

**MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE  
LA CUENCA DEL RÍO TEMPISQUE  
(COSTA RICA) ANTE ESCENARIOS DE  
CAMBIO CLIMÁTICO**

**HYDROLOGICAL MODELING OF THE  
TEMPISQUE RIVER BASIN (COSTA  
RICA) UNDER CLIMATE CHANGE  
SCENARIOS**

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

**Presentado por:**

**D. CHRISTIAN SOLIS SALAZAR**

**Dirigido por:**

**D. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR**

**Alcalá de Henares, a 15 de febrero de 2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco primeramente a Dios por darme la oportunidad de concluir una etapa importante de mi vida y la sabiduría para culminar el Máster*

*A mi familia y amigos por el apoyo brindado.*

*Finalmente, a los profesores que con su guía y orientación han puesto su granito de arena para poder concluir este Trabajo de Fin de Máster.*

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>5</b>
<b>TABLA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN. OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<b>3. ANTECEDENTES .....</b>	<b>12</b>
3.1. Zona de estudio.....	12
3.2. Información y Análisis de datos climáticos.....	15
3.3. Sistema de simulación HydroBID.....	17
3.4. Calibración del modelo de simulación HydroBID .....	18
3.5. Proyecciones de datos climáticas .....	20
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>22</b>
4.1. Delimitación de la Cuenca del Río Tempisque.....	22
4.2. Información y análisis de datos climáticos y caudales .....	22
4.3. Preprocesamiento de la información para HydroBID .....	23
4.4. Proyección de datos climáticos.....	23
4.5. Simulación y Calibración de la CRT con HydroBID.....	24
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSION .....</b>	<b>25</b>
5.1. Delimitación de la Cuenca del Río Tempisque.....	25
5.2. Análisis de datos climáticos y caudales .....	27
5.3. Proyección de datos climáticos.....	32
5.4. Simulación y Calibración de la CRT con HydroBID.....	35
5.5. Simulación de la CRT ante proyecciones climáticas con HydroBID .....	44
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>49</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>52</b>
8.1. Series de datos climáticos .....	52
8.2. Interpolación de Datos Climáticos HydroBID .....	53
8.3. Modelización Hidrográfica HydroBID .....	54
8.4. Proyecciones climáticas en modelización HydroBID.....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones climáticas de Costa Rica.....	13
Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas.....	15
Figura 3. Estructura de funcionamiento HydroBID.....	17
Figura 4. Representación esquemática del modelo GWLF.....	18
Figura 5. Proyecciones de Temperatura Media y Precipitación en Costa Rica para el 2100 según los diferentes RCP.....	21
Figura 6. Delimitación de las Subcuencas para la simulación en HydroBID.....	25
Figura 7. Delimitación de las Subcuencas para la simulación en HydroBID según puntos de control de las estaciones pluviométricas.....	26
Figura 8. Análisis de regresión entre las estaciones para la variable de precipitación diaria.....	28
Figura 9. Análisis de regresión entre las estaciones para la variable de temperatura media.....	28
Figura 10. Histograma de frecuencias para la precipitación diaria CRT.....	29
Figura 11. Histograma de frecuencias para la temperatura media diaria CRT.....	30
Figura 12. Datos de precipitación diaria completa para la CRT.....	31
Figura 13. Datos de temperatura media completa para la CRT.....	31
Figura 14. Incremento y/o disminución de Precipitaciones (mm) para Costa Rica a corto plazo (2020 – 2039) según escenarios de cambio climático.....	33
Figura 15. Incremento y/o disminución de Precipitaciones (mm) para Costa Rica a mediano plazo (2040 – 2059) según escenarios de cambio climático.....	33
Figura 16. Incremento de Temperatura °C para Costa Rica a corto plazo (2020 – 2039) según escenarios de cambio climático.....	34
Figura 17. Incremento de Temperatura °C para Costa Rica a mediano plazo (2040 – 2059) según escenarios de cambio climático.....	34
Figura 18. Curva duración flujo para la estación control Coyolar – simulación HydroBID.....	36
Figura 19. Hidrograma de salida para la estación de control Coyolar – simulación HydroBID.....	36
Figura 20. Curva duración flujo para la estación control Guardia – simulación HydroBID.....	39
Figura 21. Hidrograma de salida para la estación de control Guardia – simulación HydroBID.....	39
Figura 22. Curva duración flujo para la estación control Rancho Rey – simulación HydroBID.....	42
Figura 23. Hidrograma de salida para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID.....	42
Figura 24. Proyección crítica de variación en precipitación para las estaciones de control Guardia y Rancho Rey – simulación HydroBID.....	44
Figura 25. Proyección crítica de incremento de temperatura para las estaciones de control Guardia y Rancho Rey – simulación HydroBID.....	45
Figura 26. Proyección crítica de variación en precipitación e incremento de temperatura para las estaciones de control Guardia y Rancho Rey – simulación HydroBID.....	46
Figura 27. Datos de precipitación diaria original para la CRT.....	52
Figura 28. Datos de temperatura media original para la CRT.....	52
Figura 29. Interpolador de Datos Climáticos HydroBID.....	53
Figura 30. Ejemplo del modelo HydroBID para la estación de control Coyolar.....	54
Figura 31. Ejemplo de inserción parámetros de proyecciones climáticas modelo HydroBID.....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Caracterización de las Subcuencas del Río Tempisque y Río Bebedero</i>	12
<i>Tabla 2. Resumen de la información obtenida de las estaciones para el estudio</i>	16
<i>Tabla 3. Valores recomendados de calibración</i>	19
<i>Tabla 4. Estadísticas de calibración de HydroBID</i>	19
<i>Tabla 5. Escenarios de emisión RCPs</i>	20
<i>Tabla 6. Características de las subcuencas según información AHD</i>	25
<i>Tabla 7. Características de las subcuencas según información AHD según puntos de control de las estaciones pluviométricas</i>	26
<i>Tabla 8. Resumen de datos faltantes por estación meteorológica - precipitación diaria CRT</i>	27
<i>Tabla 9. Resumen de datos faltantes por estación meteorológica - temperatura media diaria CRT</i>	27
<i>Tabla 10. Resumen variables estadísticas para los datos de precipitación diaria CRT</i>	29
<i>Tabla 11. Resumen variables estadísticas para los datos de temperatura media diaria CRT</i>	30
<i>Tabla 12. Proyecciones de la precipitación ante escenarios de cambio climático – Costa Rica (Multiplicador)</i>	32
<i>Tabla 13. Proyecciones de la Temperatura media ante escenarios de cambio climático – Costa Rica (Incremento)</i>	32
<i>Tabla 14. Valores de calibración para la simulación en la estación de control Coyolar - HydroBID</i>	35
<i>Tabla 15. Resultados de error de volumen mensual para estación de control Coyolar</i>	37
<i>Tabla 16. Resultados generales de las variables estadísticas HydroBID estación de control Coyolar</i>	37
<i>Tabla 17. Valores de calibración para la simulación en la estación de control Coyolar - HydroBID</i>	38
<i>Tabla 18. Resultados de error de volumen mensual para estación de control Guardia</i>	40
<i>Tabla 19. Resultados generales de las variables estadísticas HydroBID estación de control Guardia</i>	40
<i>Tabla 20. Valores de calibración para la simulación en la estación de control Rancho Rey - HydroBID</i>	41
<i>Tabla 21. Resultados de error de volumen mensual para estación de control Rancho Rey</i>	43
<i>Tabla 22. Resultados generales de las variables estadísticas HydroBID estación de control Rancho Rey</i>	43
<i>Tabla 23. Respuesta de los caudales de salida ante variaciones en precipitación para la estación de control Guardia – simulación HydroBID</i>	55
<i>Tabla 24. Respuesta de los caudales de salida ante incremento de temperatura para la estación de control Guardia – simulación HydroBID</i>	56
<i>Tabla 25. Respuesta de los caudales de salida ante variación en precipitación e incremento de temperatura para la estación de control Guardia – simulación HydroBID</i>	56
<i>Tabla 26. Respuesta de los caudales de salida ante variaciones en precipitación para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID</i>	57
<i>Tabla 27. Respuesta de los caudales de salida ante incremento de temperatura para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID</i>	57
<i>Tabla 25. Respuesta de los caudales de salida ante variación en precipitación e incremento de temperatura para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID</i>	58

## TABLA DE ABREVIATURAS

AHD	Base de Datos de Hidrología Analítica.
BCIE	Banco Centroamericano de Integración Económica.
BID	Banco Interamericano de Desarrollo.
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
CCKP	Portal de Conocimiento del Cambio Climático del Grupo del Banco Mundial (siglas en inglés).
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos 5 (siglas en inglés).
CRT	Cuenca del Río Tempisque.
DCC	Dirección Cambio Climático (Costa Rica).
ENOS	Fenómeno Natural: El Niño-Oscilación del Sur.
GWLF	Factor de Carga Generalizado de la Cuenca Hidrográfica (siglas en inglés).
HydroBID	Sistema de simulación de cuencas hidrográficas.
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad (Costa Rica).
IMN	Instituto Meteorológico Nacional (Costa Rica).
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (siglas en inglés).
OMM	Organización Meteorológica Mundial.
PIAAG	Programa Integral para el Abastecimiento de Agua para Guanacaste (Pacífico Norte).
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
RCP	Trayectoria de Concentración Representativa (siglas en inglés).
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (siglas en inglés).
WBG	Grupo Banco Mundial (siglas en inglés).

## RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló con el propósito de utilizar el sistema de simulación HydroBID para la modelación hidrológica de la Cuenca del Río Tempisque (Costa Rica), y su comportamiento antes diferentes escenarios de cambio climático.

La Cuenca del Río Tempisque está ubicada en la provincia de Guanacaste, Costa Rica, abarcando alrededor de un 10.6% de la superficie continental del país, y juega un papel muy importante en el desarrollo agropecuario del país. Por otra parte, la variabilidad climática en la que está inmerso el país, épocas de sequía y épocas de abundancia en lluvias, hace que sea de interés su análisis y comportamiento futuro, así como la respuesta de la cuenca ante estos factores.

La metodología utilizada en este estudio se puede agrupar en 3 etapas, la primera es la recopilación y análisis de información climática de precipitación y temperatura, así como registros de caudal en estaciones a lo largo de la cuenca, la segunda corresponde a la modelación HydroBID y sus herramientas para la caracterización de la cuenca y calibración del modelo, y la tercera etapa corresponde al uso de los modelos calibrados para evaluar la cuenca ante escenarios de cambio climático.

Con los resultados obtenidos en el modelo HydroBID y la información base que se pudo recopilar, no se puede generar una caracterización completa de la Cuenca del Río Tempisque, ya que con las estaciones de control disponibles solo se pudo modelar el 24% de la superficie de la cuenca.

Se obtuvieron buenas calibraciones para los caudales medios y bajos de la cuenca, no así, para eventos extremos o de altas precipitaciones, obteniendo diferencias de hasta un 67% entre los caudales observados y simulados en los meses de mayor precipitación.

Pese a ello, HydroBID se vuelve una herramienta muy versátil para la modelación de las cuencas hidrográficas ante diferentes situaciones, incluyendo escenarios de cambio climático.

## **ABSTRACT**

This work was developed with the main objective of using the HydroBID simulation system for the hydrological modeling of the Tempisque River Basin (Costa Rica), and its behavior under different climate change scenarios.

The Tempisque River Basin is located in the province of Guanacaste, Costa Rica, covering around 10.6% of the country's continental surface, and plays a very important role in the country's agricultural development. On the other hand, the climatic variability in which the country is immersed, times of drought and times of abundant rains, make its analysis and future behavior of interest, as well as the response of the basin to these factors.

The methodology used in this study can be grouped into 3 stages, the first is the collection and analysis of climate information on precipitation and temperature, as well as flow records at stations throughout the basin, the second focuses on HydroBID modeling, and its tools for the characterization of the basin and calibration of the model, and the third stage corresponds to the use of the calibrated models to evaluate the basin under climate change scenarios.

With the results obtained in the HydroBID model and the base information that could be collected, a complete characterization of the Tempisque River Basin cannot be generated, since with the available control stations only 24% of the surface of the basin could be modeled.

Good calibrations were obtained for the average and low flows of the basin, but not for extreme events or high rainfall, obtaining differences of up to 67% between the observed and simulated flows in the months with the highest rainfall.

Despite this, HydroBID becomes a very versatile tool for modeling river basins in different situations, including climate change scenarios.



## **1. INTRODUCCIÓN**

La ubicación espacial de Costa Rica dentro del Istmo Centroamericano, bañado por las aguas de los Océanos Pacífico y Atlántico, lo convierte en un país altamente vulnerable a eventos meteorológicos como la temporada de huracanes, principalmente en el Caribe y las fluctuaciones del Niño-Oscilación del Sur (ENOS), mejor conocido como fenómeno del Niño, que se caracteriza por las variaciones en los patrones de lluvia, temperatura y vientos cuando hay variaciones en las temperaturas oceánicas del Pacífico Ecuatorial (IMN, 2022).

Estas variaciones climáticas estacionales, sumado a los efectos del cambio climático genera incertidumbre en la necesidad por predecir el comportamiento de los ecosistemas, por lo que se han desarrollado una gran cantidad de simulaciones y modelos, que tratan de disminuir el riesgo, y facilitar la toma de decisiones.

La gestión de los recursos hídricos no es la excepción, al ser un recurso tan vital para el desarrollo de la vida, se vuelve de vital importancia generar nuevas herramientas que permitan predecir su comportamiento, ante variables como el consumo humano, el aumento de la población, su uso agrícola o en la generación de alimento, o inclusive, su reacción ante cambios de temperatura, estacionalidad, o fenómenos climáticos.

## **2. JUSTIFICACIÓN. OBJETIVOS**

El aumento de la temperatura, variaciones en las duraciones de las estaciones o fenómenos meteorológicos, eventos extremos con mayor intensidad o frecuencia, son algunas de las consecuencias que ha traído el cambio climático a nuestro mundo. La adaptación, mitigación y resiliencia a estas amenazas forman parte de la preocupación de los gobiernos a nivel mundial y en la última Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 27, celebrada en Noviembre 2022), concluyen con la importancia de recuperar el impulso y el compromiso para limitar el aumento de la temperatura a 1.5°C por encima de los niveles preindustriales, invitando a los gobiernos locales a revisar y reforzar sus planes nacionales en sus objetivos de reducción de combustibles fósiles y su combinación con energías limpias o renovables y de bajas emisiones (UNFCCC, 2022).

Por su parte Costa Rica también se encuentra comprometida con la acción climática y en su Contribución Nacionalmente Determinada 2020, aumenta su ambición en la toma de acciones alineadas con limitar el aumento de la temperatura media mundial a 1.5°C. Dicha Contribución alinea los esfuerzos y políticas públicas con los compromisos adquiridos en los acuerdos firmados en París (DCC, 2020).

Dentro de las 13 áreas temáticas que conforman la Confirmación Nacionalmente Determinada 2020 destaca la de Océanos y recurso hídricos, donde destaca el compromiso por el fomento y sostenibilidad hídrica ante el cambio climático Acciones Cambio Climático en CR, así como el manejo integrado de las cuencas hidrográficas (DCC, 2020).

El uso de herramientas de simulación facilita la gestión integral de las cuencas y la toma de decisiones de los encargados ante diferentes situaciones. Una de estas herramientas es el sistema de simulación HydroBID, desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo, que utiliza como eje central una amplia Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD), y variables básicas como la temperatura, precipitación y caudal (Moreda, Miralles-Wilhelm y Muñoz, 2014). Esto le ha permitido a HydroBID ser un sistema estandarizado y aplicable a diferentes regiones. Sin embargo, siempre es necesario la verificación de estos datos con la realidad de las cuencas en las que se aplique el modelo.

