuración conllevó el análisis de las series de datos de precipitación y temperatura en toda el área de estudio, una homogeneización, relleno y finalmente se realizó la interpolación.

### **Homogeneización y relleno de datos**

En este trabajo, se recopiló la mayor cantidad de datos diarios disponibles para el periodo de 2000-2015, de las estaciones ubicadas en la zona de estudio. Posteriormente, se realizó una homogeneización y relleno de los datos faltantes de las estaciones usando la metodología de la Razón Normal, la cual no solo es el método más simple, sino uno de los recomendados por la bibliografía especializada, donde se interpola con un mínimo de tres estaciones cercanas y

uniformemente espaciadas con respecto a la estación en estudio o punto de interés que se quería completar.

### **Interpolación espacial de datos**

Además de la homogeneización detallada anteriormente, se realizó una interpolación espacial, para minimizar los errores causados por el relleno. Por medio del módulo de interpolación que utiliza la metodología IDW integrado en HydroBID, con esto se generaron los datos interpolados de precipitación y temperatura para cada una de las microcuencas almacenadas en la AHD dentro del área de estudio. En este módulo, se ingresaron los datos de la subcuenca Chagres de la cuenca del canal (N°115) y las estaciones de estudio. Como resultado, de la interpolación, se obtuvo una nueva base de datos que contiene valores de precipitación y temperatura diarios para el periodo de estudio (2000-2015).

#### 3.2.3. Simulación hidrológica

La simulación hidrológica en HydroBID consistió en el cálculo de los flujos de salida de la cuenca hidrográfica mediante un balance hidrológico. La cuenca se definió y delimitó mediante la AHD, se identificó el periodo de datos disponibles de caudal para calibrar y validar el modelo y se realizó una corrida de prueba con los datos de entrada para asegurar el correcto funcionamiento del programa. Posteriormente, se evaluó la calibración y validación mediante parámetros estadísticos.

### **Delimitación de las cuencas de calibración**

HydroBID trabaja en conjunto con el programa, QGIS para delimitar las cuencas y redes de drenaje para la simulación. En el programa QGIS, se instaló las herramientas AHD para observar el drenaje aguas arriba de una estación hidrométrica. Tomando en cuenta las estaciones hidrológicas presentadas en el CUADRO IV, se delimito la subcuenca que tienen su punto de cierre en esa estación

### 3.2.4. Calibración y validación del modelo

Para estimar los parámetros óptimos del modelo con el fin de asemejar los resultados con los datos observados, se realizó el proceso de calibración. Seguido, para determinar si el modelo era capaz de simular con precisión en otro periodo de tiempo, se prosiguió con la validación por medio del uso de los parámetros calculados en la calibración en un periodo distinto (2011-2015).

La etapa de calibración del modelo se desarrolló variando cada uno de los siete parámetros contenidos en Hydro-BID dentro del rango establecido hasta obtener el valor óptimo, por el método de ensayo y error, las características y rangos de los parámetros de calibración que utiliza el modelo HydroBID son los que se detallan en el CUADRO IV Cabe resaltar que esta calibración del río se llevó a cabo para el periodo incluido desde 2000-2010, el mismo que representa 2/3 del periodo total como lo sugiere el Manual “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos”

### 3.2.5. Evaluación de la calibración hidrológica

HydroBID contiene un módulo que calcula estadísticas de calibración mediante la comparación de las series simuladas, con las series de datos observados, con el fin de evaluar el rendimiento del modelo. Las estadísticas que se utilizaron en este trabajo son las que se detallan en el apartado *2.13 Métodos de evaluación de rendimiento*.

El Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe es la medida más usada para describir el rendimiento, sin embargo, con ella se muestran los resultados del coeficiente de correlación modificado y la fórmula del coeficiente de correlación  $r$ , sin embargo, cabe resaltar que éste es un parámetro sensible a los valores atípicos y menos sensibles cuando se presentan diferencias proporcionales entre los datos medidos y los resultantes del modelo.

### 3.2.6. Escenarios de cambio climático

Según el Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático (IPCC), existen varios escenarios para analizar los efectos del cambio climático. Los escenarios RCP o trayectorias de concentración representativas en español. Son escenarios que incluyen series de tiempo de emisiones y concentraciones del conjunto completo de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo / cobertura del suelo (Moss & Babiker, 2008)

Se plantearon 4 diferentes escenarios basados en niveles de afección de los GEI: un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con emisiones de GEI muy altas (RCP8.5), (Díaz, G. & Suárez, R., 2019); de los cuales se seleccionaron 2 para el desarrollo de este estudio

- RCP 2.6: Es un escenario de disminución. Asume una reducción sustancial de las emisiones de GEI a lo largo del tiempo para lograr su forzamiento radiactivo en el 2100. La temperatura probablemente no va a exceder los 2°C.
- RCP 8.5: es un escenario de incremento de las emisiones a lo largo del tiempo denominado como pesimista. La temperatura probablemente no excede los 4°C.

Hydro - BID incluye una herramienta para la implementación de simulaciones para el análisis de escenarios de cambio climático, esta herramienta permite incluir variaciones de precipitación y temperatura de totales o mensual mediante tres parámetros a tomar en cuenta: ajuste de temperatura, multiplicador de precipitación y ajuste de precipitación.

Se seleccionó la opción de variación total o anual tomando como referencia las variaciones que se presentarían para América central en los dos escenarios seleccionados, el incremento de la temperatura en un mínimo de 1.5°C hasta 3.5°C y cambios en los niveles de precipitación de entre un -22% y un 7% para el 2050.

Basados en los dos escenarios de cantidad de emisiones de GEI, se plantearon 3 escenarios distintos de como las variables temperatura y precipitación se verían afectadas:

- Escenario 1 (RCP 2.6a): en donde el **incremento de la temperatura será de 1.5°C y la precipitación disminuirá en un 7%**.
- Escenario 2 (RCP 2.6b): en donde la **temperatura incrementara en 1.5°C y al contrario del escenario anterior la precipitación incrementaría en 7%**.
- Escenario 3 (RCP 8.5): La **temperatura incrementará en un máximo de 3.5°C y la precipitación será un 22% menos** en comparación con el escenario actual.

## 4.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Corrida información

CUADRO VI INFORMACIÓN GENERAL DE LA MODELACIÓN DE HYDROBID

Nombre de la Corrida	RIO CHAGRES
Área de Captación	COMID ARRIBA “212656100”
Fecha de inicio de la simulación	01/01/2000
Fecha de finalización de la simulación	31/12/2011

\*El primer año se considera como periodo de calentamiento.

Fuente: HydroBID. Elaboración: Propia.

Organizada la información hidro climatológica, se verificó la cantidad de datos faltantes en el periodo indicado, entre el 1 de enero del 2000 y el 31 de diciembre de 2015, en el que se obtuvo como resultado que, de las 5 estaciones de precipitación 1 contaba con datos faltantes menores al 5% e inclusive algunas de estas con datos faltantes menores al 1%, por lo que se complementaron con el promedio aritmético mensual de cada estación, con el fin de no afectar la estacionalidad climática de la zona. La estación restante, se complementó mediante el método de la Razón Normal con las estaciones Chico, Chamón y rio Piedras que, presentaron la menor cantidad de datos faltantes y en comparación con las demás estaciones, tenían una mejor correlación con valores de  $R^2$  por encima de 0,5.

Con respecto a la estación de caudales, se seleccionó el periodo de estudio basado en los años con series completas de caudales por lo que no hubo necesidad de realizar relleno de datos para esta estación.

Una vez complementados los datos de cada estación, se aplicó la metodología de Doble Masa, graficando la serie de datos diarios acumulados de precipitación de las estaciones de la cuenca; en donde, se pudo evidenciar que las series históricas de las estaciones de la cuenca son homogéneas y confiables para su utilización en la modelación con Hydro-BID como se detalla más adelante.

En el caso de los datos de temperatura media diaria obtenidos, algunos estaban incompletos, los cuales fueron igualmente complementados con la media aritmética de la serie de cada mes considerando que la variación media mensual e incluso anual, en cada estación es

mínima por lo que, las temperaturas medias en las estaciones son prácticamente constantes, esto debido a la condición isotérmica comprobada de la región.

#### 4.2 Calibración y validación del modelo hydro-bid

Los 7 parámetros hidrológicos que se variaron para realizar la calibración fueron: Numero de Curva (NC); Contenido disponible de Agua (AWC); Coeficiente de Recesión (r); Coeficiente de Percolación (s); Factor de ET en Temporada de Cultivo; Factor de ET en Temporada Latente, las características de cada uno de estos se describen en la sección 2.7 en el CUADRO I. Los resultados de estos son los presentados en el CUADRO VII

CUADRO VII RESUMEN PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN EN LAS CUENCAS

Parámetro	Valor calibrado
	Cuenca del río Chagres
Numero de Curva	0.9
Contenido disponible de Agua	1.0
Coeficiente de Recesión	0.11
Coeficiente de Percolación	0.10
Factor de ET en Temporada de Cultivo	0.05
Factor de ET en Temporada Latente	0.05

Fuente: HydroBID. Elaboración: Propia.

Para efectos de la simulación en Hydro-BID es muy importante calibrar bien cada cuenca, dado que pequeñas variaciones en los parámetros representaban un gran cambio en los caudales simulados. Por lo que, los resultados se obtuvieron luego de 17 simulaciones variando los parámetros de ajuste de manera manual.

Debido a la naturaleza de la investigación, se llevaron a cabo los análisis centrándose en el comportamiento de las series mensuales generadas, las métricas de desempeño que se describen en la sección 2.13 con base en los parámetros de calibración validación de Hydro-BID dieron como resultados los valores que se observan en el CUADRO VIII.