El sistema de simulación HydroBID ha sido aplicado en diferentes cuencas de la región sudamericana y Centroamérica, en países como Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Guatemala, Panamá, Paraguay, Perú y Venezuela, en los cuales se han obtenido muy buenos resultados en las modelaciones de las cuencas hidrográficas estudiadas, con variaciones entre los caudales simulados y observadas son mínimas ante situaciones climáticas normales. Cuando las variaciones presentan diferencias amplias puede deberse a eventos extremos o la limitante de falta de infraestructura para la correcta obtención de datos climática o pluviográficos. Su aplicabilidad en cuencas que abarcan varios países, topografías pronunciadas, o inclusive presencia de glaciares, la convierte en una herramienta que puede servir de soporte en el manejo de los recursos hídricos (BID, 2022;

Castillo, 2019; Gutiérrez, 2022; Moreda, Miralles-Wilhelm y Muñoz, 2014; Roldán, 2021).

Debido a lo anterior, toma importancia el poder desarrollar un trabajo de investigación en las cuencas hidrográficas de Costa Rica con la ayuda de este tipo de herramientas, que permitan generar información confiable para la toma de decisiones en el manejo de la cuenca, y por otra parte, su comparación con otros estudios realizados en la zona, como el estudio desarrollado por Mena (2019) con ayuda del modelo WEAP (Water Evolution and Planning System).

Para el presente estudio se seleccionó la Cuenca del Río Tempisque, ya que aproximadamente cubre el 10,6% del territorio costarricense, siendo una de las cuencas más grandes del país (Rojas, 2011b). Dicha cuenca alimenta una de las zonas agropecuarias más importantes del país, por lo que el uso de herramientas que faciliten su gestión toma vital relevancia para la toma de decisiones.

Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es realizar la caracterización de la Cuenca del Río Tempisque mediante la modelación hidrológica con el uso del sistema de simulación HydroBID y su comportamiento ante diferentes escenarios de cambio climático.

Como objetivos secundarios se desarrollarán:

- Obtener y completar datos climatológicos de precipitación y temperatura de estaciones meteorológicas cercanas al área de influencia de la Cuenca del Río Tempisque.
- Obtener y completar datos de caudal de estaciones pluviográficas dentro de los cauces principales de la Cuenca del Río Tempisque.
- Caracterizar y calibrar la Cuenca del Río Tempisque utilizando el sistema de simulación HydroBID.
- Analizar el efecto de las proyecciones de Cambio Climático de variaciones de temperatura y precipitación en la Cuenca del Río Tempisque mediante la modelación.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1. Zona de estudio

La Cuenca del Río Tempisque se ubica en el Noroeste de Costa Rica, siendo una de las cuencas más grandes del país con un área aproximada de 5 460 km<sup>2</sup>, drenada por 2 ríos principales, como lo son el Río Tempisque y el Río Bebedero. Ambos ríos convergen en un punto muy cercano a la desembocadura con el Golfo de Nicoya (Puerto Moreno), por lo que, la cuenca también se puede catalogar como dos cuencas separadas. (Mena, 2019).

Dentro de las principales características de la Subcuenca del Río Tempisque y la Subcuenca del Río Bebedero se muestran en la Tabla 1, en las que destacan:

*Tabla 1. Caracterización de las Subcuencas del Río Tempisque y Río Bebedero*

Característica	Subcuenca del Río Tempisque	Subcuenca del Río Bebedero
<b>Área</b>	3 382.07 km <sup>2</sup>	2 068.33 km <sup>2</sup>
<b>Altura Máxima</b>	1 900 m.s.n.m.	2 020 m.s.n.m.
<b>Altura Mínima</b>	0 m.s.n.m.	0 m.s.n.m.
<b>Longitud del cauce</b>	142.19 km	72.15 km
<b>Pendiente Cuenca</b>	10.29%	12.15%
<b>Pendiente Cauce</b>	3.87%	4.01%
<b>Actividades Socio productivas</b>	Ganadería extensiva Agricultura: - Arroz - Caña de azúcar - Forrajes / pastos - Melón - Sandía	Ganadería de carne Apicultura Acuicultura y pesca Agricultura - Arroz - Algodón - Sorgo - Granos (Frijol – maíz) - Caña de azúcar - Frutas - Hortalizas
<b>Climatología</b>	Tipo Pacífico -Periodo seco: Dic a Abr -Periodo lluvioso: May a Nov	Tipo Pacífico -Periodo seco: Nov a Abr -Periodo lluvioso: May a Nov
<b>Precipitación media anual</b>	1 500 – 4 000 mm	1 500 – 4 000 mm
<b>Temperatura media anual</b>	22 a 28°C	16 a 28°C
<b>Evapotranspiración anual</b>	1 200 – 2000 mm	1 300 – 2 000 mm
<b>Mayor demanda de agua</b>	Riego (77.9 %)	Riego (83.8 %)

Fuente: Elaborado con datos de (Rojas, 2011a) y (Rojas, 2011b)

La Cuenca del Río Tempisque pertenece a la región climática del Pacífico Norte, que se encuentra caracterizada por su alta estacionalidad de las lluvias, de mayo hasta octubre, con algunas disminuciones en las precipitaciones en los meses de julio-agosto, cuando incrementa la fuerza de los vientos alisios. Lo anterior se muestra en la Figura 1 (IMN, s.f.).



**Figura 1.** Regiones climáticas de Costa Rica  
**Fuente:** Adaptado de (IMN, s.f.)

La estacionalidad de las lluvias, sumado a un mal manejo de los recursos, ocasiona que, durante la época seca, exista un mayor riesgo para el consumo del recurso hídrico. Publicaciones (Díaz, 2016; García y Replogle, 2016) mencionan que a pesar del gran aporte del Río Tempisque para el sector agropecuario del país (75% de las aguas utilizadas en Costa Rica para la agricultura), existen alguna serie de problemas, como la contaminación, el uso indebido, el manejo de las concesiones, que ha preocupado a otros sectores económicos como la ganadería, ante la falta de agua, inclusive con declaratorias de emergencia a nivel nacional por sequías por parte de los gobiernos.

Esto ha generado que se tengan que buscar recursos hídricos superficiales de otras cuencas vecinas. Ejemplo de lo anterior es el proyecto conocido como el Distrito de Riego Arenal – Tempisque, el cual, en 1981 comenzaron las obras de unos de los proyectos hidráulicos de mayor envergadura dentro de Costa Rica, y fue creado con el objetivo de crear un sistema de producción agroindustrial, teniendo como eje central el riego. Por lo que este proyecto tenía la proyección de poder dotar de riego a alrededor de 75 000 ha, con aguas provenientes de la Vertiente Caribe (CATIE, 2014).

Bajo la misma línea y tratando de solventar los problemas de escasez de agua en una de las zonas con menor precipitación de Costa Rica, en el año 2015 se declaró de interés público el Programa Integral para el Abastecimiento de Agua para Guanacaste (Pacífico Norte) (PIAAG). El cual integra una serie de nuevos proyectos y acciones estratégicas para optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico, satisfaciendo las necesidades humanas y de las actividades productivas, manteniendo la sostenibilidad de los ecosistemas, contemplando alrededor de 54 proyectos (Poder Ejecutivo Costa Rica, 2015).

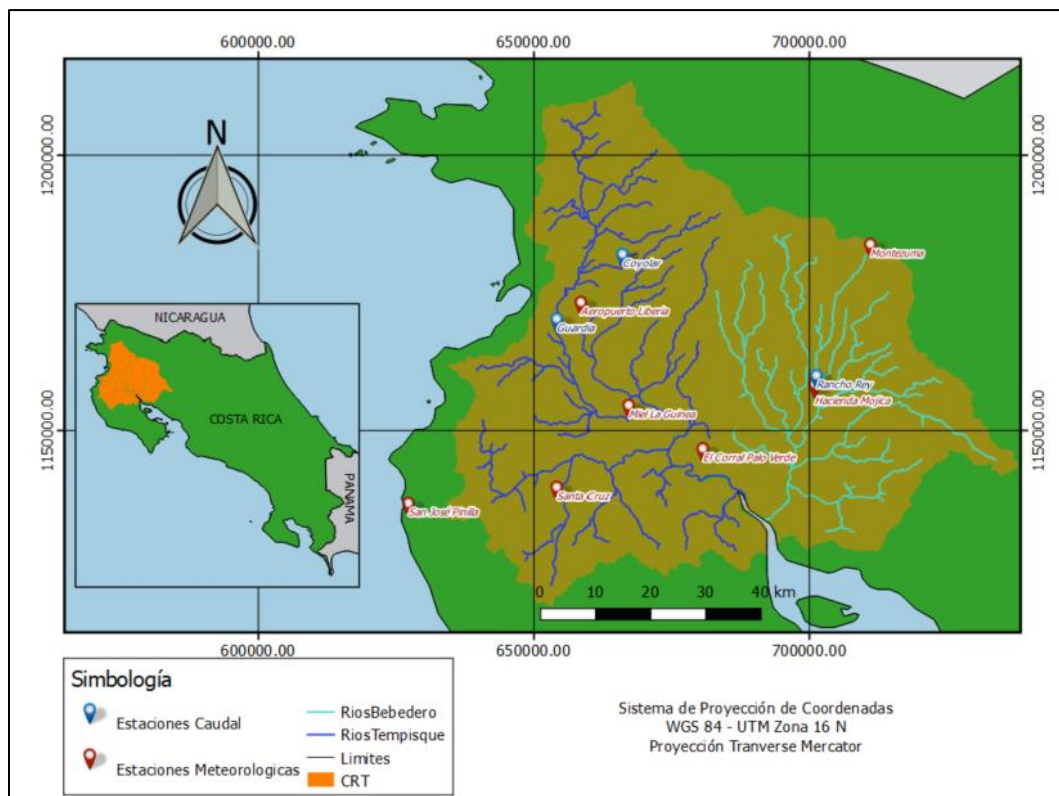
Dentro del PIAAG se encuentra el Proyecto de abastecimiento de agua para la cuenca media del Río Tempisque y comunidades costeras (PAACUME). Dicho proyecto pretende aprovechar parte la infraestructura actual del DRAT, construir un nuevo embalse en la intersección con el Río Piedras, y construir nueva infraestructura hidráulica, para dotar al país mayor capacidad de producción hidroeléctrica, agua para el sector agropecuario, agua de riego para zonas verdes en sitios turísticos y agua para consumo humano. En el pasado mes de mayo, 2022 se aprobó el préstamo con el BCIE, para poder dar comienzo con estas obras (Asamblea Legislativa Costa Rica, 2022).

Lo anterior pone en manifiesto, la necesidad de una buena gestión de los recursos hídricos de la zona, con la intercomunicación de todos los actores involucrados (públicos, privados y académicos), el catálogo de oferta y demanda de los recursos hídricos y la planificación estratégica, que permita anticipar condiciones desfavorables y mantener el equilibrio durante las épocas de abundancia.

### 3.2. Información y Análisis de datos climáticos

A diferencia de otros países, en Costa Rica no existe un centro de información abierto o de fácil acceso para obtener datos de estaciones meteorológicas estandarizadas, es decir, esta información pertenece a los dueños de las estaciones, y aunque en algunos casos, son instituciones públicas, que pueden suministrar la información de las variables y periodo de tiempo deseado, otras veces, se desconoce la existencia de otras estaciones que pueda brindar una mayor o mejor información por la cercanía del sitio de estudio.

Para el presente estudio, se logró la comunicación con dos instituciones públicas, como lo son el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), a quienes se solicitaron los últimos 20 años de información de climática (precipitación y temperatura) y de caudales respectivamente. La ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas obtenidas se muestran en la Figura 2, mientras que en la Tabla 2 se muestra un resumen de la información obtenida en cada una de ellas.



**Figura 2.** Ubicación de las estaciones meteorológicas y pluviométricas

**Tabla 2.** Resumen de la información obtenida de las estaciones para el estudio

ID	Estación	Fuente	Variable			Periodo disponible *	
			P (mm) <sup>1</sup>	T (°C) <sup>2</sup>	Q (m <sup>3</sup> /s) <sup>3</sup>	Inicio	Fin
72149	San José, Pinilla	IMN	✓	✓		1/4/2004	31/8/2022
74051	Aeropuerto Liberia	IMN	✓	✓		1/1/2000	30/9/2022
74053	Santa Cruz	IMN	✓	✓		1/1/2000	30/9/2022
74061	El Corral, Palo Verde	IMN	✓	✓		1/3/2012	30/9/2022
74067	Miel, La Guinea	IMN	✓	✓		3/4/2013	30/9/2022
76045	Montezuma	IMN	✓			1/1/2000	31/12/2016
76055	Hacienda Mojica	IMN	✓	✓		1/1/2000	30/6/2022
19-01	Guardia	ICE			✓	1/1/1990	1/7/2010
19-06	Coyolar	ICE			✓	1/1/2000	31/12/2020
20-03	Rancho Rey	ICE			✓	1/1/2000	31/12/2020

**Nota:**  
<sup>1</sup> Precipitación media diaria (mm)  
<sup>2</sup> Temperatura media diaria (°C)  
<sup>3</sup> Caudal medio diario (m<sup>3</sup>/s)  
\* Fechas en formato día/mes/año

La información que se obtienen de las estaciones meteorológicas no siempre estará completa, mantenimientos, sincronización de los equipos, problemas en la alimentación, entre muchos otros factores, pueden afectar la continuidad o cronología de la información. Estas lagunas de información pueden ser estimadas mediante aproximaciones lineales simples (Cuando son pocos los valores faltantes de una sola estación), o bien, mediante aplicación de técnicas de análisis de series temporales (Periodos largos de tiempo sin valores) (OMM, 2018).

La regresión puede tener valores entre -1 y 1, en donde los valores negativos, representan una relación débil o inversa entre las variables, mientras que para valores entre  $0.5 < r < 1$ , muestra una relación muy fuerte entre ellas. (Carrera-Villacrés et al., 2022). Por lo que, para las variables de información meteorológica como la precipitación y la temperatura, se estarán utilizando valores de regresión mayores a los 0.5.

En un estudio generado con datos de pluviometría en Costa Rica, se obtuvo que, de los métodos de estimación de datos faltantes, el que presentó las menores diferencias máximas entre los datos, fue el método de regresión múltiple. Este procedimiento es ideal en zonas donde la densidad de estaciones meteorológicas



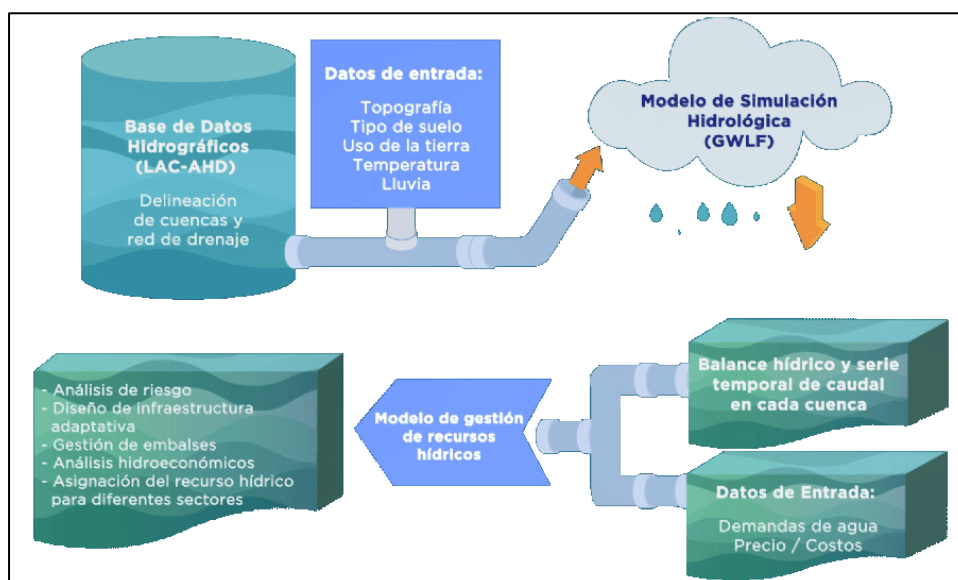
es alta y se pueden estimar los datos faltantes con la información de dos estaciones cercanas (Alfaro y Pacheco, 2000).

### 3.3. Sistema de simulación HydroBID

La necesidad de poder simular diferentes escenarios, predecir el comportamiento de un entorno ante el cambio de ciertas variables, la planificación de los recursos o de infraestructuras, son algunas de las facilidades que puede brindar un sistema de simulación, y HydroBID no es la excepción.

En su sitio web, HydroBID se define como: “Un sistema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos en la región de LAC, bajo escenarios de cambio (p. ej., clima, uso del suelo, población), que permite evaluar la cantidad y calidad del agua, las necesidades de infraestructura, y el diseño de estrategias y proyectos de adaptación en respuesta a estos cambios” (BID, 2022).

La Figura 3 muestra la estructura en la que está basado el sistema de simulación HydroBID:

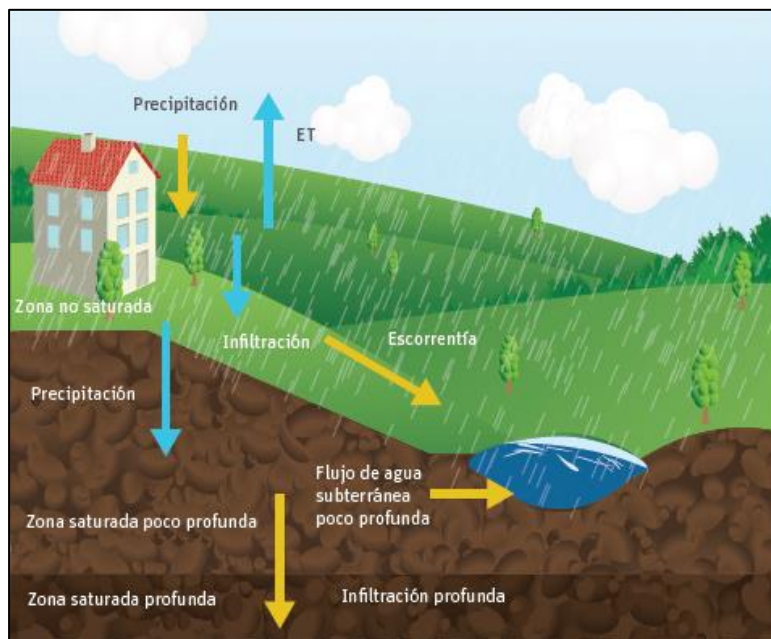


**Figura 3.** Estructura de funcionamiento HydroBID  
Fuente: Tomado de (BID, 2022)

Como se aprecia en la Figura 3, el sistema de modelación HydroBID se basa en las características físicas que pueda tener la cuenca (topografía, área de cobertura, tipo de suelo, uso de la tierra, entre otros), su relación con otras cuencas cercanas, la información meteorológica de las estaciones cercanas para elaborar un modelo

de lluvia-escorrentía (GWLF, por sus siglas en inglés), que permite obtener una modelación, que también puede ser calibrada con información de los caudales de la zona. Toda esta información le permite al usuario final tener los insumos de su balance hídrico para que pueda realizar la toma de decisiones en su gestión.

El modelo GWLF estima la escorrentía utilizando el método de Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), almacenando este dato dentro de la base de datos AHD, y contrastándolo con la información del tipo de suelo, y de cobertura. Después de la escorrentía, el exceso de precipitación infiltra al suelo no saturado, donde puede retornar al ciclo como evaporación, o bien, percolar a las zonas más profundas. Los flujos subterráneos se combinan con la escorrentía para determinar los caudales diarios y su continuidad con otras cuencas (Moreda et al., 2017). En la Figura 4 se muestra el esquema del modelo GWLF.



**Figura 4.** Representación esquemática del modelo GWLF  
**Fuente:** Tomado de (Moreda, Miralles-Wilhelm, & Muñoz, 2014)

### 3.4. Calibración del modelo de simulación HydroBID

Luego de introducir los datos al modelo HydroBID, este requiere de un proceso de calibración de algunas variables, de manera que se pueda ajustar o acercar los caudales simulados con los caudales observados. La calibración se realiza de manera manual por cada subcuenca de trabajo mediante el proceso iterativo o de prueba y error. La Tabla 3 muestra los valores recomendados para la calibración para las diferentes variables asociadas.

**Tabla 3.** Valores recomendados de calibración

Variable	Descripción	Rango recomendado	Calibración
<b>Número de Curva (CN)</b>	Controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía. Valores por defecto están disponibles en base de datos	0.8 – 1.2 (Multiplicador)	Reducir CN, reduce los caudales altos, dando una menor sensibilidad a los eventos de precipitación.
<b>Contenido Disponible de Agua (AWC)</b>	Activa el inicio de la percolación. Valores por defecto están disponibles en la base de datos	0.2 – 1.2 (Multiplicador)	Aumentar AWC, interacciona con RC y altera el caudal, teniendo un mayor impacto en los caudales bajos.
<b>Coeficiente de Recesión (RC)</b>	Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado	0.001 – 0.75 / día	Aumentar RC, aumentará la pendiente de la curva de salida del modelo
<b>Coeficiente de percolación (Seepage)</b>	Coeficiente que controla la tasa de filtración en el acuífero subterráneo	0.005 – 0.1 / día	Reducir Seepage, aumentará la escorrentía en la calibración.
<b>Factor ET durante crecimiento de cultivo</b>	Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo.	0.5 – 1.5 (Multiplicador)	Estos parámetros puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas. (Los valores de las cuencas no están disponibles)
<b>Factor ET durante estación latente de cultivo</b>	Factor de evapotranspiración durante la estación de latencia (cuando no se está cultivando).	0.5 – 1.5 (Multiplicador)	
<b>Porcentaje Porción impermeable de la cuenca</b>	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca en %.	1%	

Fuente: Elaborado con recomendaciones de (Moreda, Miralles-Wilhelm y Muñoz, 2014) y personal técnico de HydroBID

Por otra parte, el modelo HydroBID produce estadísticas comparativas entre los caudales observados y simulados, dichas estadísticas tienen el objetivo de poder conocer el nivel de relación entre la realidad y el modelo, evaluando su efectividad. Las estadísticas de calibración se muestran en la Tabla 4:

**Tabla 4.** Estadísticas de calibración de HydroBID

Variable	Descripción
<b>Error de Volumen general (Ove)</b>	Indica la media del porcentaje de error entre los valores simulados y los valores observados. Optimo cercano a % de error máximo permitido.
<b>Error de Volumen Anual (ave)</b>	
<b>Error de Volumen Mensual (mve)</b>	
<b>Correlación (r)</b>	Analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observados y simulados. Optimo cercano a 1
<b>Coeficiente modificado de correlación (<math>r_{mod}</math>)</b>	Analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observados y simulados, aplicando un factor que relaciona los valores mínimos y máximos. Optimo cercano a 1
<b>Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (<math>R^2</math>):</b>	Analiza la magnitud de la relación observada entre las varianzas de los flujos simulados y observados. Optimo cercano a 1.

Fuente: Elaborado con recomendaciones de (Moreda, Miralles-Wilhelm y Muñoz, 2014) y personal técnico de HydroBID

### 3.5. Proyecciones de datos climáticas

Incremento de la Temperatura, disminución o incremento de las precipitaciones, afectación o destrucción de los ecosistemas, aumento de los niveles del mar en zonas costeras, entre otras, son algunas de las incertidumbres que genera el futuro ante algunas situaciones de cambio climático. Es por ello que diferentes expertos en el tema se han reunido para generar indicadores y metodologías para generar diferentes proyecciones del comportamiento del planeta ante diferentes escenarios (IPCC, 2018).

Estas proyecciones toman como base el Acuerdo de París de 2016 para tratar de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. En dicho acuerdo, uno de los temas más relevantes fue el escenario que ante el incremento de 2°C en la temperatura podría tener inclusive efectos irreversibles en el planeta. Es por ello que se trata como límite máximo un calentamiento global de 1.5° C. Costa Rica tampoco se queda atrás, y también ha generado políticas y estrategias para tratar de reducir sus emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) para lograr sus objetivos en 2050 (DCC, 2020).

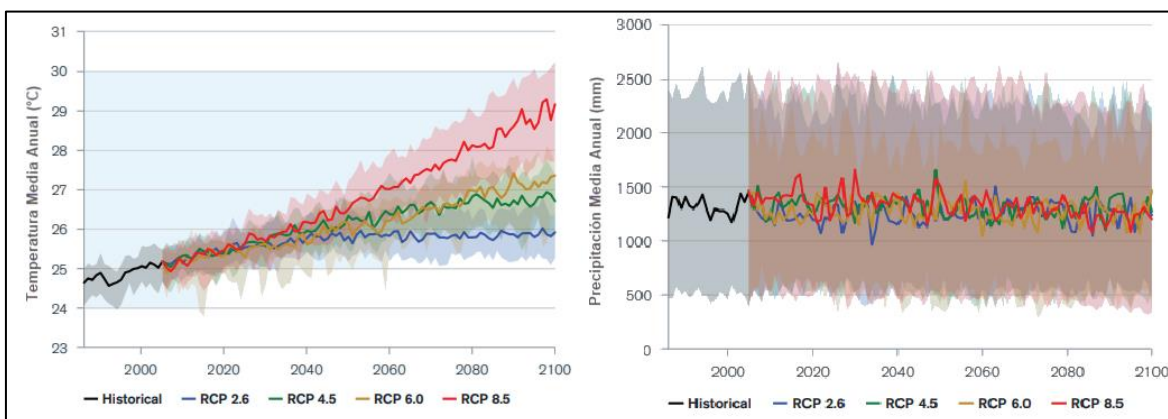
En el quinto informe del IPCC se definieron 4 escenarios llamados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés) las cuales tratan en mayor o menor medida, escenarios que contienen esfuerzos para mitigar un Forzamiento Radiativo (que se puede definir como el dominio de un factor sobre el equilibrio energético del planeta) para el año 2100 entre los 2.6 y 8.5 W/m<sup>2</sup>. Si un Forzamiento Radiativo es positivo la superficie de la Tierra tenderá a calentarse, caso contrario, si el forzamiento es negativo (IPCC, 2018).

Según (IPCC, 2018), los RCP que se utilizaron para desarrollar proyecciones climáticas en la CMIP5 se muestran en la Tabla 5:

*Tabla 5. Escenarios de emisión RCPs*

Escenario	Forzamiento Radiativo	Comentario
RCP 2.6	2.6 W/m <sup>2</sup>	Escenario ideal, con emisiones bajas
RCP 4.5	4.5 W/m <sup>2</sup>	Escenario de estabilización, con emisiones medias
RCP 6.0	6.0 W/m <sup>2</sup>	
RCP 8.5	8.5 W/m <sup>2</sup>	Escenario más desfavorable, con emisiones altas

Para el caso de Costa Rica, para la temperatura se proyecta un crecimiento de +1.48°C para el año 2050 y de +3.08°C para el 2100 bajo el escenario de emisiones altas (RCP 8.5); mientras que para la precipitación hay incertidumbre para el futuro de los patrones de lluvia, principalmente obedecido por la variedad interanual de precipitaciones por el fenómeno del Niño (ENOS) (WBG, 2021a). La figura 5 muestra las proyecciones de temperatura media y precipitación diaria hasta el año 2100, según los diferentes escenarios de emisiones.



**Figura 5.** Proyecciones de Temperatura Media y Precipitación en Costa Rica para el 2100 según los diferentes RCP

**Fuente:** Tomado de (WBG, 2021a)

Los datos de estas proyecciones pueden ser obtenidas en algunos sitios web oficiales<sup>1</sup> como el formato de reportes o documentos, o bien, en formato de hojas de cálculo para ser utilizados en metodologías. En nuestro caso se utilizarán las proyecciones del Portal de conocimiento sobre el cambio climático (CCPK por sus siglas en inglés).

<sup>1</sup> Sitio Web del IPCC: <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>  
Sitio Web del CCPK: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Delimitación de la Cuenca del Río Tempisque**

El modelo de simulación de HydroBID utiliza una interfaz para el geoprocesamiento de información, por lo que se puede ejecutar la Herramienta de Navegación AHD disponible en QGIS<sup>2</sup>. Con esta herramienta se pudo seleccionar la subcuenca aguas abajo y mediante su geoprocesamiento, se obtuvo la información de las subcuencas y ríos (Número Único de identificación de Cuenca - denominado COMID, área de cobertura, distancia de ríos, entre otros), que drenan a este punto específico.

### **4.2. Información y análisis de datos climáticos y caudales**

La precipitación diaria y la temperatura media diaria son 2 de los principales insumos para el modelo de simulación de HydroBID, por lo que se solicitó información del mayor número de estaciones meteorológicas posibles al IMN, presentes en la Cuenca del Río Tempisque, para un periodo de los últimos 20 años.

Dicha información climática no está completa al 100%, por lo que es necesario el uso de modelos estadísticos para poder completar la serie de datos, o bien, el descarte de la información de alguna estación meteorológica que parezca tener datos alterados que puede afectar los resultados del estudio. Por lo que se siguieron las recomendaciones de Alfaro y Pacheco (2000) y se utilizó el método de regresión lineal múltiple para poder completar la información de los datos faltantes en las series de datos, basado en los procedimientos de (OMM, 1966). Para la obtención de algunos parámetros estadísticos se utilizaron las herramientas estadísticas o de análisis de datos de Microsoft Excel y R studio. Las series de datos climáticos fueron completadas para el periodo de tiempo entre el 01 de enero del 2000 al 30 de junio del 2022.

---

<sup>2</sup> QGIS es un programa de Sistema de Información Geográfica, de código abierto o gratuito, capaz de manejar información georeferenciada en capas ráster o vectoriales y su análisis. La versión utilizada para el presente TFM fue la 2.18

Por otro lado, se solicitó información de caudales con el mayor número de estaciones pluviográficas posibles al ICE, presentes en la Cuenca del Río Tempisque, para un periodo de los últimos 20 años.

#### **4.3. Preprocesamiento de la información para HydroBID**

Una vez completa la información meteorológica, esta debe ser estructurada en archivos CVS (valores separados por comas) en 2 columnas (fecha y valor). Por otro lado, se debe generar un archivo con la información de localización de las estaciones meteorológicas (Latitud y Longitud), con el sistema de coordenadas utilizado por HydroBID (WGS 84). Por último, se generó un archivo con la información de los centroides (Centro de masa de las subcuencas).

Posteriormente se realizó una interpolación de los datos meteorológicos con las estaciones disponibles y las subcuencas obtenidas. El procedimiento de la interpolación, integrado en HydroBID se detalla en el Anexo 8.2.

De la misma manera que la información meteorológica, los datos de caudales deben ser organizados en un formato CVS de dos columnas (fecha y valor). Esta información la utiliza el modelo de simulación para contrastar los valores observados y los valores simulados, y poder calibrar el modelo.

#### **4.4. Proyección de datos climáticos**

Para la obtención de los datos climáticos futuros según las proyecciones de cambio climático se utilizó la metodología expuesta en el Portal de Conocimiento sobre Cambio Climático (WBG, 2021b). En donde primeramente se obtienen los datos de la línea base o comparativa, del año 1990 al 2020 para las variables de precipitación y temperatura, y posteriormente se obtienen los datos de la proyección CMIP5, buscando las anomalías existentes en 2 periodos de tiempo diferentes (hasta 2039 y 2059), bajo los 4 escenarios o Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs) para Costa Rica.