CUADRO VIII ESTADÍSTICAS GENERALES DE FLUJO

Estadísticas	Valores
Error general de volumen	-0.99
Coeficiente de Correlación	0.92
Correlación Modificada	0.89
Coeficiente de Nash- Sutcliffe	0.84

Fuente: HydroBID. Elaboración: Propia



Como se puede observar en el CUADRO VIII, las métricas de desempeño obtenidas en el proceso de calibración se encuentran cercanas al rango optimo, puesto que en el manual de Hydro-BID, se menciona que un valor de volumen general de error cercano a 0 se considera optimo y satisfactorio. Como se menciona en las secciones anteriores el índice de Nash-Sutcliffe es el más empleado para comprobar si el predictivo es aceptable, el rango obtenido se considera “Muy Bueno” ya que se encuentra dentro del rango de ( $> 0.75$ )

Por otro lado, a pesar de que el índice de correlación se ve muy afectado por las diferencias proporcionales entre los datos medidos y los resultantes del modelo los valores, muestran una relación del 0.92 es decir muy buena por encontrarse dentro de los rangos que expresa el manual.

#### CUADRO IX FLUJOS MENSUALES PROMEDIOS

Flujos Mensuales Promedios			
mes	Observado (m <sup>3</sup> /s)	Simulado (m <sup>3</sup> /s)	Error general de volumen (%)
enero	24.93	21.7	-12.96
febrero	15.38	15.98	3.9
marzo	13.63	13.74	0.81
abril	18.2	19.23	5.67
mayo	20.02	30.44	8.63
junio	20.04	33.64	19.94
julio	33.04	38.48	16.49
agosto	38.9	37.92	-2.52
septiembre	31.69	33.64	6.14
octubre	35.36	36.5	3.24
noviembre	70.37	56.74	-19.36
diciembre	70.04	63.74	-9

Fuente: Hydro-BID

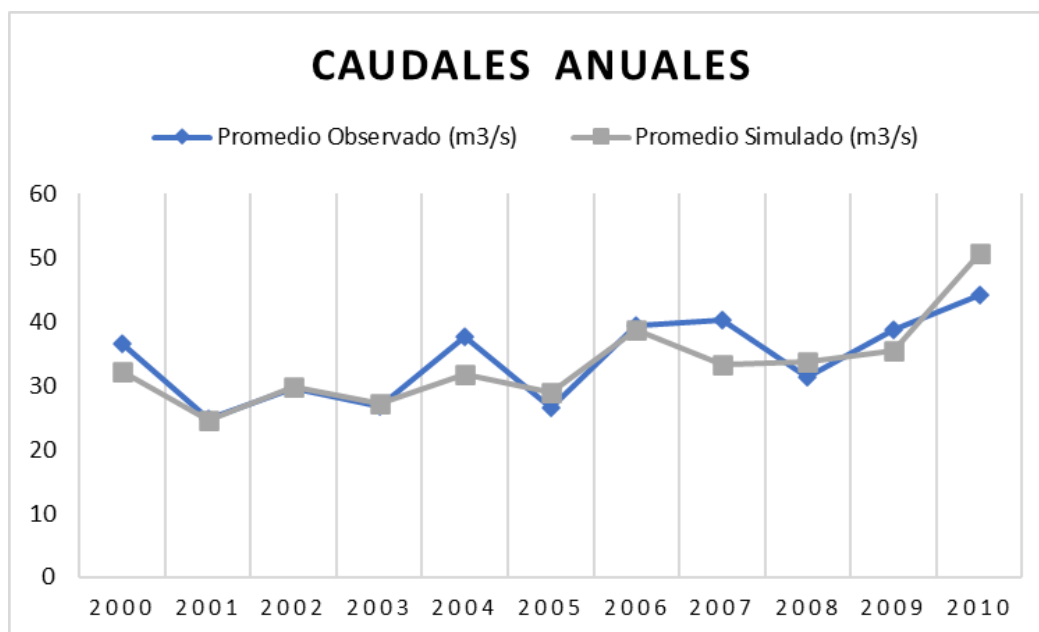
En el CUADRO IX, se observan caudales mensuales de descarga de la cuenca, y una comparación en porcentaje del error entre los resultados observados y los simulados dentro del modelo. Aunque el error indique sobreestimación en los meses de febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, septiembre y octubre y subestimación de los caudales de enero, agosto, noviembre, diciembre, el valor de error de calibración y validación permite seguir con el análisis de datos.

CUADRO X FLUJOS ANUALES PROMEDIOS

Flujos Anuales Promedios			
Año	Promedio Observado (m3/s)	Promedio Simulado (m3/s)	Error general de volumen (%)
2000	36,57	32,18	-11,99
2001	24,78	24,53	-1,02
2002	29,61	29,8	0,65
2003	26,86	27,22	1,36
2004	37,56	31,77	-15,42
2005	26,6	28,93	8,78
2006	39,32	38,81	-1,3
2007	40,25	33,31	-17,24
2008	31,37	33,84	7,86
2009	38,67	35,46	-8,28
2010	44,19	50,65	14,63

Fuente: Hydro-BID

En el CUADRO X se observan los caudales anuales de descarga de la cuenca, y una comparación en porcentaje del error entre los resultados observados y los simulados dentro del modelo. Reflejados en el gráfico (FIGURA 8), en ambos promedios se puede apreciar que durante los años 2001 y 2005 hubo menor cantidad de agua en los cauces y en el año 2010 se presentaron las mayores crecidas dentro del período analizado.



Fuente: Hydro-BID. Elaboración: Propia

Figura 10 Balance hídrico, caudales anuales

CUADRO XI EPISODIOS FRÍOS Y CÁLIDOS POR TEMPORADA

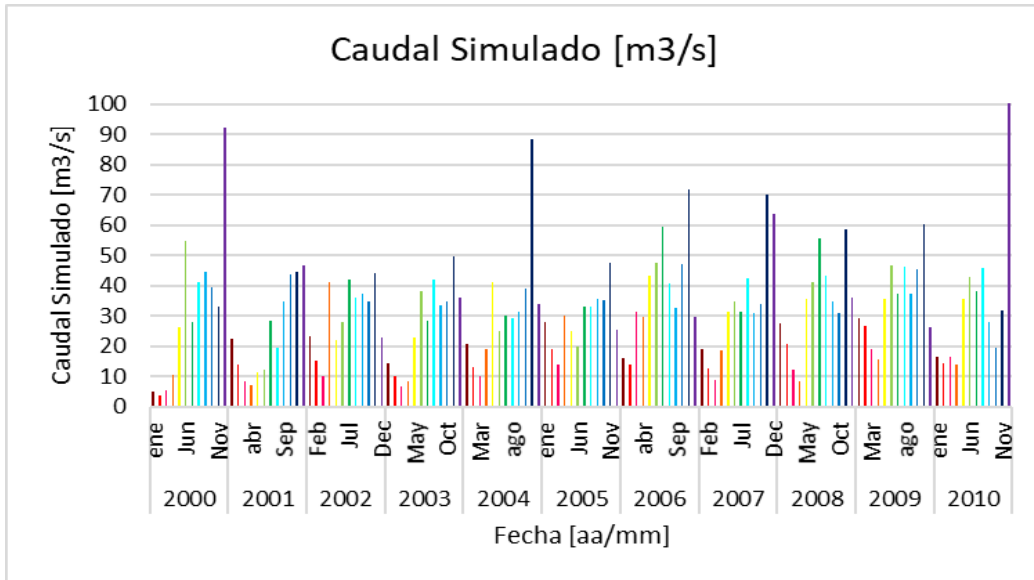
EPISODIOS FRÍOS Y CÁLIDOS POR TEMPORADA												
Años	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6

Descripción: Enero (E), Febrero (F), Marzo (M), Abril (A), Mayo (M), Junio (J), Julio (J), Agosto (A), Septiembre (S), Octubre (O), Noviembre (N), Diciembre (D). Los períodos cálidos (rojo) y fríos (azul) basados en un umbral de +/- 0.5°C para el Índice de Niño Oceánico (ONI), es calculado a partir de la media móvil de tres meses consecutivos de las anomalías de la temperatura superficial del mar.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA)

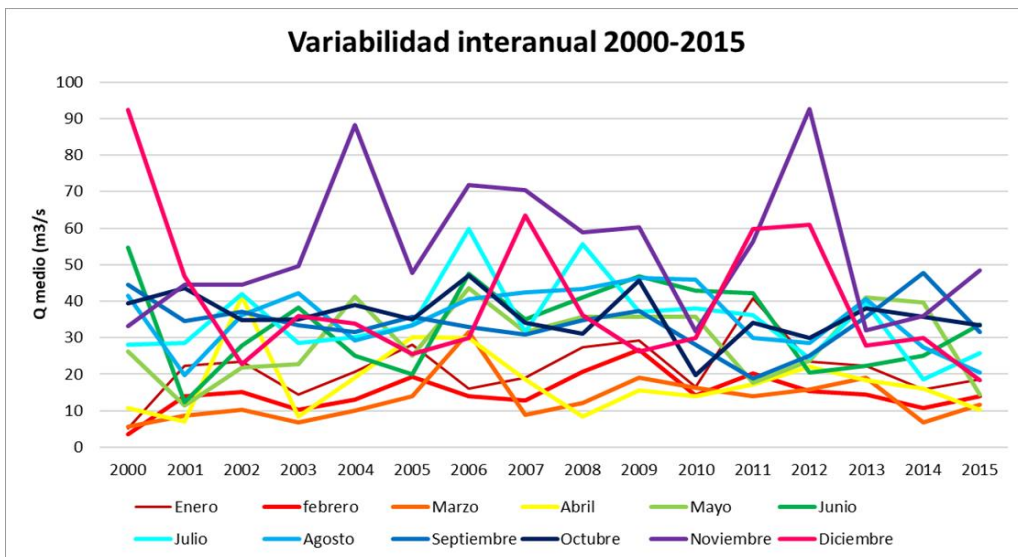
A su vez se representa visualmente el porcentaje de error general de la simulación, en el que debemos tener en cuenta para su análisis que el programa posterior a su ajuste resultó en la sobrestimación de los meses junio y julio, y subestimación en los meses de noviembre, diciembre, enero. En los flujos anuales promedios los años con mayor subestimación son el 2004 y 2007, siendo este último el que presentó una diferencia aproximada de menos siete metros cúbicos por segundo (-7 m<sup>3</sup>/s), la subestimación puede ser la respuesta de la herramienta ante el cambio en los patrones de precipitación y el incremento de la temperatura que genera el fenómeno meteorológico extremo conocido como El Niño que se presentó en esos dos años, y que como se muestra En el CUADRO XI, los meses noviembre y diciembre son en los que ocurre mayor subestimación de la simulación por parte del programa y en la misma temporada (octubre, noviembre, diciembre) según la NOAA se registró un incremento en la temperatura de 0.7°C (CUADRO XI) por lo que el programa podría estar acentuando las bajas precipitaciones o incrementando la evapotranspiración en esos periodos de manera que los caudales disminuyen más que en la realidad; mientras que, en el 2010 se sobreestimó el caudal en un 14.63 por ciento, como consecuencia de la tormenta estacionaria que se presentó en el mes de diciembre de dicho año en donde se registró la mayor cantidad de lluvia caída en 24 horas en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá. Siendo esta variación la más fácil de identificar en el gráfico, en ese mismo periodo se registra una disminución en la temperatura partiendo del periodo mayo, junio, julio hasta finales de año, por lo que los registros de junio y julio de este año se podrían estar sobreestimando por aproximadamente 19% y a pesar de las subestimaciones de noviembre en 19%, el mes de diciembre solo presenta una subestimación del 9% del cauce real, por lo que esta puede ser la razón por la que la herramienta resulte en una subestimación para ese año; es decir, la tormenta “La Purísima” del 2010 y mayor sobrestimación de los parámetros conllevan a una sobrestimación del caudal simulado con respecto al comparado.