Al ser proyecciones basadas en umbrales de rangos, se utilizó la información con percentil 50, es decir, los más cercanos a la media, y bajo el modelo de conjunto

de múltiples modelos. Dichas proyecciones fueron contrastadas para obtener los multiplicadores para la precipitación y temperatura que serán utilizados en el modelo de simulación de HydroBID, una vez calibrado el modelo, para la obtención del comportamiento de la CRT ante escenarios de cambio climático.

#### **4.5. Simulación y Calibración de la CRT con HydroBID**

Una vez que se cuentan con todos los insumos necesarios para el modelo de simulación en HydroBID (COMID de la subcuenca de inicio, interpolación de los datos climáticos, caudales de control, uso del suelo, entre otros), se procede con la definición del periodo de tiempo en el que se va realizar la modelación. Es importante mencionar, que este periodo de tiempo debe ser menor o igual al periodo de información de los datos climáticos. Por otra parte, se debe seleccionar el periodo de tiempo (años) que usa el modelo como ajuste, para nuestro caso se utilizó un año.

Una vez realizada la primera iteración del modelo, se comienzan a ajustar las variables del Número de Curva, Contenido Disponible de Agua, Coeficiente de Recesión y Coeficiente de percolación, principalmente, para poder calibrar el modelo, de manera que tanto el resultado de las curvas de ajuste entre el valor observado y el simulado y las estadísticas de calibración de HydroBID, tengan la menor diferencia posible.

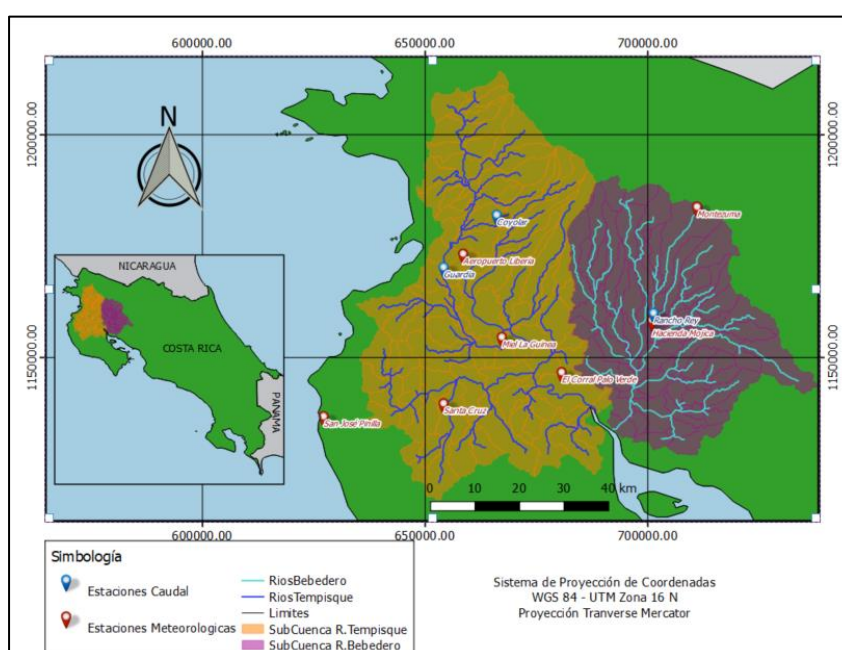
Una vez calibrado el modelo, se establecen los valores de calibración como fijos, y se procede con la utilización de los multiplicadores de precipitación y temperatura, para realizar la proyección de la simulación de la Cuenca del Río Tempisque ante los escenarios de cambio climático.



## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

### 5.1. Delimitación de la Cuenca del Río Tempisque

Luego de introducir los shapefiles de la AHD en QGIS, y con ayuda de la herramienta de navegación AHD, se obtuvo que la Cuenca del Río Tempisque, no es vista como una sola cuenca, sino que drena en 2 grandes Subcuencas, la Subcuenca del Río Tempisque y la Subcuenca del Río Bebedero. La Figura 6 muestra la delimitación espacial de las Subcuencas, mientras que la Tabla 6 muestra un resumen de las características obtenidos para cada una de las subcuencas con la herramienta de navegación AHD:



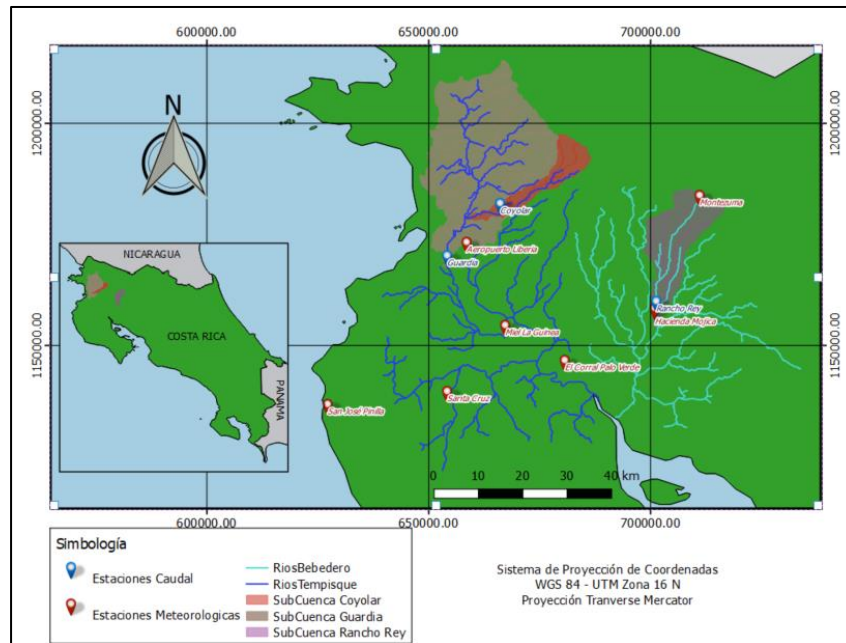
**Figura 6.** Delimitación de las Subcuencas para la simulación en HydroBID

**Tabla 6.** Características de las subcuencas según información AHD

Subcuenca	Río Tempisque	Río Bebedero
COMID Inicio	212546500	212550900
Cantidad de subcuencas	123	75
Área total	3301.52 km <sup>2</sup>	2082.52 km <sup>2</sup>
Longitud total de ríos	762 km	512 km

Comparando los resultados de las áreas con la información del Atlas de Costa Rica, se pueden observar diferencias del -2.4% para el caso de la cuenca del Río Tempisque, y de 0.7% para el caso de la Subcuenca del Río Bebedero, por lo que la información de la AHD tiene bastante similitud con la información oficial del Gobierno de Costa Rica, aumentando su confiabilidad en el uso de esta información en el modelo.

De la misma manera se pueden calcular las áreas de drenaje o influencia para cada una de las estaciones de control, por lo que al considerar la subcuenca a las que pertenecen las estaciones pluviométricas. La Figura 7 muestra la delimitación espacial de las subcuencas generadas para cada estación de control y la Tabla 7 muestra un resumen de las características obtenidos para cada una de las subcuencas.



**Figura 7.** Delimitación de las Subcuencas para la simulación en HydroBID según puntos de control de las estaciones pluviométricas.

**Tabla 7.** Características de las subcuencas según información AHD según puntos de control de las estaciones pluviométricas.

Subcuenca	Coyolar	Guardia	Rancho Rey
<b>Pertenencia</b>	SC R.Tempisque	SC R.Tempisque	SC R.Bebedero
<b>COMID Inicio</b>	212504800	212513600	212529900
<b>Cantidad de subcuencas</b>	5	41	7
<b>Área total</b>	114.54 km <sup>2</sup>	918.32 km <sup>2</sup>	239.67 km <sup>2</sup>
<b>Longitud total de ríos</b>	42 km	221 km	65 km

Con los datos de la tabla anterior, se puede observar que el área de las subcuencas que puede ser analizada en el modelo es de 1272.53 km<sup>2</sup>, es decir, un 23,6% del área total de la Cuenca del Río Tempisque, lo que representa una limitante muy importante para la verificación del modelo.

## 5.2. Análisis de datos climáticos y caudales

Gracias a la información suministrada por el IMN, se pudo obtener datos de 7 estaciones meteorológicas, de las cuales, todas contaban con datos de precipitación diaria, y únicamente 1 estación no contaba con información de temperatura media (Estación meteorológica de 76045 Montezuma). Las Tablas 8 y 9 muestran los resultados de un primer análisis de los datos obtenidos y los datos faltantes (o por completar) para el periodo de estudio entre 01 enero del 2000 y el 30 junio del 2022 de las estaciones meteorológicas.

**Tabla 8.** Resumen de datos faltantes por estación meteorológica - precipitación diaria CRT.

Variable	Estación 72149	Estación 74051	Estación 74053	Estación 74061	Estación 74067	Estación 76045	Estación 76055
Fecha Inicio*	1/1/2000						
Fecha Final*	30/6/2022						
Total Datos	8217						
Datos faltantes	2492	116	691	4867	5173	2552	322
Datos faltantes Inicio	1552	-	-	4443	4842	-	-
Datos faltantes Final	-	-	-	-	-	2007	-
Días consecutivos sin datos	412	30	475	106	141	185	247
Porcentaje de datos faltantes	30%	1%	8%	59%	63%	31%	4%
Porcentaje de datos faltantes disponibles	14%	1%	8%	11%	10%	7%	4%
<b>Nota:</b>							
* Fechas en formato día/mes/año							

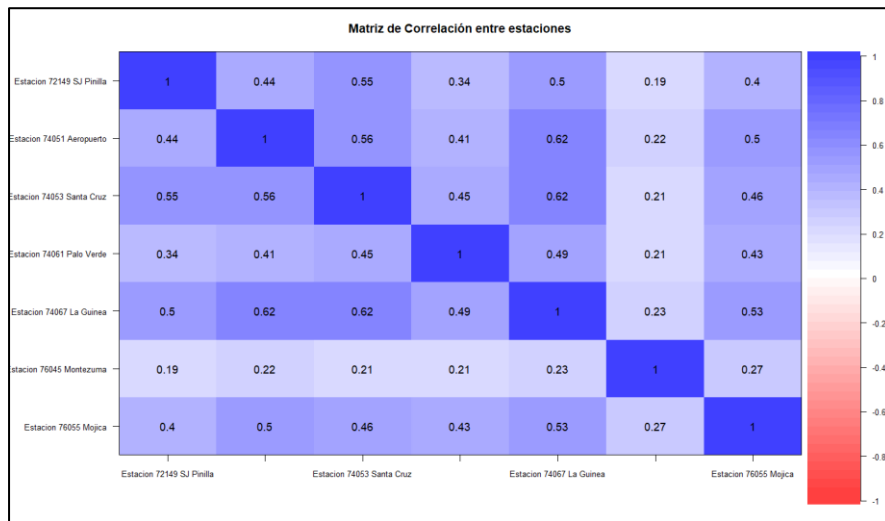
**Tabla 9.** Resumen de datos faltantes por estación meteorológica - temperatura media diaria CRT.

Variable	Estación 72149	Estación 74051	Estación 74053	Estación 74061	Estación 74067	Estación 76055
Fecha Inicio*	1/1/2000					
Fecha Final*	30/6/2022					
Total Datos	8217					
Datos faltantes	2506	176	646	4647	5118	554
Datos faltantes Inicio	1552	-	-	4443	4842	-
Datos faltantes Final	-	-	-	-	-	-
Días consecutivos sin datos	411	61	475	97	140	247
Porcentaje de datos faltantes	30%	2%	8%	59%	62%	7%
Porcentaje de datos faltantes disponibles	14%	2%	8%	5%	8%	7%
<b>Nota:</b>						
* Fechas en formato día/mes/año						

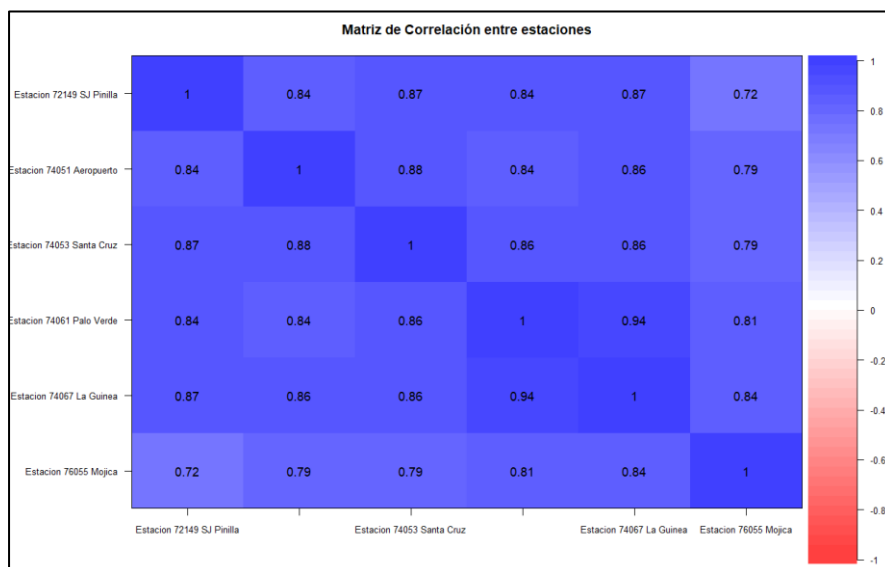
El porcentaje de datos faltantes disponibles se refiere al porcentaje de datos faltantes sin contemplar el periodo de estudio, es decir, únicamente con las fechas disponibles, ya que algunas estaciones entraron o dejaron de funcionar fuera del periodo de estudio.

De los resultados obtenidos en las Tablas 8 y 9, se puede observar que para algunas estaciones meteorológicas, la cantidad días consecutivos supera el año calendario, lo que dificulta el relleno de dichos datos con métodos estadísticos como la media aritmética, es especial por la alta variabilidad climática interanual, y favorece el uso de métodos como la regresión lineal múltiple, con las estaciones con menor cantidad de datos faltantes como estaciones base o de referencia.

Para conocer el grado de afinidad entre las estaciones meteorológicas, se realizó un análisis de regresión, las Figura 8 y 9 muestran los resultados obtenidos para el análisis de regresión, tanto para precipitación como para la temperatura:



**Figura 8.** Análisis de regresión entre las estaciones para la variable de precipitación diaria.



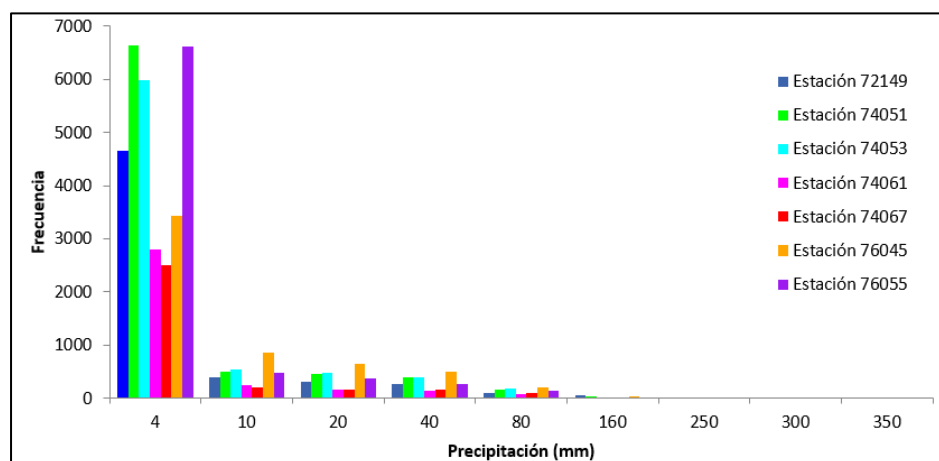
**Figura 9.** Análisis de regresión entre las estaciones para la variable de temperatura media.

Según lo observado en las Figuras 8 y 9, la regresión entre las estaciones meteorológicas es positiva en todos los casos, lo que representa una relación directa entre las estaciones. Por otra parte, se analizaron algunas variables estadísticas, para conocer el comportamiento de los datos climáticos. Las Tablas 10 y 11 muestran los resultados obtenidos para la precipitación diaria y temperatura media diaria respectivamente, mientras que las Figuras 10 y 11 muestran los histogramas con las frecuencias con la que se repiten los datos de precipitación diaria y temperatura media diaria respectivamente, según diferentes rangos:

Para el caso de la precipitación se obtuvieron los siguientes valores:

**Tabla 10.** Resumen variables estadísticas para los datos de precipitación diaria CRT.

Variable estadística	Estación 72149	Estación 74051	Estación 74053	Estación 74061	Estación 74067	Estación 74045	Estación 76055
Promedio	4.78	4.35	4.72	4.09	5.16	7.79	3.46
Error Estándar	0.20	0.14	0.14	0.20	0.26	0.19	0.12
Mediana	0	0	0	0	0	0	0
Moda	0	0	0	0	0	0	0
Desviación Estándar	14.90	12.66	12.39	11.61	14.57	14.00	10.41
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0
Máximo	280.2	252.6	236.7	123.6	306.4	170.0	180.8
Cantidad datos	5787	8187	7618	3441	3136	5665	7895
Nivel confianza (95%)	0.38	0.27	0.28	0.39	0.51	0.36	0.23

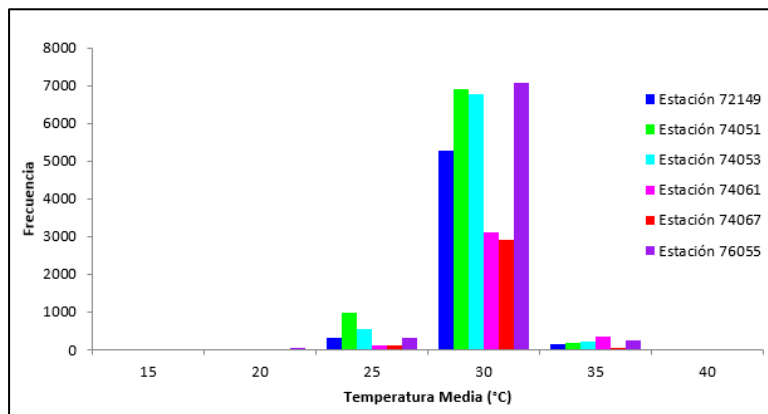


**Figura 10.** Histograma de frecuencias para la precipitación diaria CRT.

Como se observa en los resultados obtenidos de la Tabla 10 y la Figura 10, la CRT presenta una alta cantidad de datos donde la precipitación es nula o menor a los 4 mm, y en donde las precipitaciones mayores a los 100 mm pueden considerarse como anomalías o propios de algún evento meteorológico como huracanes.

**Tabla 11.** Resumen variables estadísticas para los datos de temperatura media diaria CRT.

Variable estadística	Estación 72149	Estación 74051	Estación 74053	Estación 74061	Estación 74067	Estación 76055
<b>Promedio</b>	27.09	26.84	27.14	27.83	27.21	27.5
<b>Error Estándar</b>	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
<b>Mediana</b>	26.9	26.7	27.0	27.8	27.1	27.5
<b>Moda</b>	26.3	26.2	26.7	26.8	26.5	27.4
<b>Desviación Estándar</b>	1.43	1.55	1.52	1.62	1.35	1.48
<b>Mínimo</b>	22.9	22.1	22.4	23.0	23.0	17.1
<b>Máximo</b>	32.0	31.4	32.3	32.6	31.9	34.0
<b>Cantidad datos</b>	5711	8040	7570	3570	3099	7663
<b>Nivel confianza (95%)</b>	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05	0.03



**Figura 11.** Histograma de frecuencias para la temperatura media diaria CRT.

Como se observa en los resultados obtenidos de la Tabla 11 y la ilustración 11, la CRT la mayoría de los datos están cercanos al promedio, por lo que se ajustarían también a una curva de distribución normal.

Pese a que el modelo de simulación HydroBID no tiene como requisito que se utilicen la misma cantidad de estaciones para los datos de precipitación y temperatura, se decidió eliminar la información de la estación meteorológica de 76045 Montezuma, para descartar cualquier tipo de incertidumbre en la modelación, y también, porque es la estación que menor relación directa tiene con las otras estaciones, o tiene una relación débil con la variable de precipitación.

Se completaron los datos de la serie faltantes aplicando la regresión lineal múltiple, con las dos estaciones que tuvieran mayor proximidad y una regresión mayor al 0.5, (relación directa fuerte), para la precipitación y la temperatura. Las Figuras 12 y 13 muestran las series de datos completa para las diferentes estaciones para el periodo de estudio del 01 de enero del 2000 al 30 de junio del 2022.

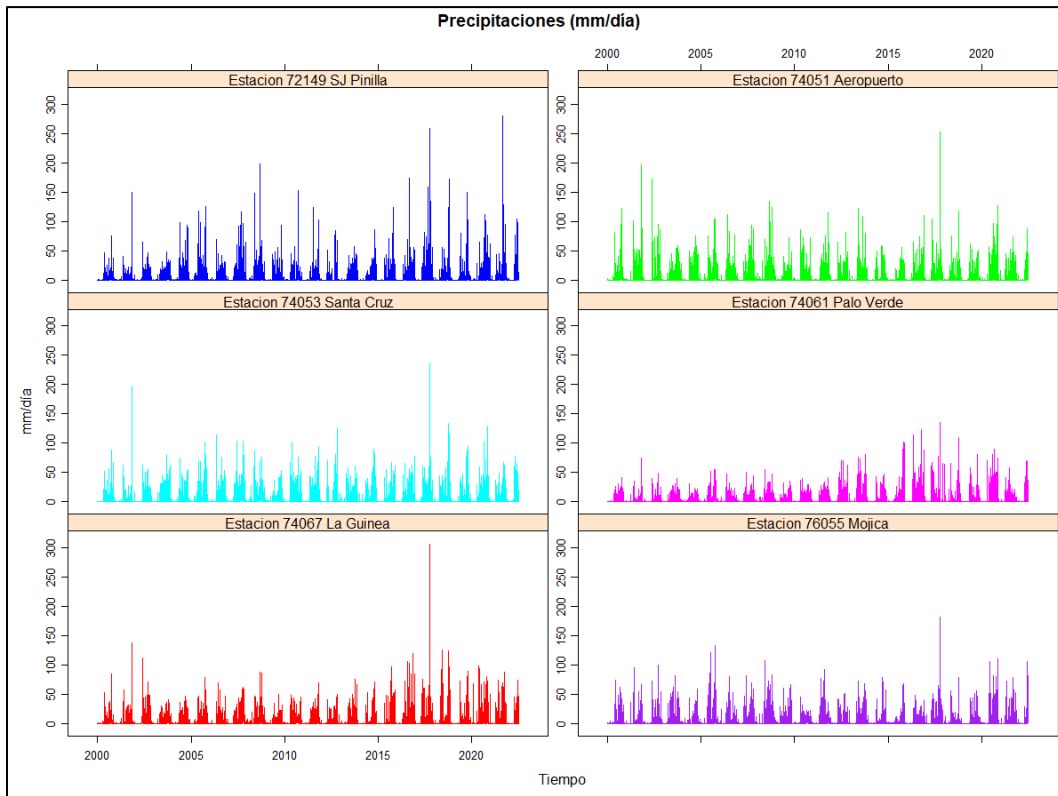


Figura 12. Datos de precipitación diaria completa para la CRT.

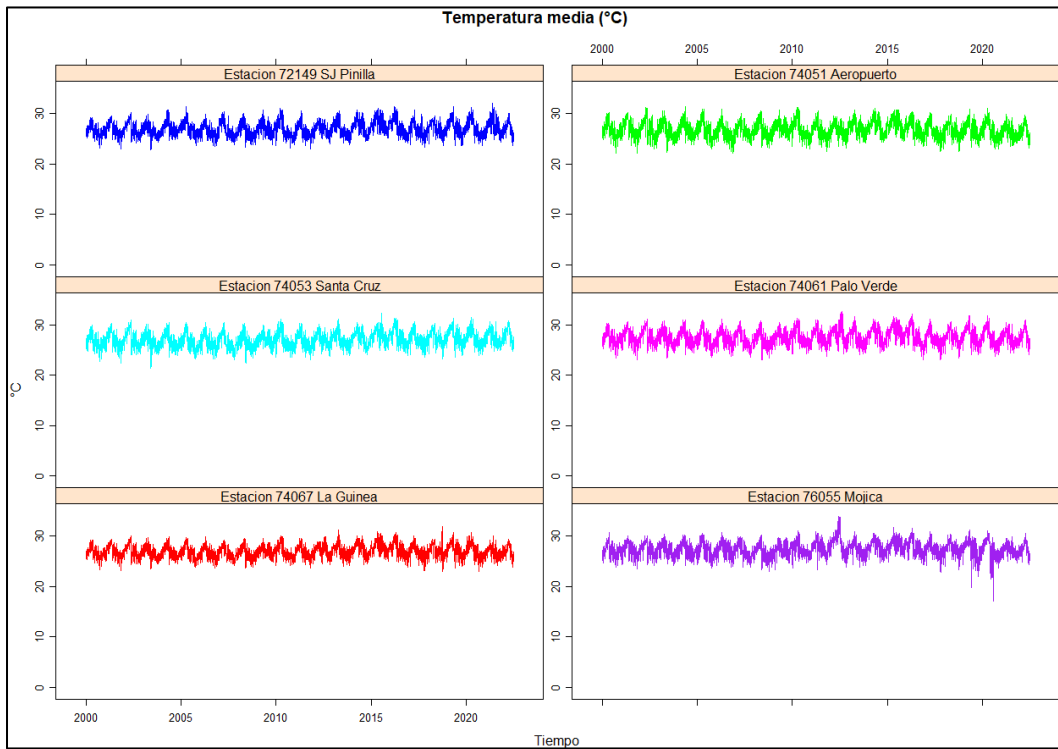


Figura 13. Datos de temperatura media completa para la CRT.

### 5.3. Proyección de datos climáticos

Luego de obtener la información de la línea base de Costa Rica y sus provincias, y sus respectivas proyecciones de anomalías climáticas al corto plazo (2020 – 2039) y al mediano plazo (2040 – 2059). Las Tablas 12 y 13 muestran los multiplicadores obtenidos para la precipitación diaria y la temperatura media diaria respectivamente:

**Tabla 12.** Proyecciones de la precipitación ante escenarios de cambio climático – Costa Rica (Multiplicador).

Periodo	Guanacaste		Costa Rica	
	2020-2039	2040-2059	2020-2039	2040-2059
<b>RCP2.6</b>	0.952	0.949	0.969	0.980
<b>RCP4.5</b>	0.965	0.995	1.004	1.007
<b>RCP6.0</b>	0.976	0.972	0.992	0.992
<b>RCP8.5</b>	1.032	1.027	1.025	1.018

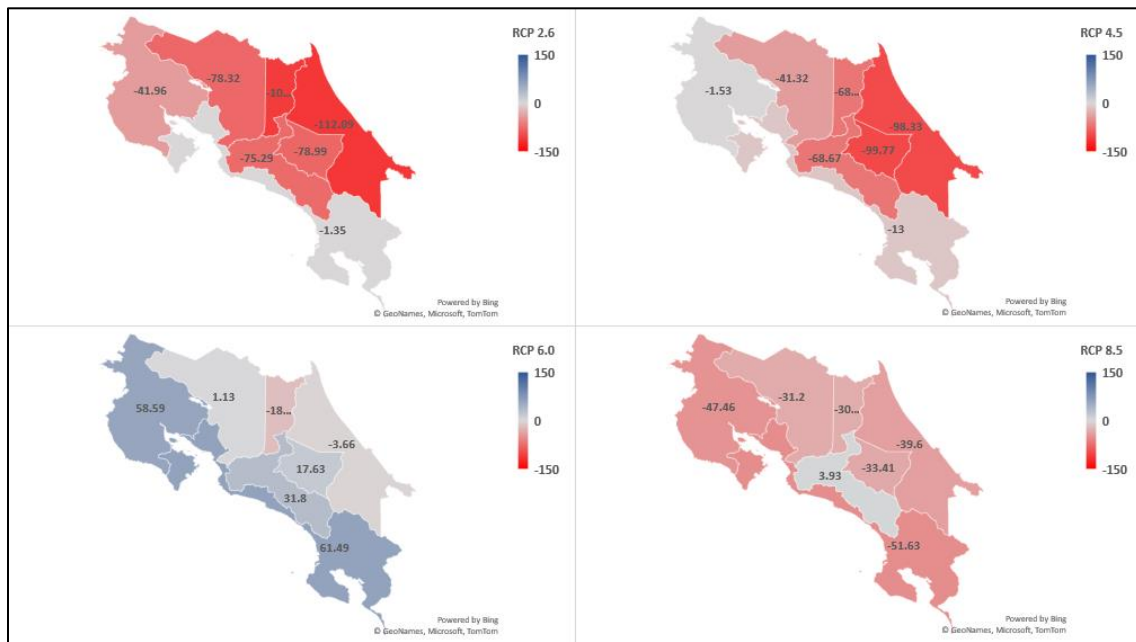
**Tabla 13.** Proyecciones de la Temperatura media ante escenarios de cambio climático – Costa Rica (Incremento).

Periodo	Guanacaste		Costa Rica	
	2020-2039	2040-2059	2020-2039	2040-2059
<b>RCP2.6</b>	0.78	0.95	0.79	0.96
<b>RCP4.5</b>	0.82	1.26	0.82	1.27
<b>RCP6.0</b>	0.63	1.09	0.66	1.09
<b>RCP8.5</b>	0.90	1.67	0.91	1.69

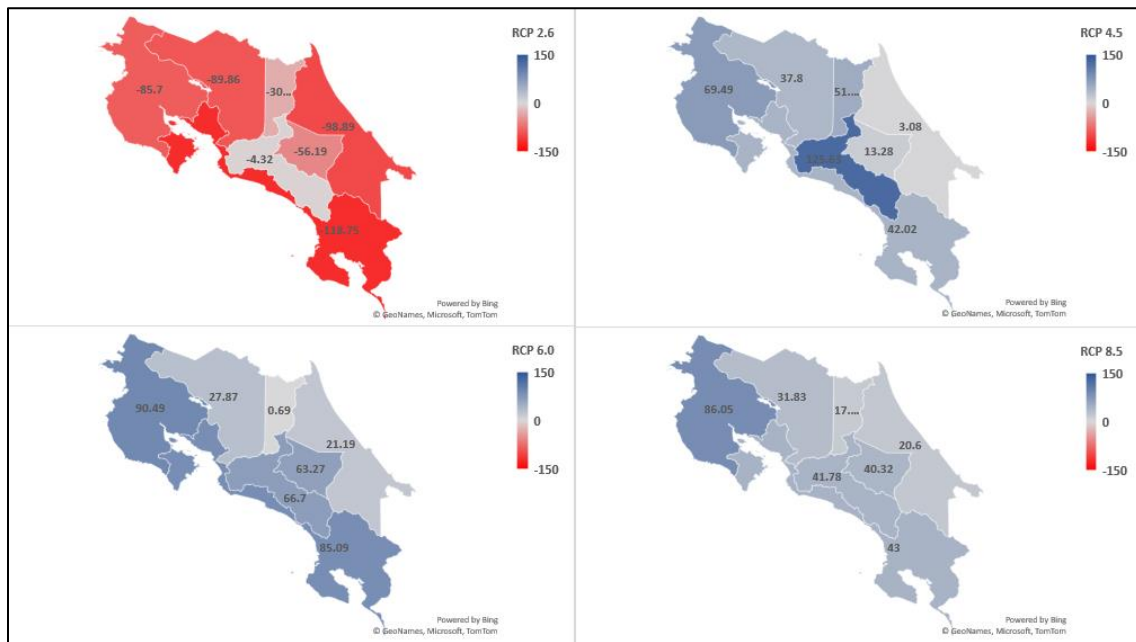
Las proyecciones de precipitación presentan una incertidumbre en cuanto a su tendencia, ya que esta presenta multiplicadores que aumentan y disminuyen la precipitación a lo largo del tiempo, esto debido a la gran variabilidad climática en la que se encuentra Costa Rica, según las influencias del océano pacífico (Fenómeno ENOS) y su variabilidad en precipitaciones durante la época de huracanes, lo que dificulta la predicción de eventos futuros.