El programa basado en los datos anteriores genera gráficos de relación como el que se aprecia en el gráfico (FIGURA 11). Lo primero que se observa es la estacionalidad de los ríos, los meses con menor caudal son: enero, febrero, marzo y abril, y los meses con mayor caudal en los cuerpos hídricos son: junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, este comportamiento se puede relacionar con el periodo de mayores precipitaciones en la cuenca o la estación lluviosa. demostrando el comportamiento bimodal en la cuenca.



Fuente: Hydro-BID. Elaboración: Propia

Figura 11 Caudal simulado (m3/s)



Fuente: Hydro-BID. Elaboración: Propia

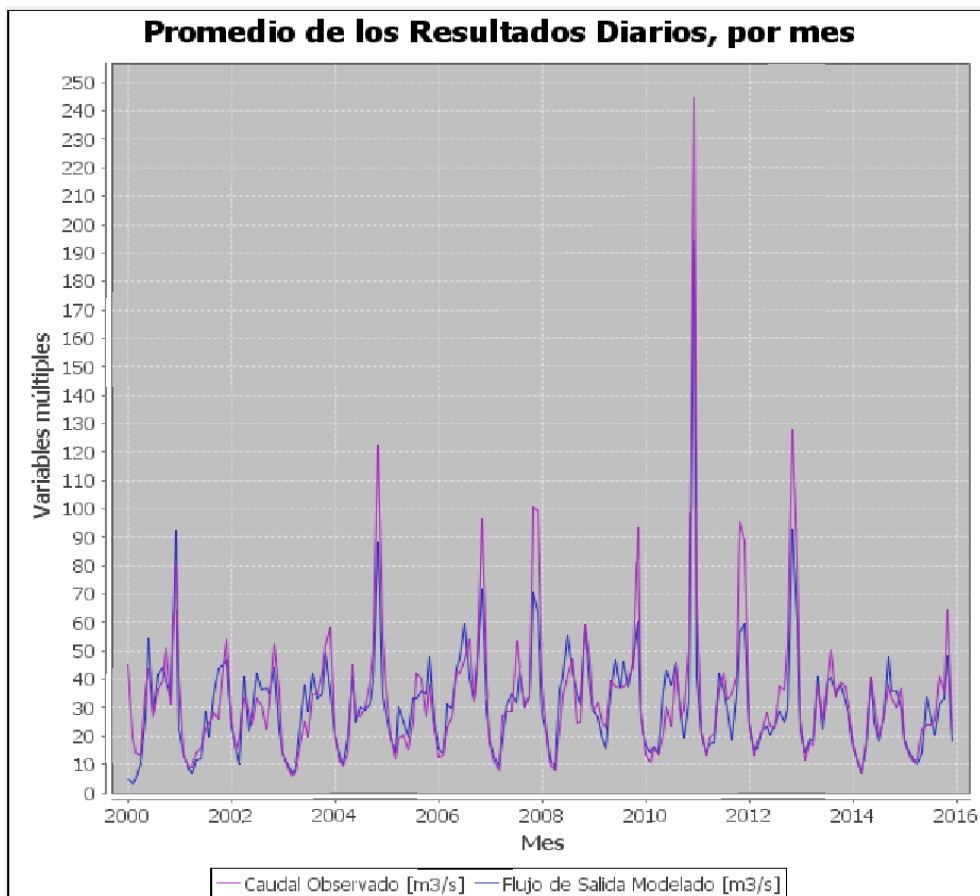
Figura 12 Variabilidad interanual en el periodo del 2000-2010

En el gráfico (FIGURA 12) se aprecia una variabilidad interanual durante los periodos del 2000 al 2015, en el que no se observa evidencia de cambios significativos en el flujo en el conjunto de datos, por lo que sería conveniente incrementar el periodo de análisis. Sin embargo, el comportamiento habitual de cada mes varia en algunos años como abril donde en el 2002 el caudal llego a alcanzar 40 m/s cuando el promedio generalmente es 20 m/s. los caudales del mes de mayo van en aumento desde el año 2000 hasta el 2006, donde a partir de este año decaen; al contrario de lo que sucede en el mes de diciembre que el año 2000 fue en el que se registró mayor caudal debido a una crecida extraordinaria producto del incremento de la precipitación cercana a los 100 mm/día durante el periodo del 28 al 31 de dicho mes; cuando su comportamiento habitual es el que se presenta en el resto de los años del registro valores aproximados de 25 m/s o como el periodo 2006-2007 donde vuelven a elevar sus caudales pero sin lograr superar crecida inicial. El comportamiento de octubre y marzo es parecido con respecto a los años en que se registran los aumentos o disminuciones, con la diferencia que en el primer mes se registran valores mucho mayores que en el segundo. Por último, algunos meses como enero, febrero y septiembre mantienen un comportamiento sin picos ni valles significativos ya que presentan caudales similares durante los 15 años de periodo.

En la gráfica (FIGURA 13) se puede apreciar que el modelo tiende a simular los caudales mínimos, pero no representa adecuadamente los flujos altos. En la calibración, se redujeron un poco las pérdidas por infiltración, con el fin de aumentar el volumen de escorrentía e igualar los picos altos de caudal que se dieron a mediados del 2001, 2005, 2007, 2008 y 2010 pero esto ocasionaba también el aumento de los caudales bajos. A la vez, se modificó el coeficiente de recesión y el contenido disponible de agua para controlar la escorrentía y tener mayor impacto en los caudales bajos, sin embargo, en algunos casos, como a inicios del 2006 y en el 2010, no se logró tener un mejor ajuste. Esto se debió a que, la cuenca se caracteriza por suelos arcillosos con baja infiltración y alto potencial de escorrentía, información que comparten tanto la AHD que emplea el programa como la literatura existente de la cuenca.

La validación consistió en el uso de los mismos parámetros del CUADRO VII en un período distinto al de la calibración (ver CUADRO VII) y su evaluación se realizó de la misma forma

que en el proceso de calibración, del que se obtuvieron los resultados estadísticos que se observan en el CUADRO XI.



Fuente: Hydro-BID

Figura 13 Resultado mensuales de caudales modelados vs observados

CUADRO XI ESTADÍSTICAS GENERALES DE FLUJO EN LA VALIDACIÓN

Estadísticas	Valores
Error general de volumen	-10.73
Coefficiente de Correlación	0.94
Correlación Modificada	0.66
Coefficiente de Nash- Sutcliffe	0.80

Fuente: Hydro-BID

La evaluación de un modelo de simulación se realiza al comparar los resultados obtenidos con los datos observados, asumiendo que los errores corresponden completamente a la salida del modelo. Sin embargo, la literatura hace referencia a que, en el caso de la modelación de cuencas hidrográficas, se deben considerar también los errores debido a la incertidumbre en las mediciones de los datos, los cuales se consideran la base para la comparación del modelo.

En este caso, a pesar de que los estadísticos demuestran mayor error en comparación con la calibración, los valores se encuentran aun dentro del rango aceptable según el manual “Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos”

### 4.3 Simulación hydro-bid escenario actual

Los datos que se presentan en el CUADRO XII (ver con mayor detalle en el Anexo 5) de la interfaz del software HydroBID son: la cantidad anual de agua modelada, precipitación, evapotranspiración, escorrentía y caudal subsuperficial.