Caso contrario con la temperatura, donde sí se puede observar una tendencia de incremento de la temperatura media (27.27°C según línea base), no solo para la provincia de Guanacaste (ubicación de la CRT) sino también, para Costa Rica en general. Este incremento para el escenario más crítico (RCP 8.5) podría conllevar un aumento en la temperatura media con más de 1.67°C para el periodo 2040 – 2059. Las Figuras 14 y 15 muestran los incrementos y/o disminuciones de precipitaciones promedio anuales para el territorio de Costa Rica en el corto y mediano plazo respectivamente, mientras que las Figuras 16 y 17 muestran el incremento de temperatura media anual.



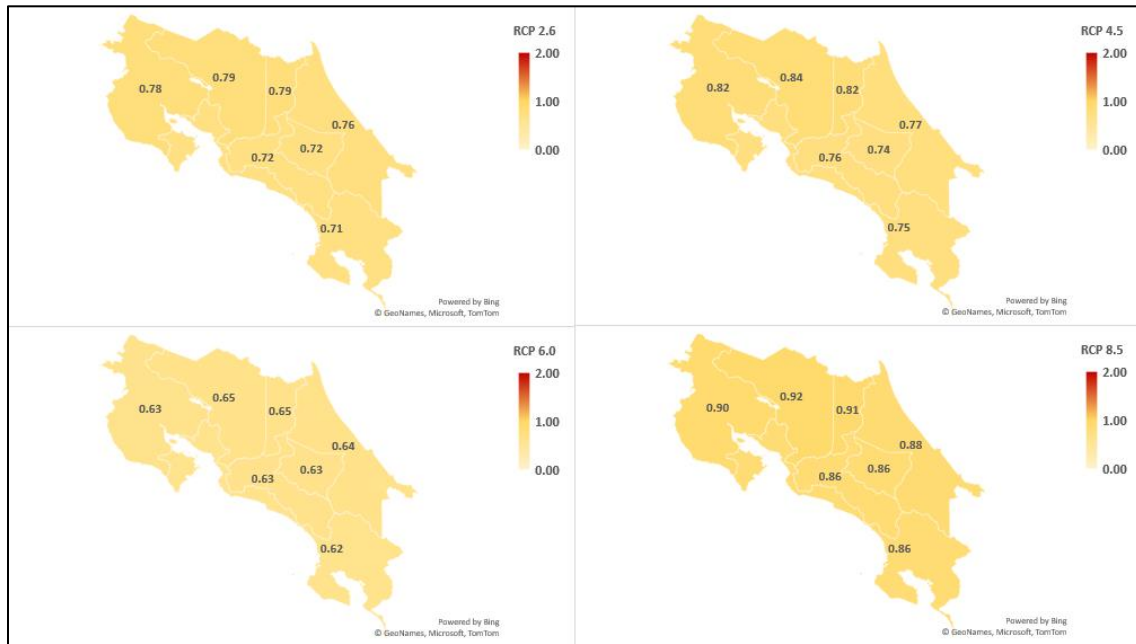


**Figura 14.** Incremento y/o disminución de Precipitaciones (mm) para Costa Rica a corto plazo (2020 – 2039) según escenarios de cambio climático.

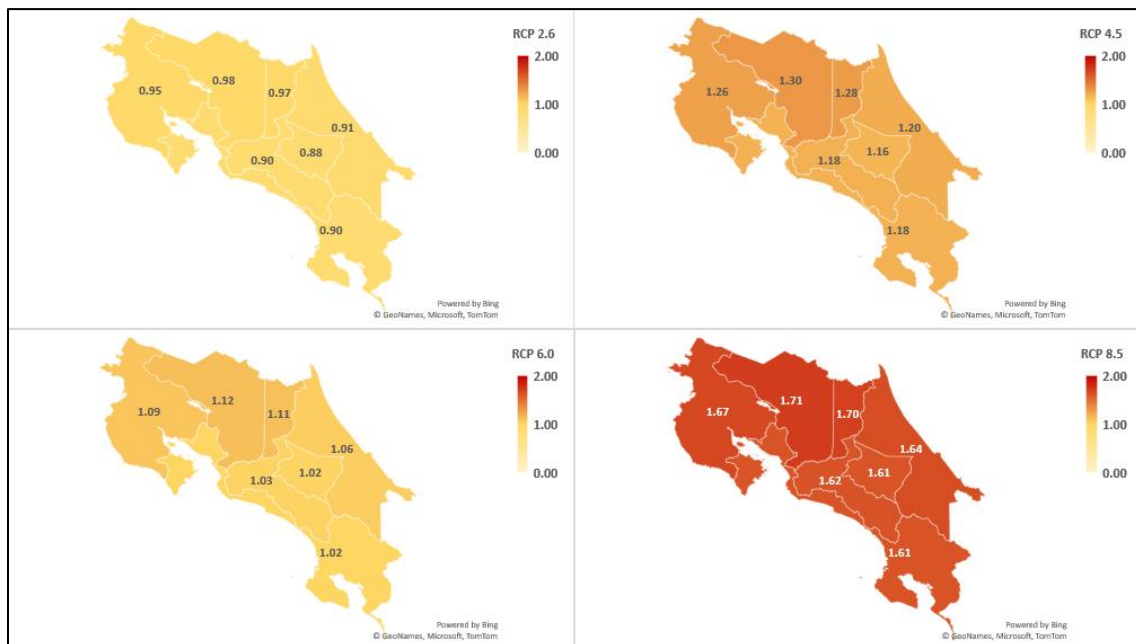


**Figura 15.** Incremento y/o disminución de Precipitaciones (mm) para Costa Rica a mediano plazo (2040 – 2059) según escenarios de cambio climático.

De acuerdo con las Figuras 14 y 15, se puede observar que no hay una tendencia clara del comportamiento de las lluvias en todo el territorio costarricense, ya que algunas provincias en las que en el corto plazo presentan déficit (tonalidades rojas en las figuras) en las precipitaciones anuales, en el mediano plazo tienen abundancia (tonalidades azules en las figuras). Los mayores déficits de precipitaciones se presentan en la proyección RCP 2.6 para el mediano plazo.



**Figura 16.** Incremento de Temperatura °C para Costa Rica a corto plazo (2020 – 2039) según escenarios de cambio climático.



**Figura 17.** Incremento de Temperatura °C para Costa Rica a mediano plazo (2040 – 2059) según escenarios de cambio climático.

De acuerdo con las Figuras 16 y 17, las provincias más afectadas por el incremento de temperatura serían Alajuela, Heredia y Guanacaste, mientras que la provincia de Cartago sería la provincia con menor incremento de temperatura. Los mayores incrementos de temperatura se presentan en la proyección RCP 8.5 para el mediano plazo.

#### 5.4. Simulación y Calibración de la CRT con HydroBID

Las simulaciones con HydroBID para la CRT se fueron realizando con las estaciones pluviométricas de control disponibles, estación Coyolar, estación Guardia y estación Rancho Rey. Los periodos de tiempo analizados varían para cada una de las estaciones, ya que se trata de contar con la mayor cantidad de datos completos y con ello, disminuir los errores externos que pueda tener el modelo ante la falta de datos. Para la estación Coyolar se utilizó el periodo comprendido entre el 01/ene/2000 al 31/dic/2009, para la estación Guardia se utilizó la serie de tiempo comprendida entre el 01/ene/2000 al 30/jun/2010, y para la estación Rancho Rey el periodo de tiempo entre 01/ene/2000 al 22/ago/2011. A continuación, se detallarán los principales resultados obtenidos de cada una de las estaciones.

##### ➤ Estación de control Coyolar

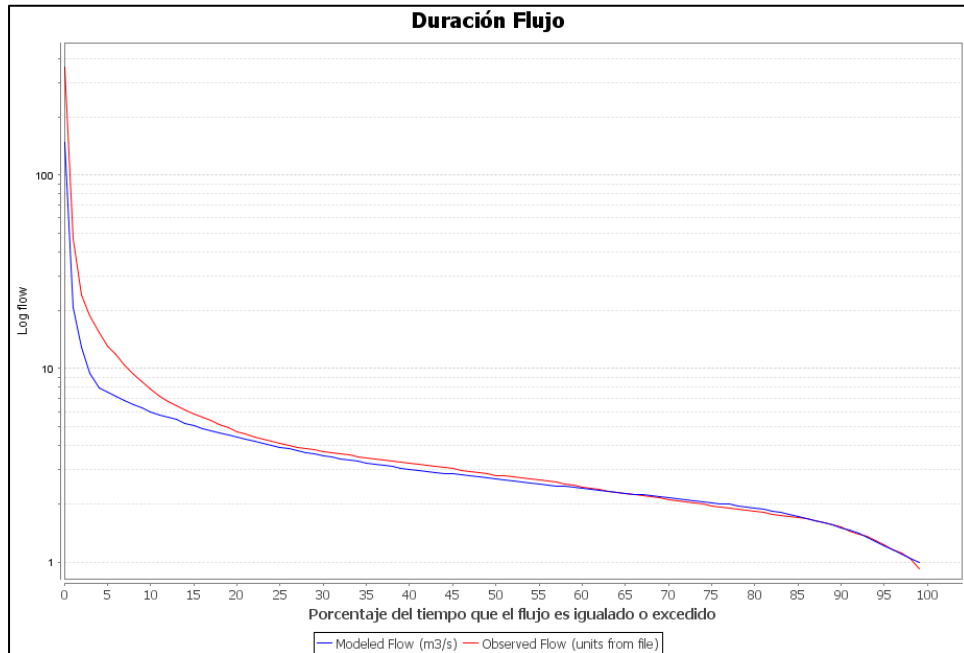
Luego de realizar el proceso iterativo con los valores de calibración, se obtuvo el mejor resultado de similitud entre los caudales observados (Valores de la estación de control) y los caudales simulados (Resultados HydroBID). La Tabla 14 muestra los principales valores de calibración utilizados para la estación de control Coyolar:

**Tabla 14.** Valores de calibración para la simulación en la estación de control Coyolar - HydroBID

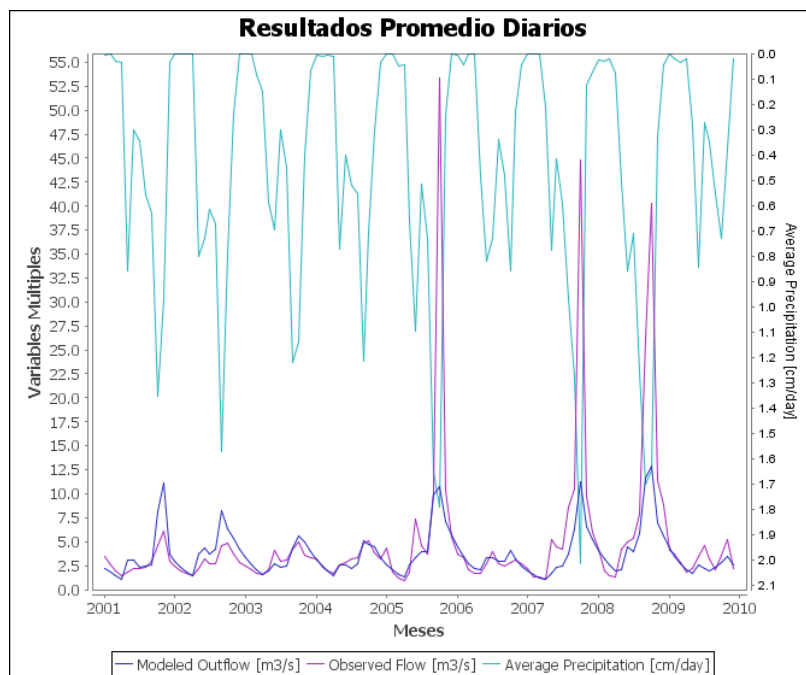
Variable	Valor Obtenido	Rango recomendado
Número de Curva (CN)	0.9	0.8 – 1.2
Contenido Disponible de Agua (AWC)	0.1	0.2 – 1.2
Coefficiente de Recesión (RC)	0.008	0.001 – 0.75 / día
Coefficiente de percolación (Seepage)	0.00001	0.005 – 0.1 / día
Factor ET durante crecimiento de cultivo	1	0.5 – 1.5
Factor ET durante estación latente de cultivo	1	0.5 – 1.5
Porcentaje Porción impermeable de la cuenca	1%	1%

De acuerdo con los valores obtenidos de calibración en la Tabla 14, se puede observar que el multiplicador utilizado en las variables de Contenido Disponible de Agua y Seepage son menores al rango recomendado y con los valores utilizados estamos representando que la subcuenca tendría unas condiciones donde el suelo es incapaz de retener agua y donde hay poca influencia del agua subterránea, situación que no ejemplificaría la realidad de los suelos principalmente de uso agropecuario presentes en la zona de estudio.

Las Figuras 18 y 19 muestran unos de los resultados visuales que genera el modelo de simulación HydroBID, siendo ambas un método visual de aproximación para la calibración del modelo.



**Figura 18.** Curva duración flujo para la estación control Coyolar – simulación HydroBID.



**Figura 19.** Hidrograma de salida para la estación de control Coyolar – simulación HydroBID.

Las Figura 18 y 19 muestran una buena correlación para los flujo observados y simulados, en para los valores mínimos y medios, sin embargo, cuando se presentan eventos extremos de precipitación, el modelo no genera un buen ajuste. Las Tabla 15 y 16 nos ayuda a comprender mejor los resultados con las variables estadísticas para la estación de control Coyolar.

**Tabla 15.** Resultados de error de volumen mensual para estación de control Coyolar

Mes	Flujo Observado Promedio (m <sup>3</sup> /s)	Flujo Simulado Promedio (m <sup>3</sup> /s)	mve (%)
Enero	3.32	3.34	0.58
Febrero	2.31	2.63	13.75
Marzo	1.77	2.07	17.01
Abril	1.46	1.64	12.32
Mayo	2.74	2.29	-16.32
Junio	4.15	3.2	-22.94
Julio	3.94	3.04	-22.81
Agosto	4.39	3.45	-21.48
Septiembre	8.12	6.35	-21.84
Octubre	19.98	7.31	-63.43
Noviembre	6.39	5.27	-17.52
Diciembre	4.32	4.14	-4.34

**Tabla 16.** Resultados generales de las variables estadísticas HydroBID estación de control Coyolar

Variable	Valor Obtenido	Valor Recomendado
Error de Volumen general (Ove)	-29.14%	Cercano a 0%
Correlación (r)	0.8	Cercano a 1
Coefficiente modificado de correlación (r <sub>mod</sub> )	0.23	Cercano a 1
Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (R <sup>2</sup> ):	0.34	Cercano a 1

Como se observa en la Tabla 15, existe una muy buena correlación entre los caudales simulados y observados en los meses de diciembre a abril (Época Seca) con diferencias menores al 20% entre ambos caudales, sin embargo, esta situación cambia para los meses más lluviosos, en especial octubre que presenta unas diferencias del 63.43%.

La Tabla 16 muestra los valores generales de las variables estadísticas, donde se obtiene una correlación de la simulación aceptable, con un 80%, sin embargo estas diferencias con los caudales altos en el modelo, hace que los demás coeficientes y el porcentaje de error, se encuentren por debajo de los valores recomendados.

### ➤ Estación de control Guardia

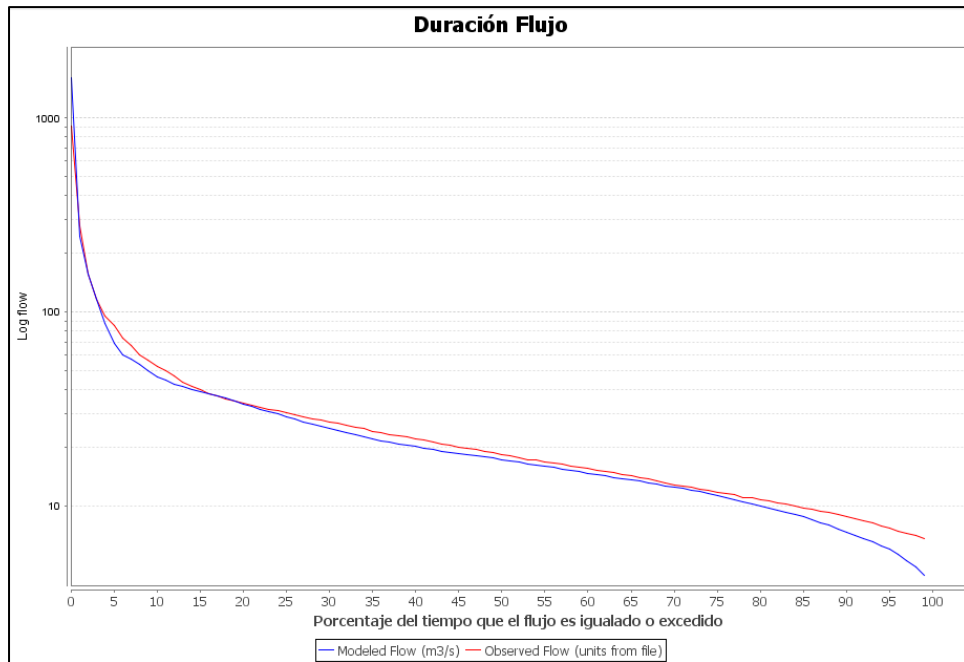
Para el caso de la estación de control Guardia, la calibración mejora considerablemente, cabe destacar que la simulación de la estación de control Guardia, toma como referencia la calibración obtenida de la estación de control Coyolar, ya que se encuentra aguas arriba, lo que facilita la corrida del modelo al ya contar con esta subcuenca calibrada. La Tabla 17 muestra los principales valores de calibración utilizados para la estación de control Guardia:

**Tabla 17.** Valores de calibración para la simulación en la estación de control Coyolar - HydroBID

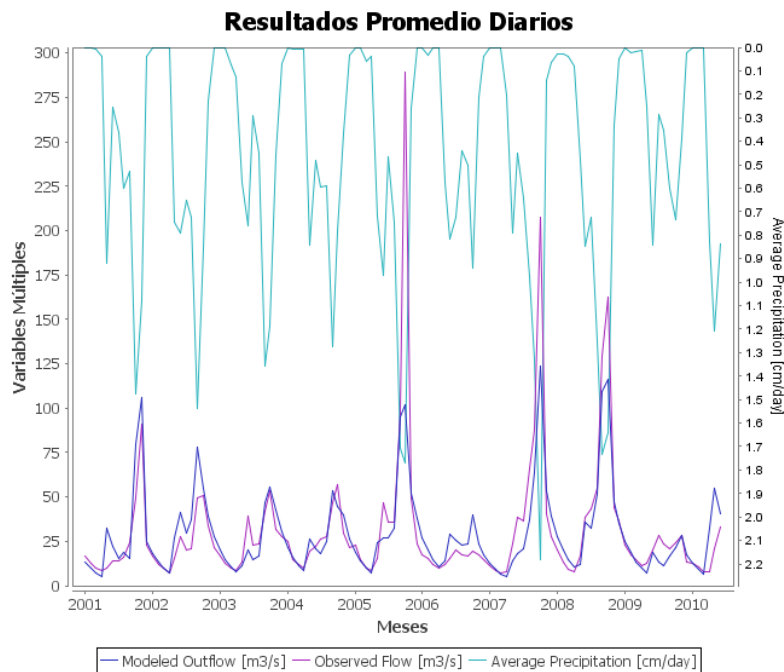
Variable	Valor Obtenido	Rango recomendado
<b>CN</b>	1	0.8 – 1.2
<b>AWC</b>	0.24	0.2 – 1.2
<b>RC</b>	0.011	0.001 – 0.75 / día
<b>Seepage</b>	0.00001	0.005 – 0.1 / día

De acuerdo con los valores obtenidos de calibración en la Tabla 17, se puede observar que el multiplicador utilizado en la variable de Contenido Disponible de Agua sigue siendo bajo, en comparación con la estación de control Coyolar, sin embargo, se encuentra dentro de los rangos recomendados. También, al igual que la estación de control Coyolar, se siguen presentando parámetros de calibración que favorecen la escorrentía, y lograr esa similitud entre los caudales observados y simulados.

Las Figuras 20 y 21 muestran unos de los resultados visuales que genera el modelo de simulación HydroBID, siendo ambas un método visual de aproximación para la calibración del modelo.



**Figura 20.** Curva duración flujo para la estación control Guardia – simulación HydroBID.



**Figura 21.** Hidrograma de salida para la estación de control Guardia – simulación HydroBID.

Las Figura 20 y 21 muestran una tendencia similar a la estación de control Coyolar, en donde hay una buena concordancia entre los flujo observados y simulados, en para los valores mínimos y medios, y no así para los caudales altos. Las Tabla 18 y 19 nos ayuda a comprender mejor los resultados con las variables estadísticas para la estación de control Guardia.

**Tabla 18.** Resultados de error de volumen mensual para estación de control Guardia.

Mes	Flujo Observado Promedio (m <sup>3</sup> /s)	Flujo Simulado Promedio (m <sup>3</sup> /s)	mve (%)
Enero	18.4	20.39	10.79
Febrero	13.26	14.92	12.45
Marzo	10.36	10.9	5.3
Abril	8.81	10.98	24.62
Mayo	16.72	21.23	27
Junio	31.25	27.98	-10.46
Julio	29.19	22.66	-22.36
Agosto	33.69	29.17	-13.42
Septiembre	60.97	60.85	-0.21
Octubre	107.94	69.74	-35.39
Noviembre	34.32	40.88	-19.14
Diciembre	23.35	28.79	-23.3

**Tabla 19.** Resultados generales de las variables estadísticas HydroBID estación de control Guardia.

Variable	Valor Obtenido	Valor Recomendado
Error de Volumen general (Ove)	-7.27%	Cercano a 0%
Correlación (r)	0.84	Cercano a 1
Coefficiente modificado de correlación (r <sub>mod</sub> )	0.51	Cercano a 1
Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (R <sup>2</sup> ):	0.65	Cercano a 1

Como se observa en la Tabla 18, se mejoró la similitud entre los caudales simulados y observados, disminuyendo a una diferencia del 35.39% para el mes más crítico (octubre).

Esta similitud también se ve reflejada en la Tabla 19, donde se obtiene una correlación de la simulación aceptable, con un 84%, y los demás coeficientes y el porcentaje de error, más cercanos a los valores recomendados.



### ➤ Estación de control Rancho Rey

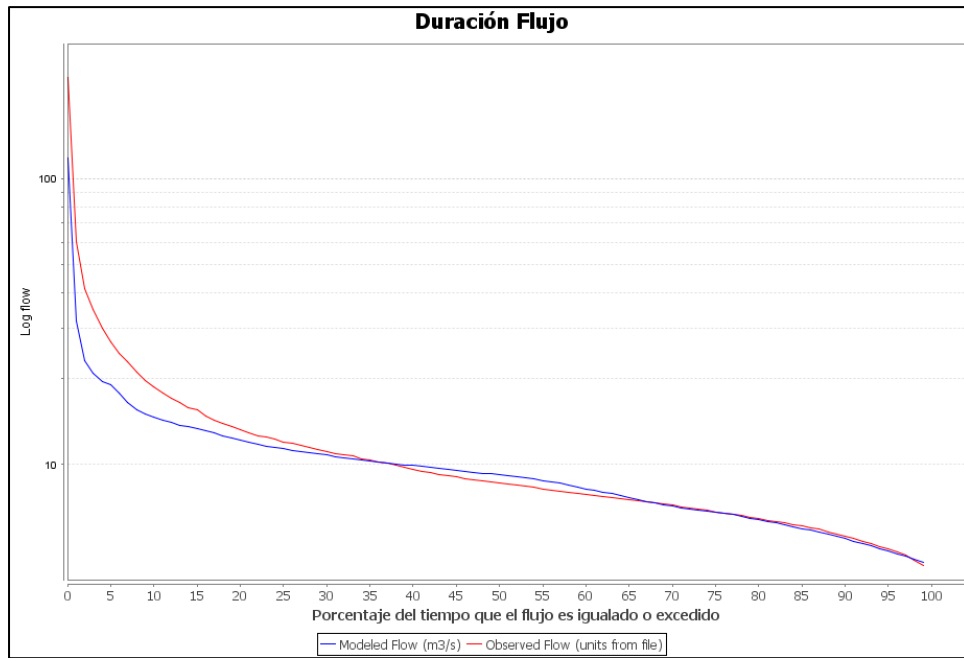
Para el caso de la estación de control Rancho Rey, se encuentra dentro de la subcuenca del Río Bebedero, por lo que su calibración es independiente a las estaciones de control Coyolar y Guardia. La Tabla 20 muestra los principales valores de calibración utilizados para la estación de control Rancho Rey:

**Tabla 20.** Valores de calibración para la simulación en la estación de control Rancho Rey - HydroBID

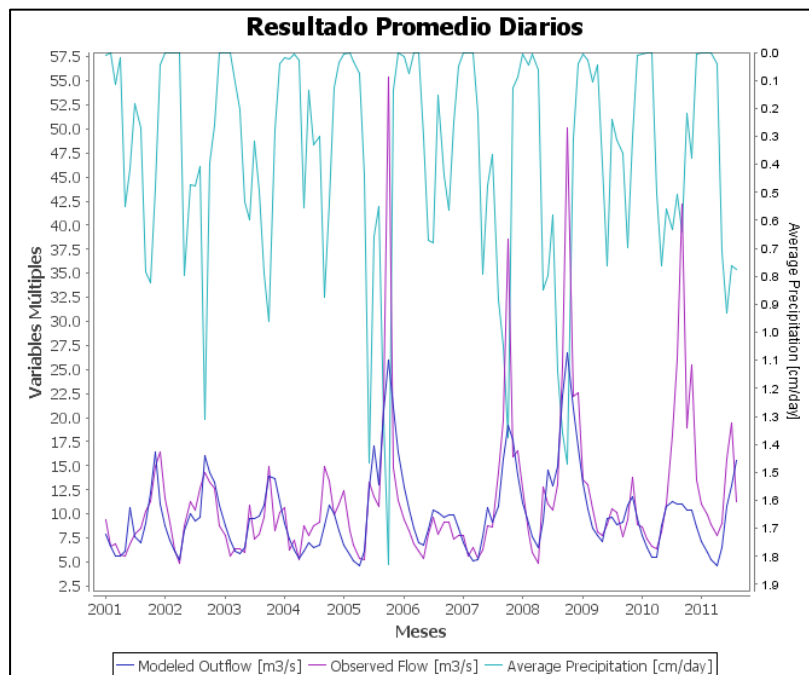
Variable	Valor Obtenido	Rango recomendado
Número de Curva (CN)	0.8	0.8 – 1.2
Contenido Disponible de Agua (AWC)	-0.007	0.2 – 1.2
Coefficiente de Recesión (RC)	0.01	0.001 – 0.75 / día
Coefficiente de percolación (Seepage)	0.0001	0.005 – 0.1 / día
Factor ET durante crecimiento de cultivo	1	0.5 – 1.5
Factor ET durante estación latente de cultivo	1	0.5 – 1.5
Porcentaje Porción impermeable de la cuenca	1%	1%

De acuerdo con los valores obtenidos de calibración en la Tabla 20, se puede observar que el multiplicador utilizado en las variables de Contenido Disponible de Agua tiene valores negativos, esto puede deberse a que esta cuenca tiene la influencia directa del DRAT, lo que representa un aporte externo de caudal a la cuenca, utilizado principalmente para el riego de cultivos agrícolas.

Las Figuras 22 y 23 muestran unos de los resultados visuales que genera el modelo de simulación HydroBID, siendo ambas un método visual de aproximación para la calibración del modelo.



**Figura 22.** Curva duración flujo para la estación control Rancho Rey – simulación HydroBID.



**Figura 23.** Hidrograma de salida para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID.

Las Figura 20 y 21 muestran una tendencia un poco diferente a las estaciones de control Coyolar y Rancho Rey, ya que las curva y el hidrograma no presentan buena similitud entre los flujo observados y simulados, tanto para los valores mínimos y altos. Las Tabla 18 y 19 nos ayuda a comprender mejor los resultados con las variables estadísticas para la estación de control Guardia.

**Tabla 21.** Resultados de error de volumen mensual para estación de control Rancho Rey.

Mes	Flujo Observado Promedio (m <sup>3</sup> /s)	Flujo Simulado Promedio (m <sup>3</sup> /s)	mve (%)
Enero	10.56	9.22	-12.68
Febrero	8.13	7.62	-6.3
Marzo	7.21	6.43	-10.79
Abril	6.05	5.77	-4.6
Mayo	7.84	7.34	-6.42
Junio	10.65	10.4	-2.31
Julio	11.53	10.87	-5.73
Agosto	12.36	10.92	-11.59
Septiembre	18.22	13.8	-24.26
Octubre	24.82	15.79	-36.4
Noviembre	14.5	14.32	-1.22
Diciembre	12.3	11.59	-5.8

**Tabla 22.** Resultados generales de las variables estadísticas HydroBID estación de control Rancho Rey.

Variable	Valor Obtenido	Valor Recomendado
Error de Volumen general (Ove)	-13.4%	Cercano a 0%
Correlación (r)	0.74	Cercano a 1
Coefficiente modificado de correlación (r <sub>mod</sub> )	0.4	Cercano a 1
Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (R <sup>2</sup> ):	0.47	Cercano a 1

Como se observa en la Tabla 21, la tendencia se mantiene con las estaciones de control anteriores, donde octubre continúa siendo el mes con las mayores diferencias entre los caudales simulados y observados, con una diferencia del 36.4%.

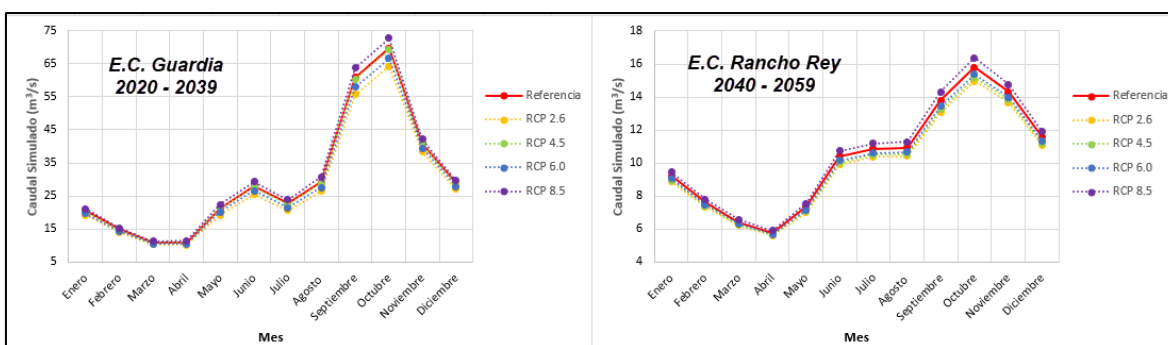
La Tabla 22, muestra que, en términos generales, el porcentaje de error de volumen se puede considerar aceptable, al ser únicamente el 13.4%, sin embargo, la correlación de los datos y los coeficientes de calibración se encuentran distantes a los valores recomendados.