CUADRO XII BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO ACTUAL

Año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escorrentía (mm)	Volumen de agua subterránea al cauce (m3)	Caudal (m3/s)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance (m3)
2000	1073.60	145.01	283.26	147.10	32.18	6.79	13.43	0.00	1.53	0.169
2001	765.83	152.17	137.49	148.35	24.53	6.93	13.49	0.00	1.54	0.004
2002	851.07	159.61	189.64	169.79	29.80	6.93	15.41	0.00	1.77	-0.052
2003	875.78	167.10	156.74	162.72	27.22	6.93	14.81	0.00	1.69	0.034
2004	937.92	173.24	218.75	173.37	31.77	6.93	15.76	0.00	1.80	-0.010
2005	879.25	181.65	163.08	174.55	28.93	6.93	15.86	0.00	1.82	-0.019
2006	1131.86	188.92	311.78	191.21	38.81	6.93	17.39	0.00	1.99	0.016
2007	1051.03	196.42	232.09	180.50	33.31	6.93	16.44	0.00	1.88	0.058
2008	968.04	203.48	227.09	187.39	33.84	6.93	17.01	0.00	1.95	-0.049
2009	1038.76	213.83	248.10	191.71	35.46	6.93	17.42	0.00	1.99	-0.018
2010	1392.80	192.46	573.48	172.48	50.65	6.93	15.72	0.00	1.79	0.092

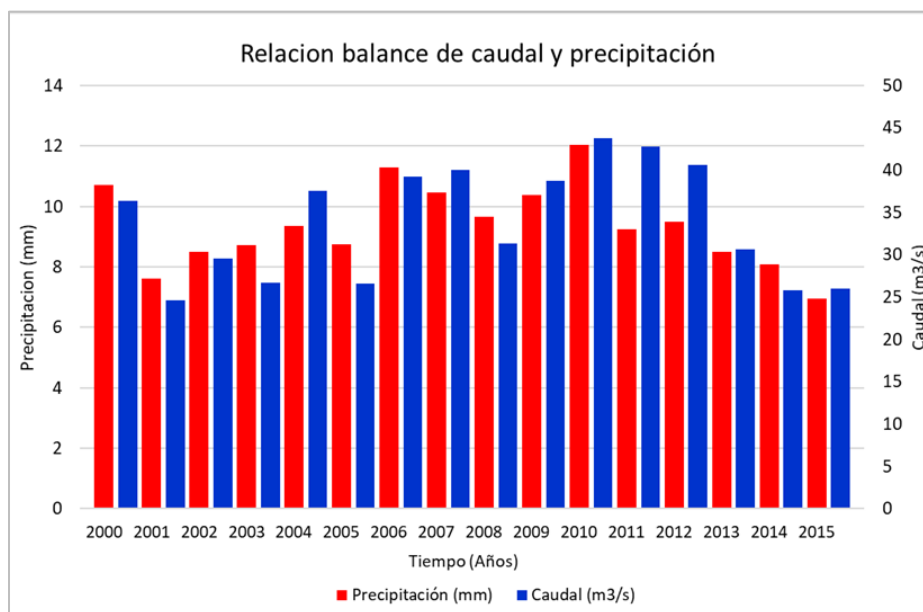
Fuente: Hydro-BID

Además, de los valores de almacenamiento calculados a partir de los parámetros de calibración, para comprender la infiltración y percolación del sistema hidrológico. Sin

embargo, como el análisis del balance hídrico de esta investigación es solamente superficial, los valores de aguas subterráneas son cero en todas las corridas del modelo.

Del balance hídrico de la cuenca, se puede destacar la correlación directa en cuanto a las variaciones de precipitación y el flujo total de la cuenca, el cual se puede apreciar, con mayor detalle, en la gráfica (FIGURA 14), en donde se representan los años con mayores incrementos de precipitación y por tanto de flujo.

A partir del cuadro presentado en la interfaz de HydroBID, se generaron gráficos al exportar los datos de la cuenca de estudio a Excel.



Fuente: Hydro-BID. Elaboración: Propia

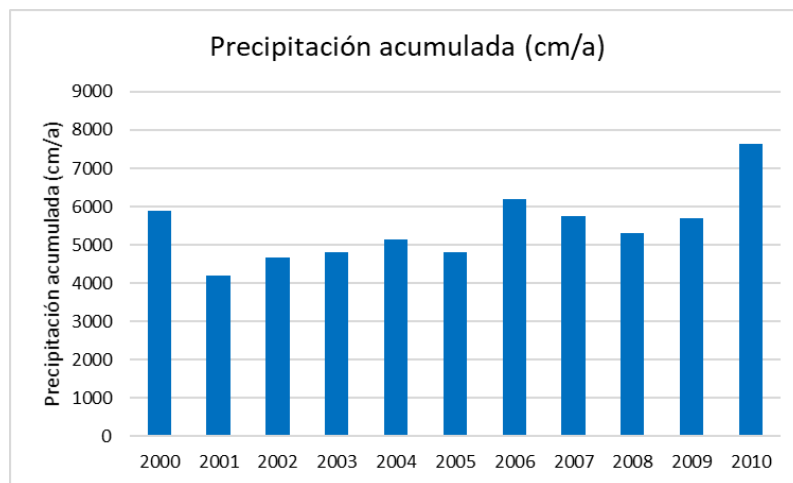
Figura 14 Relación entre el balance de caudal y la precipitación anual

El primer parámetro por evaluar fue la precipitación y como se puede apreciar en la gráfica (FIGURA 15), los mayores ingresos, al balance hidrológico, se dan en el año 2010 al contrario del 2001 que fue el año menos lluvioso.

El siguiente parámetro fue la evapotranspiración, la cual está influenciada directamente por la temperatura del ambiente y la cantidad de horas luz en la cuenca. En la gráfica (FIGURA 16), se observan temperaturas mínimas de 22.6°C y una máxima de 31.4°C, un aproximado

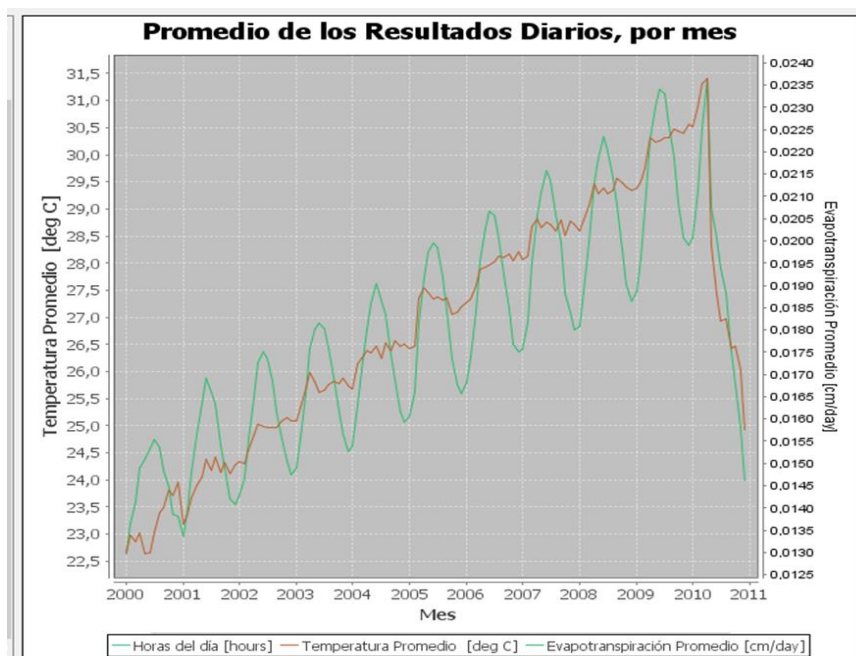


de 12 horas de luz; que como era de esperarse generan un comportamiento directamente proporcional entre ambas variables en los que comparten los picos y valles de las curvas. De igual manera, se debe considerar que el tipo de vegetación y el estado de crecimiento de esta influyen en la transpiración, sin embargo, estas variables fueron tomadas en cuenta al momento de la calibración del modelo.



Fuente: Hydro-BID. Elaboración: Propia

Figura 15 Precipitación acumulada en el periodo de estudio



Fuente: Hydro-BID

Figura 16 Evapotranspiración, temperatura y heliofanía mensual en la cuenca

#### 4.4 Simulación Hydro-bid escenario de cambio climático

Para los escenarios de cambio climático, se realizaron las modelaciones considerando un aumento de la temperatura en los próximos años de 1.5°C, 1.5°C y 3.5°C; en conjunto con el aumento de la precipitación del 7% y su disminución en un 7% y 22%, respectivamente. A continuación, se presentan los resultados de dichas modelaciones, iniciando con el incremento de temperatura en 1.5°C y la disminución de la precipitación en 7% denominado escenario 1 (CUADRO XIII, ver con mayor detalle en el anexo 6), posteriormente el escenario 2 que corresponde al incremento de temperatura en 1.5°C y de la precipitación en un 7% (CUADRO XIV, ver con mayor detalle en el anexo 7), por último, se modeló el escenario 3 que correspondía a un incremento de la temperatura en un 3.5°C y la disminución de la precipitación en un 22% (CUADRO XV, ver con mayor detalle en el ANEXO 8).

El escenario 1 contempla un incremento en la temperatura de 1.5°C, que genera que se produzca 8.6% más de evapotranspiración aproximadamente. Por otro lado, la disminución de la precipitación en un 7% tiene un efecto sobre la escorrentía lo que a su vez disminuyó en comparación con el escenario actual en un 14.1%, al mismo tiempo se observa una tendencia moderadamente decreciente de los flujos totales y la recarga; sin embargo, el porcentaje de almacenamiento en suelos no saturados no se ve afectado por las variaciones del cambio climático.

CUADRO XIII BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 2.6A

Año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escorrentía (mm)	Volumen de agua subterránea al cauce (m3)	Caudal (m3/s)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance (m3)
2000	998.44	157.86	245.37	138.96	29.21	6.78	12.69	0.00	1.45	0.16
2001	712.22	165.57	116.59	140.40	22.49	6.93	12.76	0.00	1.46	0.00
2002	791.49	173.58	163.35	160.89	27.36	6.93	14.60	0.00	1.67	-0.05
2003	814.48	181.63	132.56	153.76	24.89	6.93	13.99	0.00	1.60	0.03
2004	872.26	188.22	187.64	164.26	29.05	6.93	14.93	0.00	1.71	-0.01
2005	817.71	197.25	136.97	165.51	26.49	6.93	15.04	0.00	1.72	-0.02
2006	1052.63	205.05	270.14	181.74	35.49	6.93	16.53	0.00	1.89	0.02
2007	977.46	213.10	196.84	171.24	30.35	6.93	15.59	0.00	1.78	0.06
2008	900.27	220.68	195.65	177.71	31.04	6.93	16.13	0.00	1.85	-0.05
2009	966.05	231.78	212.66	182.07	32.45	6.93	16.54	0.00	1.89	-0.02
2010	1295.30	208.84	513.74	163.09	46.37	6.93	14.87	0.00	1.70	0.09
2011	855.80	167.56	186.94	171.81	29.89	6.93	15.59	0.00	1.79	-0.05
2012	876.86	192.48	189.31	162.66	28.96	6.93	14.79	0.00	1.69	0.00
2013	794.70	195.14	145.56	164.58	26.84	6.93	14.94	0.00	1.71	-0.05
2014	754.95	197.03	131.15	143.67	23.65	6.93	13.07	0.00	1.50	0.01
2015	645.89	199.55	110.68	133.41	21.36	6.93	12.11	0.00	1.39	-0.03

Fuente: Hydro-BID

## CUADRO XIV BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 2.6B

Año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escurrentía (mm)	Volumen de agua subterránea al cauce (m3)	Caudal (m3/s)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance (m3)
2000	1148.75	157.86	320.79	154.65	35.07	6.80	14.12	0.00	1.61	0.17
2001	819.44	165.57	159.49	155.59	26.54	6.93	14.15	0.00	1.62	0.00
2002	910.64	173.58	217.37	177.64	32.19	6.93	16.12	0.00	1.85	-0.05
2003	937.08	181.63	182.32	170.64	29.51	6.93	15.53	0.00	1.78	0.04
2004	1003.57	188.22	251.13	181.46	34.44	6.93	16.49	0.00	1.89	-0.01
2005	940.80	197.25	190.96	182.40	31.33	6.93	16.57	0.00	1.90	-0.02
2006	1211.09	205.05	353.49	199.78	42.04	6.93	18.17	0.00	2.08	0.02
2007	1124.61	213.10	269.30	188.61	36.24	6.93	17.17	0.00	1.96	0.06
2008	1035.80	220.68	259.78	195.85	36.57	6.93	17.78	0.00	2.04	-0.05
2009	1111.47	231.78	285.04	200.12	38.41	6.93	18.18	0.00	2.08	-0.02
2010	1297.07	208.84	459.09	179.74	45.37	6.93	16.38	0.00	1.87	0.08
2011	994.06	167.56	252.33	185.30	34.95	6.93	16.83	0.00	1.93	-0.04
2012	1017.74	192.48	253.20	181.16	34.52	6.93	16.47	0.00	1.89	0.00
2013	915.77	195.14	197.71	183.04	31.76	6.93	16.62	0.00	1.90	-0.05
2014	868.60	197.03	178.90	159.24	28.00	6.93	14.48	0.00	1.66	0.02
2015	743.12	199.55	151.97	148.16	25.28	6.93	13.45	0.00	1.54	-0.04

Fuente: Hydro-BID

El escenario 2 contempla un incremento en la temperatura de 1.5°C, que hace que se produzca 8.6% más de evapotranspiración aproximadamente. Por otro lado, el aumento de la precipitación en un 7% genera que la escurrentía incremente en un 11.9% con respecto al escenario actual, del mismo modo el parámetro tiene una influencia positiva en los flujos totales que incrementan en un 6.66% y en la recarga que es 4.61% mayor que en el escenario actual.

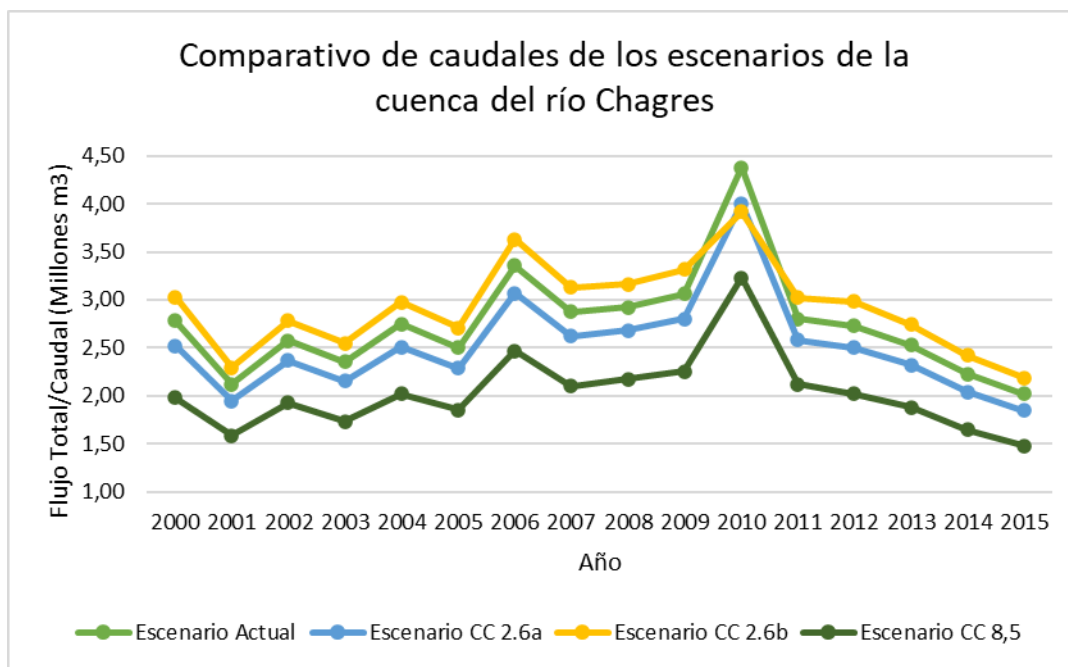
## CUADRO XV BALANCE GENERAL DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 8.5

Año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Escurrentía (mm)	Volumen de agua subterránea al cauce (m3)	Caudal (m3/s)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance (m3)
2000	837.40	176.53	166.86	120.67	22.89	6.75	11.02	0.00	1.26	0.16
2001	597.35	185.01	76.99	123.10	18.37	6.93	11.19	0.00	1.28	0.00
2002	663.83	193.83	111.67	140.66	22.26	6.93	12.77	0.00	1.46	-0.05
2003	683.11	202.68	86.69	133.42	20.08	6.93	12.14	0.00	1.39	0.03
2004	731.57	209.92	127.06	143.56	23.41	6.93	13.05	0.00	1.49	-0.01
2005	685.82	219.85	88.70	144.45	21.46	6.93	13.12	0.00	1.50	-0.02
2006	882.85	228.41	186.34	160.44	28.54	6.93	14.59	0.00	1.67	0.01
2007	819.81	237.25	129.34	149.91	24.27	6.93	13.65	0.00	1.56	0.05
2008	755.07	245.56	133.37	155.86	25.18	6.93	14.15	0.00	1.62	-0.04
2009	810.23	257.72	139.33	160.98	26.09	6.93	14.63	0.00	1.68	-0.02
2010	1086.38	232.55	392.06	141.98	37.41	6.93	12.95	0.00	1.48	0.09
2011	717.77	187.20	130.95	151.63	24.56	6.93	13.76	0.00	1.58	-0.05
2012	735.43	214.60	129.97	141.89	23.38	6.93	12.90	0.00	1.48	0.00
2013	666.52	217.53	94.33	144.45	21.77	6.93	13.11	0.00	1.50	-0.04
2014	633.18	219.61	85.56	125.13	19.06	6.93	11.38	0.00	1.30	0.01
2015	541.72	222.37	68.42	116.36	17.13	6.93	10.57	0.00	1.21	-0.03

Fuente: Hydro-BID

El escenario 3 considera un incremento en la temperatura de 3.5°C y una disminución del 22% de la precipitación que acentúan el incremento de la evapotranspiración en un 21% más en comparación al escenario base; al contrario de la escorrentía que, al ser un valor altamente dependiente de la precipitación, su producción disminuye en aproximadamente un 58.2%, es decir un poco más de la mitad. También, genera descensos más considerables del flujo total de la cuenca y la recarga, aproximadamente en un 26.1% y 17.1%, respectivamente.

Al analizar los resultados obtenidos del módulo de cambio climático de Hydro-BID basado en los dos escenarios propuestos por la IPCC, se evidencian las afectaciones que generaría el incremento de la temperatura, que acarrea descensos del caudal aún más notables en el escenario con menores precipitaciones y que se ve afectado por el aumento que sufre la evapotranspiración debido al mayor incremento en la temperatura. El uso de estos escenarios resulta bastante relevante a la hora de calcular la oferta hídrica futura y las evaluaciones de aprovechamiento del recurso hídrico.

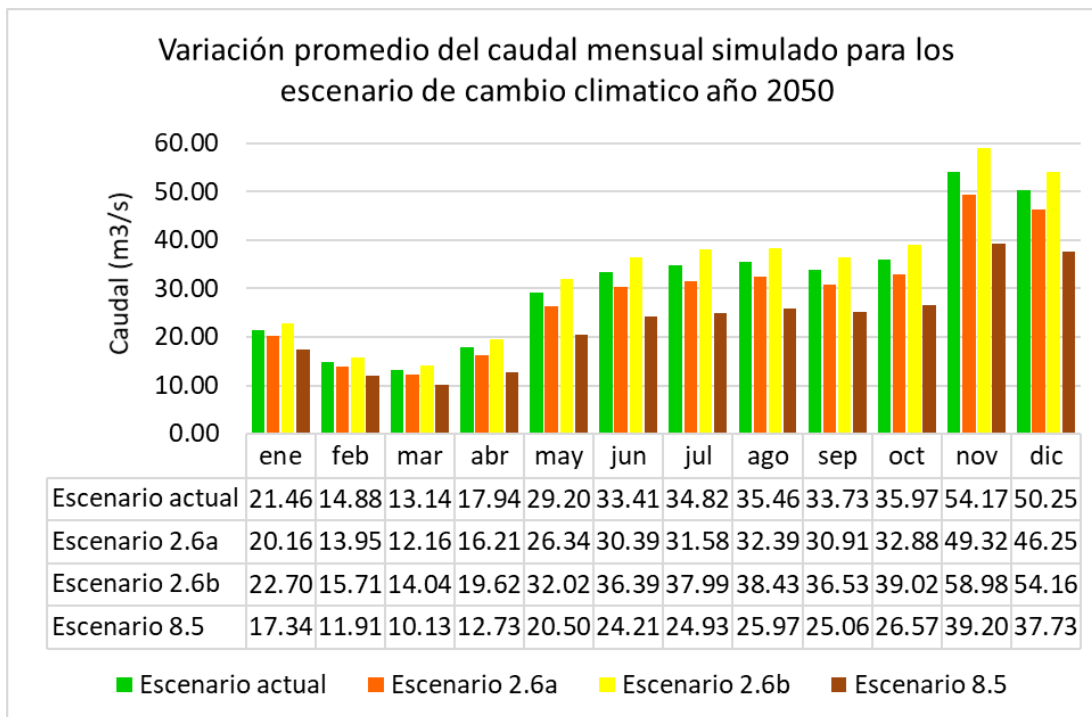


Fuente: Hydro-BID. Elaboración: Propia

Figura 17 Gráfico comparativo de caudales de los escenarios de la cuenca del río Chagres

En la gráfica (FIGURA 17), se observa el comportamiento del caudal, a la salida de la cuenca comparado entre los tres escenarios de cambio climático propuestos y el escenario actual, donde, a parte de la variabilidad climática, actualmente, se observa una tendencia moderadamente decreciente de los flujos, lo que, ya de por si es una situación negativa si se toman en cuenta las posibles afectaciones a futuro, respecto al abastecimiento de agua para las poblaciones, la navegación y el resto de los usos tanto consultivos, como no consultivos que posee la cuenca. También, es posible apreciar que las variaciones climáticas acentuarán el comportamiento que, desde ahora, se aprecia en la cuenca, es decir los caudales mínimos serán más notorios y la vulnerabilidad a eventos extremos como lo fue La Purísima en el 2010 incrementará.

Por otra parte, en el escenario 2.6b se evidencia que a pesar del incremento en la evapotranspiración, los caudales son superiores, Esto puede deberse a que a pesar de que la temperatura puede tener cierta incidencia en las pérdidas hídricas por Evapotranspiración, su significado en el régimen de caudales es más relevante como ajuste de las fracciones de agua que no se convertirán en escorrentía, por lo que en el aumento de los caudales son más significativos los volúmenes de precipitación que se aportan por escorrentía superficial, además, de los flujos base. Sin embargo, se observa una anomalía en la proyección del año 2010 en los que el caudal no es mayor al del escenario base, una tendencia que no se aprecia en el resto de los años, esto podría ser debido a que en ese año se caracterizó por un ENSO (por sus siglas en inglés, El Niño-Southern Oscillation) fuerte.



Fuente: Hydro-BID. Elaboración: Propia

Figura 18 Variación promedio del caudal mensual simulado para los distintos escenarios de cambio climático

A partir de la información que genero el programa HydroBID tomando en consideración el cambio en las variables de precipitación y temperatura que enfrentaría la cuenca de cumplirse alguno de los escenarios antes propuestos; se graficaron los caudales promedios mensuales que registraría la cuenca para el año 2050 (FIGURA 18), el comportamiento de cada escenario sigue siendo el esperado; el escenario “optimista a” en donde el descenso de la precipitación es del 7%, conllevaría a una disminución del caudal mensual del 8% en contraste con los valores registrados para el periodo 2000-2015. Mientras que para el escenario pesimista las reducciones del caudal estarían entre el 19 y 30% con respecto a los valores actuales que presenta la cuenca. En los tres escenarios se puede apreciar que la temporada lluviosa es la más impactada por estas variaciones en especial los meses de octubre, noviembre y diciembre en los que se predicen mayores disminuciones de caudal para los escenarios 2.6 a y 8.5 y mayores crecidas para el escenario 2.6 b; al contrario del mes febrero que presenta la menor variabilidad ante los cambios de temperatura y/o precipitación de los tres escenarios.

## 5.0 CONCLUSIONES

HydroBID permite una estimación futura de la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Chagres.

La construcción del modelo Hydro-BID para la subcuenca del río Chagres, con base en la información hidrometeorológica disponible fue favorable, cercana a la realidad del cauce principal y sus afluentes.

La exactitud del modelo depende de la disponibilidad de datos confiables, por lo que se requiere contar con un amplio registro continuo de las variaciones de caudal, temperatura y precipitación, así como datos de tipos y uso de suelo.

No se hallaron variaciones significativas con respecto a la variabilidad interanual del cauce durante el periodo de estudio (2000-2015).

Basados en los efectos del cambio climático establecidos para la región de Centroamérica. Se establecieron tres escenarios de variación climática para un periodo de aproximadamente 50 años empleando el mismo uso de suelo y cobertura actual. El primer escenario, pronostica un volumen del caudal máximo de 3 066 millones de m<sup>3</sup> al año. El segundo escenario en comparación al escenario base, genera una recarga aproximada de 4.6% mayor que la actual. En el tercer escenario se plantea un aumento en la temperatura de 3.5°C y una disminución de la precipitación del 22%, que proyecta una disminución del caudal del río de 33.9 m<sup>3</sup>/s. a 23.5 m<sup>3</sup>/s, 30% con respecto al caudal actual, esta última predicción dramática sobre el peor escenario que hasta ahora podría presentar la cuenca nos insta a desde ahora tomar medidas de mitigación a fin de que las variaciones climáticas o sus efectos no se den.

Los resultados de los escenarios de cambio climático sobre la cuenca, permiten apreciar las fortalezas de la herramienta Hydro-BID para la toma de decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos de una región; y la confiabilidad en sus resultados por la posibilidad de manipular las variaciones de temperatura y precipitación, tanto de manera anual como mensual para así proponer medidas particulares de control que limiten las consecuencias de los desastres naturales y/o en la viabilidad de actividades económicas derivadas de la futura disponibilidad del recurso agua.

## **6.0 RECOMENDACIONES**

- Actualizar y monitorear las estaciones meteorológicas para que se garantice su buen funcionamiento y la obtención de información continua y confiable para uso en las futuras investigaciones.
  
- Fortalecer el vínculo entre la academia y las instituciones públicas y privadas para facilitar el proceso de obtención de información de carácter público fundamental para el desarrollo de proyectos de investigación.
  
- Se recomienda continuar con la modelación en el software Hydro-BID de la Cuenca Chagres, ya que los resultados obtenidos fueron satisfactorios y sería de gran ayuda para analizar la afectación del cambio climático en los caudales.
  
- Se recomienda que el presente estudio se complemente con una modelación hidrológica de la zona. que implemente los usos que se le da al recurso hídrico (agua para consumo, agua de uso industrial. agua para riego, agua para generación hidroeléctrica, entre otros)



## 7.0. REFERENCIAS CITADAS

- ACP; Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas UTP. (2007). Calibración de un modelo hidrológico para la determinación de los volúmenes de agua que fluyen en un bosque tropical húmedo: cuenca del Canal de Panamá. En C. d. Panamá, *TRAYECTORIA 2005 – 2010* (págs. 12-13). Panama: ACP.
- Autoridad del Canal de Panamá. (2007). *EsIA categoría III Ampliación del tercer juego de esclusas del Canal de Panamá*. Panamá: ACP.
- Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). (2005). *Plan de manejo del parque nacional Chagres*. Panamá: ANAM.
- Bierkens, M. F., & Geer, F. C. (2012). *Stochastic Hydrology*. Department of Physical Geography Utrecht University.
- Blanco, M. S., & Pascual-Aguilar, J. (2020). Desarrollo de un modelo de balance hídrico en la cuenca alta del Río Negro (Uruguay): Análisis de la disponibilidad de agua en diferentes escenarios. En I. M. Avanzados-Agua, *Escenarios de Cambio Climático en Colombia y Uruguay. Explorando el modelo hidrológico HYDROBID* (págs. 63-118). Madrid: Centro para el Conocimiento del Paisaje.
- Brunner, G. W. (2020). *Guía de usuario del sistema de análisis de ríos HEC-RAS*. Davis, CA: Cuerpo de ingenieros de los EEUU.
- Castañeda, M. X., & Ordoñez, N. (2019). *Estudio de la vulnerabilidad climática del recurso hídrico de la cuenca del río Pamplonita*. Bogota D.C: Universidad Santo Tomás.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogota: Mcgraw-hill interamericana, S.A.
- Comité de Alto Nivel de Seguridad Hídrica. (2016). *Plan Nacional de Seguridad Hídrica 2015-2050: Agua para Todos*. Panamá, República de Panama: Consejo Nacional del Agua.
- Dietrichson, A. (2019). *Métodos Cuantitativos*. Universidad Nacional San Martín.
- Domínguez, S. C. (2019). *Caracterización de la cuenca 128 del río La Villa en la República de Panamá mediante hydrobid*. Alcalá: Universidad Rey Juan Carlos.
- Dourojeanni, A. (2002). Gestión integrada de recursos hídricos y del medio ambiente. *Taller “De Río a Johannesburgo. La Transición hacia el Desarrollo Sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe”*.
- Environmental Resources Management (ERM). (2016). Tarea 10 Reporte de determinación del balance hídrico y caudal ambiental. En M. d. Panamá, *“Estudios para la elaboración del diseño conceptual del reservorio multipropósito en la Cuenca de Río Indio y proyectos*

- complementarios para el manejo de la cuenca”* (pág. 229). Panama: Autoridad del Canal de Panamá.
- Fayal, M. A. (2008). *Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada*. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Freeze, R. A., & Harlan, R. L. (1969). Blueprint for a physically-based, digitally simulated hydrologic response. *Journal of Hydrology*, 237-258.
- García Tocto, D. Y. (2019). *Modelado Hidráulico del Río Amojú Aplicando el Software Iber para Zonificar Áreas Inundables en la Ciudad de Jaén, Perú*. Jaén: Universidad Nacional de Jaén.
- Global Water Partnership. (2000). *Integrated Water Resources Management Technical Advisory Committee (TAC)*. Stockholm: GWP.
- González, C. (1989). Métodos regionales de analisis de Irecuencia. *Ingeniería e Investigación*.
- Guanokuiza, B. A. (2020). *Plan de gestión de recurso hídrico para una microcuenca interandina usando el modelo hidrológico Hydro-BID*. Quito: UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK.
- Hanke, J. E., & Wichern, D. W. (2006). *Pronósticos en los negocios*. Mexico: Pearson Educación.
- Hernández Anguiano, H. (2011). *Ánalysis de los procesos de flujo subterráneo y superficial en problemas mediambientales*. Galicia: Universidade da Coruña. Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación.
- Hipp, Wyrick & Company, Inc. (2020). *Documentos Generales: Acerca de SQLite*. Georgia: Hwaci.
- Instituto de Hidraulica Ambiental de España. (2016). *Estudio integral de actuaciones de mitigación de inundaciones en la cuenca de Juan Díaz*. Panama: Universidad de Cantabria.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2004). *Metodología para El Cálculo del Índice de Escasez de Agua Superficial*. Bogota: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*. Bogotá, D.C.: ISBN: 978-958-5489-09-7.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), de la Contraloría General de República. (2010). *XI Censo de Población y VII de Vivienda*. Panama: Contraloría General de República.
- Intercaribe S. A.; Nathan Associates Inc. (1996). *Plan Regional Para el Desarrollo de la Región Interoceánica*. Panamá: Autoridad de la Región Interoceánica.
- International River Interface Cooperative. (2018). *Herramienta Teorica iRIC*. California: University of California.
- Kelton, W. D. (1991). *Simulation Modeling and Analysis*. Singapore: McGraw-Hill.

- Llerena, C. A. (2003). *Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú*. Lima.
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Raúl, M. C. (2014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Moriasi, D. B. (2012). Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 1241-1247.
- Moya de Madrigal, L. (1986). *Introducción a la Estadística de la Salud*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2015). *Documentación Teórica SWAT*. Texas: Agricultural Research Service.
- Ordoñez Galvez, J. J. (2011). *Cartilla técnica: Balance hídrico superficial*. Lima : Global Water Partnership South America.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) Ambiente. (2018). *Hoja de Datos sobre el Estado de la Gestión Hídrica en Panamá 2017-18*. Global Water Partnership.
- Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía de prácticas climatológicas*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Ortiz, V. P. (2020). *Evaluación de la herramienta de simulación del recurso hídrico hydro-bid para la cuantificación de la disponibilidad de agua en la cuenca alta del río Guayllabamba y unidades hídricas aportantes de agua para el distrito metropolitano de Quito*. Quito: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
- Programa Hidrológico Intergubernamental en América Latina y el Caribe (PHI-LAC). (2006). *Evaluación de los recursos hídricos Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*. Montevideo: UNESCO.
- Quillatupa Espejo, Y. T., & Cárdenas Baquerizo, E. (2016). *Relación precipitación, infiltración y escorrentía para la época de lluvia en la microcuenca Yanango-Chanchamayo*. Huancayo: Universidad Nacional Del Centro Del Perú.
- Regan, R., Markstrom, S., & LaFontaine, J. (2020). *versión 5.1.0: Sistema de modelado de escorrentía de precipitación (PRMS): Versión del software de estudio geológico de EE. UU., 05/01/2020*. USGS.
- Rendón, L. (2003). *La cuenca: sistema hidrológico o curso de agua natural*. IMTA.
- República de Panamá. (1972). *Constitución Política de la República de Panamá*. Panamá, Panamá, Panamá: Ministerio Público Procuraduría General de la Nación.

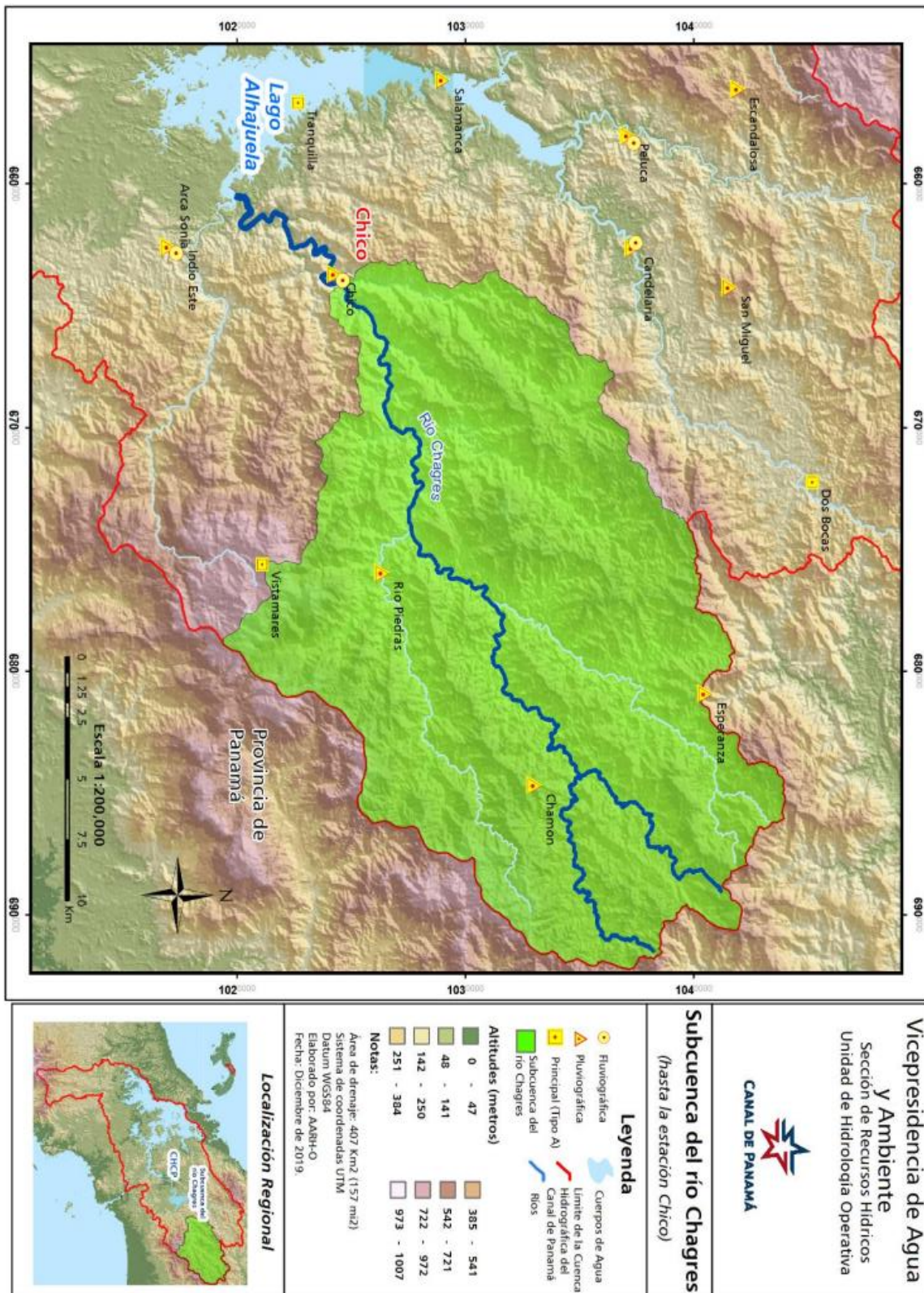
- Rineer, a., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F., & Castillo, R. M. (2014). *Base de datos de hidrología analítica para América Latina y el Caribe. Parte 1 /* . Banco Interamericano de Desarrollo .
- RTI International. (2019). *Curso de Entrenamiento de Hydro-BID-Metodo de relleno de datos*. RTI.ORG.
- Schrevel, A., & Terwisscha van Scheltinga, C. (2004). *International conferences on water, food and ecosystems*. Netherlands: FAO.
- Silva, L. P. (2007). *Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e*. Universidade Federal da Paraíba.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. G. (1974). *Methods for water balance computations: an international guide for research and practice*. Paris: UNESCO.
- The World Bank. (2004). *Water resources sector strategy*. Washington, DC: /The World Bank.
- Tucci, C. E. (2010). *Modelos hidrológicos distribuídos*. Puerto Alegre.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2015). *Desafíos del agua urbana en las Américas: Perspectivas de las academias de ciencias*. Mexico: UNESCO.
- United States Geological Survey (USGS). (2017). Distribucion del agua de la tierra. En U. S. Survey, *La Ciencia del agua para las escuelas*.
- United States Geological Survey (USGS). (2019). *The Water Cycle for Schools*. USGS.
- URS 2004; ANAM et al. 2005. (s.f.). *Atlas Latinoamerica*. ANAM.
- Waseem, M., Schilling, J., Kachholz, F., & Tränckner, J. (2020). *Representación mejorada del flujo y la calidad del agua en una cuenca de captación de tierras bajas del noreste de Alemania mediante la combinación de datos monitoreados de baja frecuencia con modelos hidrológico*. Rostock: Facultad de Agricultura y Ciencias Ambientales, Universidad de Rostock.
- Xu, C. Y. (2002). *Modelos hidrológicos*. Uppsala: Universidad de Uppsala. Departamento de Hidrología de Ciencias de la Tierra.

## Anexo N°1 Datos de población de las comunidades de la cuenca

NUM	POBLADO	PROVINCIA	DISTRITO	CORREGIMIENTO	POBLACION		
					2010	HOMBRES	MUJERES
1	RIO PIEDRA	PANAMA	PANAMA	CAIMITILLO	4	4	0
2	SAN CRISTOBAL	PANAMA	PANAMA	CAIMITILLO	27	17	10
3	AGUA FRIA	PANAMA	PANAMA	CAIMITILLO	0	0	0
4	CABECERA DE RIO PIEDRA	PANAMA	PANAMA	CAIMITILLO	3	2	1
5	FILO DE MAMEY	PANAMA	PANAMA	CAIMITILLO	5	4	1
6	COMUNIDAD EMBERA O 260	PANAMA	PANAMA	CAIMITILLO	102	57	45
<b>SUBTOTAL</b>					<b>141</b>	<b>84</b>	<b>57</b>

		POBLACIÓN				POBLACIÓN DE	
		MENORES DE	MAYORES DE	MAYOR DE 15	MAYORES DE	15 A 64 AÑOS	
ANALFABETAS	OCCUPADOS	15 AÑOS (%)	15 AÑOS (%)	AÑOS	65 AÑOS (%)	(%)	
3	4	0,00	2,84	4	0,00	0,00	
5	16	0,00	14,18	20	0,00	0,00	
0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	
1	2	0,00	2,13	3	0,00	0,00	
1	2	0,00	2,84	4	0,00	0,00	
6	44	0,00	44,68	63	0,00	0,00	
<b>16</b>	<b>68</b>	<b>0,00</b>	<b>66,67</b>	<b>94</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	

ANEXO N°2 MAPA 1:380000 DE LAS ESTACIONES DE LA CUENCA



**ANEXO N°3 BALANCE GENERAL (MILLONES DE M3) DE LA CUENCA BAJO ESCENARIO ACTUAL**

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total/Caudal (Millones m3)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2000	0,0004964	6,70E-03	0,131	1,47E-04	2,78	6,79	13,43	0,0	1,32E-01	1,69E-07
2001	0,0003541	7,04E-03	0,064	1,48E-04	2,12	6,93	13,49	0,0	1,33E-01	3,76E-09
2002	0,0003935	7,38E-03	0,088	1,70E-04	2,57	6,93	15,41	0,0	1,53E-01	-5,20E-08
2003	0,0004049	7,73E-03	0,072	1,63E-04	2,35	6,93	14,81	0,0	1,46E-01	3,39E-08
2004	0,0004336	8,01E-03	0,101	1,73E-04	2,75	6,93	15,76	0,0	1,56E-01	-1,03E-08
2005	0,0004055	8,40E-03	0,075	1,75E-04	2,50	6,93	15,86	0,0	1,57E-01	-1,90E-08
2006	0,0005233	8,73E-03	0,144	1,91E-04	3,35	6,93	17,39	0,0	1,72E-01	1,58E-08
2007	0,0004859	9,08E-03	0,107	1,80E-04	2,88	6,93	16,44	0,0	1,62E-01	5,79E-08
2008	0,0004476	9,41E-03	0,105	1,87E-04	2,92	6,93	17,01	0,0	1,68E-01	-4,91E-08
2009	0,0004803	9,89E-03	0,115	1,92E-04	3,06	6,93	17,42	0,0	1,72E-01	-1,82E-08
2010	0,0006439	8,90E-03	0,265	1,72E-04	4,38	6,93	15,72	0,0	1,55E-01	9,16E-08



**ANEXO N°4 BALANCE GENERAL (MILLONES DE M3) DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 2.6a**

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total/Caudal (Millones m3)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2000	0,0004616	7,30E-03	0,1134	1,39E-04	2,5240	6,7817	12,690	0.0	1,25E-01	1,64E-07
2001	0,0003293	7,65E-03	0,0539	1,40E-04	1,9430	6,9309	12,764	0.0	1,26E-01	2,38E-09
2002	0,0003659	8,02E-03	0,0755	1,61E-04	2,3642	6,9317	14,604	0.0	1,45E-01	-5,01E-08
2003	0,0003766	8,40E-03	0,0613	1,54E-04	2,1504	6,9311	13,993	0.0	1,38E-01	3,22E-08
2004	0,0004033	8,70E-03	0,0868	1,64E-04	2,5101	6,9320	14,929	0.0	1,48E-01	-8,92E-09
2005	0,0003781	9,12E-03	0,0633	1,66E-04	2,2884	6,9310	15,038	0.0	1,49E-01	-1,88E-08
2006	0,0004867	9,48E-03	0,1249	1,82E-04	3,0663	6,9321	16,529	0.0	1,63E-01	1,55E-08
2007	0,0004519	9,85E-03	0,0910	1,71E-04	2,6225	6,9322	15,593	0.0	1,54E-01	5,59E-08
2008	0,0004162	1,02E-02	0,0905	1,78E-04	2,6817	6,9331	16,134	0.0	1,60E-01	-4,74E-08
2009	0,0004466	1,07E-02	0,0983	1,82E-04	2,8039	6,9326	16,544	0.0	1,64E-01	-1,77E-08
2010	0,0005989	9,66E-03	0,2375	1,63E-04	4,0061	6,9331	14,869	0.0	1,47E-01	9,07E-08
2011	0,0003957	7,75E-03	0,0864	1,72E-04	2,5824	6,9314	15,594	0.0	1,54E-01	-5,36E-08
2012	0,0004054	8,90E-03	0,0875	1,63E-04	2,5018	6,9328	14,787	0.0	1,46E-01	1,63E-10
2013	0,0003674	9,02E-03	0,0673	1,65E-04	2,3188	6,9335	14,941	0.0	1,48E-01	-4,64E-08
2014	0,0003490	9,11E-03	0,0606	1,44E-04	2,0430	6,9336	13,067	0.0	1,29E-01	1,40E-08
2015	0,0002986	9,23E-03	0,0512	1,33E-04	1,8458	6,9329	12,113	0.0	1,20E-01	-3,27E-08

**ANEXO N°5 BALANCE GENERAL (MILLONES DE M3) DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 2.6b**

Rango	Precipitación	Evapotranspiración	Escurrentia	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total/Caudal (Milliones m3)	Almacenamiento saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2000	0,0005311	7,30E-03	0,1483	1,55E-04	3,0297	6,79546	14,1223	0	1,39E-01	1,74E-07
2001	0,0003789	7,65E-03	0,0737	1,56E-04	2,2932	6,93092	14,1463	0	1,40E-01	4,30E-09
2002	0,0004210	8,02E-03	0,1005	1,78E-04	2,7814	6,9317	16,1244	0	1,60E-01	-5,38E-08
2003	0,0004332	8,40E-03	0,0843	1,71E-04	2,5494	6,93113	15,5294	0	1,53E-01	3,57E-08
2004	0,0004640	8,70E-03	0,1161	1,81E-04	2,9756	6,93197	16,4905	0	1,63E-01	-1,17E-08
2005	0,0004350	9,12E-03	0,0883	1,82E-04	2,7069	6,931	16,5731	0	1,64E-01	-1,91E-08
2006	0,0005599	9,48E-03	0,1634	2,00E-04	3,6321	6,93212	18,1697	0	1,80E-01	1,65E-08
2007	0,0005199	9,85E-03	0,1245	1,89E-04	3,1312	6,93226	17,1739	0	1,70E-01	5,92E-08
2008	0,0004789	1,02E-02	0,1201	1,96E-04	3,1596	6,9332	17,7814	0	1,76E-01	-5,05E-08
2009	0,0005139	1,07E-02	0,1318	2,00E-04	3,3190	6,93271	18,1842	0	1,80E-01	-1,88E-08
2010	0,0005997	9,66E-03	0,2123	1,80E-04	3,9200	6,93308	16,3768	0	1,62E-01	7,88E-08
2011	0,0004596	7,75E-03	0,1167	1,85E-04	3,0196	6,93154	16,8288	0	1,67E-01	-3,62E-08
2012	0,0004705	8,90E-03	0,1171	1,81E-04	2,9822	6,93299	16,4698	0	1,63E-01	1,14E-09
2013	0,0004234	9,02E-03	0,0914	1,83E-04	2,7445	6,93356	16,6152	0	1,65E-01	-5,33E-08
2014	0,0004016	9,11E-03	0,0827	1,59E-04	2,4195	6,93363	14,4839	0	1,43E-01	1,59E-08
2015	0,0003436	9,23E-03	0,0703	1,48E-04	2,1842	6,93297	13,4521	0	1,33E-01	-3,74E-08

**ANEXO N°6 BALANCE GENERAL (MILLONES DE M3) DE LA CUENCA BAJO EL ESCENARIO 8.5**

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Volumen de agua subterránea al cauce	Flujo total/Caudal (Millones m <sup>3</sup> )	Almacenamiento saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
2000	0,0003872	8,16E-03	0,0771	1,21E-04	1,9781	6,7524	11,0235	0.0	1,08E-01	1,55E-07
2001	0,0002762	8,55E-03	0,0356	1,23E-04	1,5869	6,9304	11,1888	0.0	1,11E-01	-3,77E-09
2002	0,0003069	8,96E-03	0,0516	1,41E-04	1,9229	6,9312	12,7665	0.0	1,26E-01	-4,50E-08
2003	0,0003158	9,37E-03	0,0401	1,33E-04	1,7350	6,9307	12,1422	0.0	1,20E-01	2,81E-08
2004	0,0003382	9,71E-03	0,0587	1,44E-04	2,0230	6,9316	13,0477	0.0	1,29E-01	-6,15E-09
2005	0,0003171	1,02E-02	0,0410	1,44E-04	1,8545	6,9305	13,1230	0.0	1,30E-01	-1,82E-08
2006	0,0004082	1,06E-02	0,0862	1,60E-04	2,4659	6,9318	14,5920	0.0	1,44E-01	1,46E-08
2007	0,0003790	1,10E-02	0,0598	1,50E-04	2,0970	6,9317	13,6513	0.0	1,35E-01	5,10E-08
2008	0,0003491	1,14E-02	0,0617	1,56E-04	2,1752	6,9325	14,1492	0.0	1,40E-01	-4,31E-08
2009	0,0003746	1,19E-02	0,0644	1,61E-04	2,2540	6,9320	14,6271	0.0	1,45E-01	-1,61E-08
2010	0,0005023	1,08E-02	0,1813	1,42E-04	3,2324	6,9327	12,9474	0.0	1,28E-01	8,79E-08
2011	0,0003318	8,65E-03	0,0605	1,52E-04	2,1217	6,9306	13,7595	0.0	1,36E-01	-5,47E-08
2012	0,0003400	9,92E-03	0,0601	1,42E-04	2,0198	6,9322	12,8993	0.0	1,28E-01	1,19E-09
2013	0,0003082	1,01E-02	0,0436	1,44E-04	1,8806	6,9332	13,1116	0.0	1,30E-01	-4,29E-08
2014	0,0002927	1,02E-02	0,0396	1,25E-04	1,6469	6,9332	11,3807	0.0	1,13E-01	1,17E-08
2015	0,0002505	1,03E-02	0,0316	1,16E-04	1,4799	6,9323	10,5653	0.0	1,05E-01	-2,69E-08