## 5.5. Simulación de la CRT ante proyecciones climáticas con HydroBID

Una vez realizada la calibración de las estaciones de control, se incorporaron los valores de los multiplicadores de precipitación e incrementos de temperatura para las diferentes proyecciones de cambio climático a corto y mediano plazo, a continuación, se presentan las gráficas para las variaciones más críticas a modo de resumen, los resultados completos se detallan en el Anexo 8.4.

### ➤ Simulación Variación en la precipitación

La Figura 24, muestra las diferencias entre el caudal de referencia (obtenido de la calibración de las estaciones de control) y el caudal proyectado ante cambios en las precipitaciones según las proyecciones climáticas.

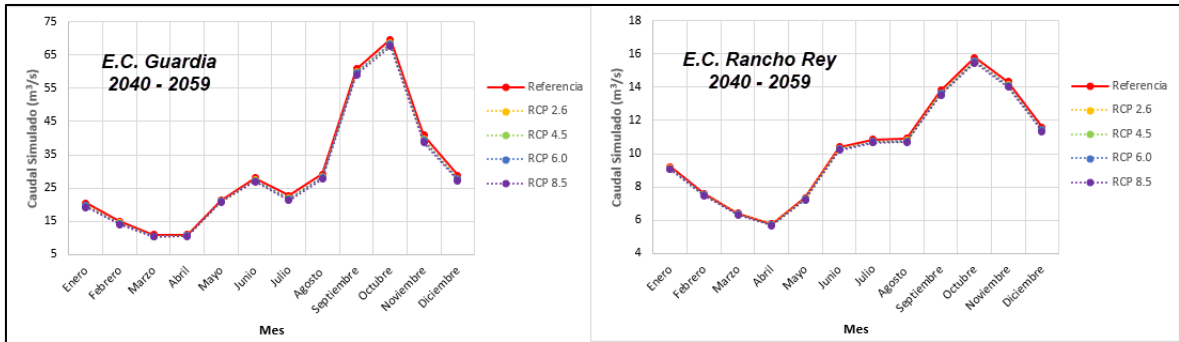


**Figura 24.** Proyección crítica de variación en precipitación para las estaciones de control Guardia y Rancho Rey – simulación HydroBID.

La Figura 24 nos muestra que las diferencias proyecciones climáticas tendrán resultados diferentes sobre la cuenca, ya que, en algunos casos, se podrán obtener valores de precipitación mayores o menores de la curva de referencia. Para el caso de la estación de control Guardia, el mayor déficit se presenta en la proyección RCP 2.6 en el mediano plazo (2040-2059), con un caudal 9.7% menor al caudal de referencia, mientras que para la estación de control Rancho Rey, el mayor déficit se presenta en la proyección RCP 2.6 en el corto plazo (2020 – 2039), con un caudal 5.4% menor al caudal de referencia.

### ➤ Simulación incremento en la temperatura media

La Figura 25, muestra las diferencias entre el caudal de referencia (obtenido de la calibración de las estaciones de control) y el caudal proyectado ante incrementos de temperatura según las proyecciones climáticas.

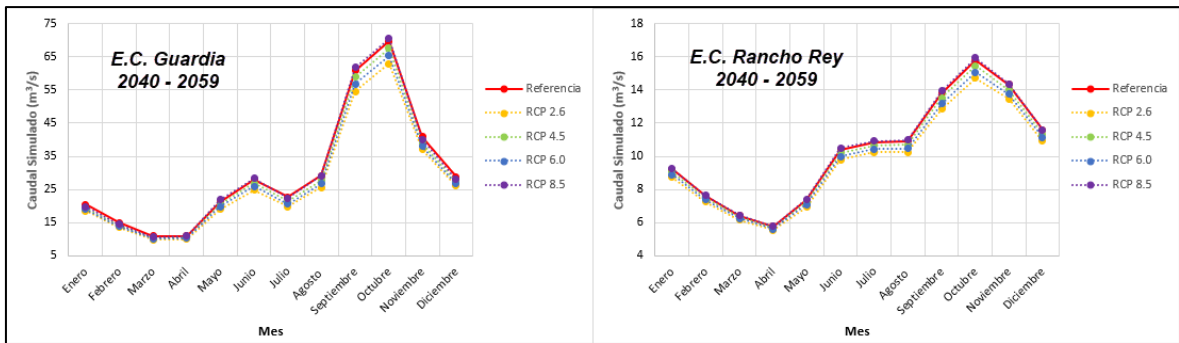


**Figura 25.** Proyección crítica de incremento de temperatura para las estaciones de control Guardia y Rancho Rey – simulación HydroBID.

La Figura 25 nos muestra que las diferencias proyecciones climáticas de incremento de temperatura si tienen una tendencia clara en la disminución de los caudales de la cuenca, respecto a su curva de referencia. Para el caso de la estación de control Guardia, el mayor déficit se presenta en la proyección RCP 8.5 en el mediano plazo (2040-2059), con un caudal 6.1% menor al caudal de referencia, durante el mes de julio principalmente, mientras que para la estación de control Rancho Rey, el mayor déficit se presenta en la proyección RCP 8.5 en el mediano plazo (2040 – 2059), con un caudal 2.2% menor al caudal de referencia, durante los meses de noviembre y diciembre.

### ➤ Simulación Variación en la precipitación e incremento de temperatura

Anteriormente se analizaron las variables por separado para conocer el impacto que tendrían sobre la cuenca cada una de ellas, sin embargo, la variación en la precipitación y el incremento de temperatura pueden ocurrir de manera simultáneamente, la Figura 26 muestra las diferencias entre el caudal de referencia (obtenido de la calibración de las estaciones de control) y el caudal proyectado ante variaciones en las precipitaciones e incrementos de temperatura según las proyecciones climáticas.



**Figura 26.** Proyección crítica de variación en precipitación e incremento de temperatura para las estaciones de control Guardia y Rancho Rey – simulación HydroBID.

La Figura 26 nos muestra el escenario crítico ante la combinación de variación en precipitación e incremento de temperatura, en la disminución de los caudales de la cuenca, respecto a su curva de referencia. Para ambas estaciones de control, el mayor déficit se presenta en la proyección RCP 2.6 en el mediano plazo (2040-2059), para la estación de control Guardia, esta disminución crítica sería de un caudal 13.9% menor al caudal de referencia, durante el mes de junio, mientras que para la estación de control Rancho Rey, el mayor déficit es de 6.9% menor del caudal de referencia, durante el mes de octubre.

Caso contrario, la proyección climática RCP 8.5, traería consecuencias de un incremento de los caudales de los ríos en ambas estaciones de control en un máximo de 4.6% respecto al caudal de referencia.

## 6. CONCLUSIONES

Es necesario contar con un mayor número de estaciones de control o pluviométricas, en las zonas medias y bajas de la Cuenca, ya que, ante la falta de puntos de control, únicamente se pudo modelar un 23.6% del área de la cuenca, por lo que los resultados obtenidos no se pueden utilizar en un buen manejo integrado de los recursos hídricos de la cuenca, ni contar con el sustento suficiente para la toma de decisiones.

Para poder realizar estudios de modelación hidrográfica de las cuencas, se requiere contar con una mayor densidad de estaciones, y que, a su vez, puedan contar con información más completa, es decir, mantenerse a la vanguardia con equipos confiables, calibrados y con la menor cantidad de datos faltantes posibles. Esto disminuye el error humano durante los procesos de análisis y relleno de la información meteorológica.

Una vez realizados los insumos con los que trabaja el sistema de simulación HydroBID, se vuelve una herramienta muy rápida y sencilla para la modelación de las cuencas hidrográficas ante diferentes situaciones.

Pese a tener buenas aproximaciones en los caudales medios y bajos en el sistema de simulación HydroBID, la modelación no logró ajustarse para eventos extremos de altas precipitaciones, generando diferencias elevadas en los meses de la época lluviosa (Mayo – Noviembre) de hasta un 67% entre los caudales observados y simulados.

El modelo de simulación HydroBID nos permite simular un caudal medio de las subcuencas analizadas y el comportamiento de dicho caudal ante escenarios de cambio climático. Este caudal puede ser utilizado como referencia para los encargados de la toma de decisiones y analizar su comportamiento durante los diferentes meses del año, las medidas o precauciones bajo condiciones de sequía, o bien, su manejo durante las condiciones de abundancia.

En las proyecciones climáticas, la variable que más peso tiene en las proyecciones es la precipitación, generando disminuciones de más de un 9.9% en periodos de sequía, y sumado al incremento de temperatura, podemos obtener reducciones en el caudal de más de 13.9%.

En el presente estudio se realizaron los análisis de proyecciones climáticas con las anomalías promedio anuales, sin embargo, estas disminuciones en los caudales de las subcuencas pudieran ser mayores, si se consideraran las anomalías promedio mensuales, permitiendo analizar las épocas secas y lluviosas en cada una de las subcuencas.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, R., & Pacheco, R. (2000). Aplicación de algunos métodos de relleno a series anuales de lluvia de diferentes regiones de Costa Rica. En *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* (Vol. 7, págs. 41 - 51). San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional. Obtenido de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/revista/topicosmet20001/html5/index.html?page=1&noflash>
- Arias, O. (2001). Estudio Hidrometeorológico de la Cuenca del Río Tempisque, Guanacaste. (*Informe de Práctica de Especialidad*). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Asamblea Legislativa Costa Rica. (2022). Contrato de préstamo N° 2220 que financiará el "Proyecto de abastecimiento de agua para cuenca media del Río Tempisque y comunidades costeras (PAACUME) suscrito con el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE). La Gaceta N° 86 Alcance 93. Obtenido de [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=96889&nValor3=130352&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=96889&nValor3=130352&strTipM=TC)
- BID. (2022). *Sobre Hydro-BID*. Obtenido de Banco Interamericano de Desarrollo: <https://www.iadb.org/es/agua-y-saneamiento/about-hydro-bid>
- Campos-Gaytán, J. R., Herrera-Oliva, C. S., & Carrillo-González, F. M. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México. *Investigación y Ciencia, Universidad Autónoma de Aguascalientes, vol. 25*(núm.71), pp. 34-44. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/674/67452917005/html/>
- Carrera-Villacrés, D., Casa, C., Escalante, D., González, A., Jaque, P., Morales, D., & Sánchez, M. (2022). *Manual básico de R studio aplicado a información levantada en estaciones meteorológicas*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/360944751\\_MANUAL\\_BASICO\\_DE\\_R\\_STUDIO\\_APLICADO\\_A\\_INFORMACION\\_LEVANTADA\\_EN\\_ESTACIONES\\_METEOROLOGICAS](https://www.researchgate.net/publication/360944751_MANUAL_BASICO_DE_R_STUDIO_APLICADO_A_INFORMACION_LEVANTADA_EN_ESTACIONES_METEOROLOGICAS)
- Castillo, S. (2019). *Caracterización de la cuenca 128 del río La Villa en la República de Panamá mediante Hydrobid*. Universidad de Alcalá. Obtenido de [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/41740/TFM\\_Castillo\\_Dominguez\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/41740/TFM_Castillo_Dominguez_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- CATIE. (2014). *Evaluación de Impacto del Distrito de Riego Arenal - Tempisque, Región Chorotega, Costa Rica, 1981 - 2011*. Obtenido de [https://repositorio-snp.mideplan.go.cr/bitstream/handle/123456789/289/EE-50-DRAT\\_INF.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio-snp.mideplan.go.cr/bitstream/handle/123456789/289/EE-50-DRAT_INF.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- DCC. (2020). *Contribución Nacionalmente Determinada 2020*. DCC. Obtenido de <http://www.sinamecc.go.cr/recursos/docs/Contribuci%C3%B3n%20Nacionalmente%20Determinada%20de%20Costa%20Rica%202020%20-%20Versi%C3%B3n%20Completa.pdf>
- Díaz, R. (21 de Abril de 2016). *Sequía y abusos asfixian el Tempisque*. Obtenido de Primera Plana: [https://www.primeraplana.or.cr/es/El\\_Pais/Sequia\\_y\\_agricultura\\_asfixian\\_el\\_Tempisque/](https://www.primeraplana.or.cr/es/El_Pais/Sequia_y_agricultura_asfixian_el_Tempisque/)

- García, E., & Replogle, J. (2 de Agosto de 2016). *Río Tempisque, medio siglo de concesiones (casi) a ciegas*. Obtenido de La Voz de Guanacaste: <https://vozdeguanacaste.com/rio-tempisque-medio-siglo-de-concesiones-casi-a-ciegas/>
- Gutiérrez, T. (2022). *Caracterización hidrológica y evaluación de escenarios de cambio climático en la cuenca Chira (Piura - Perú) con el modelo HydroBID*. Universidad de Alcalá. Obtenido de [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/52720/TFM\\_Gutierrez\\_Laban\\_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/52720/TFM_Gutierrez_Laban_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- IMN. (2008). *Boletimn Meteorológico*. (M. Sánchez, Ed.) IMN. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14627/OCTUBRE>
- IMN. (2022). *ENOS*. Obtenido de IMN: [https://www.imn.ac.cr/enos#:~:text=El%20fen%C3%B3meno%20%22El%20Ni%C3%B1o%22%20se,el%20Pac%C3%ADfico%20este%20%2Dcentral%20\(aproximadamente](https://www.imn.ac.cr/enos#:~:text=El%20fen%C3%B3meno%20%22El%20Ni%C3%B1o%22%20se,el%20Pac%C3%ADfico%20este%20%2Dcentral%20(aproximadamente)
- IMN. (s.f.). *El Clima y las regiones climáticas de Costa Rica*. IMN. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/cb3b55c3-f358-495a-b66c-90e677e35f57>
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge: Prensa de la Universidad de Cambridge. Obtenido de [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15\\_Full\\_Report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_LR.pdf)
- Mena, M. (2019). Evaluación de la sustentabilidad hídrica de las cuencas Tempisque y Bebedero mediante el modelo Water Evaluation and Planning System (WEAP) en Guanacaste, Costa Rica. *(Tesis para optar por el grado de licenciatura en Geografía)*. Universidad de Costa Rica.
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz, R. (2014). Hydro-BID: un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Moreda, F., Serago, J., Ecurra, J., Brantly, E., & Valdes, P. C. (2017). *Hydro-BID case study N°5: Impact of climate change on proposed water investments in Chalpi Basin, Ecuador*. (M. Nalesso, Ed.) BID.
- OMM. (1966). *Some Methods of Climatological Analysis*. OMM. Obtenido de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=1961](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=1961)
- OMM. (2018). *Guía de prácticas climatológicas* (Edición de 2018 ed.). Ginebra, Suiza: OMM. Obtenido de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10027](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027)
- Poder Ejecutivo Costa Rica. (2015). Declara de interés público el Programa Integral para el Abastecimiento de Agua para Guanacaste (Pacífico Norte) conocido como PIAAG. Costa Rica: La Gaceta N° 184. Obtenido de [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80176&nValor3=101637&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80176&nValor3=101637&strTipM=TC)
- Rinner, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz, R. (2014). Base de Datos de Hidrología Analítica. Parte 1. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Rojas, N. (2011a). *Atlas de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica*. Costa Rica: PNUD. Obtenido de <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/3508/>
- Rojas, N. (2011b). *Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica*. Costa Rica: PNUD. Obtenido de <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/estudio-de-las-cuencas-hidrograficas-de-costa-rica/>

- Roldán, G. (2021). *Uso del modelo Hydro-BID para la caracterización hidrológica y evaluación del cambio climático de la cuenca del río Porce (Colombia)*. Universidad de Alcalá. Obtenido de [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/48574/TFM\\_ROLDAN\\_BED\\_OYA\\_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/48574/TFM_ROLDAN_BED_OYA_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- UNFCCC. (2022). *Cinco conclusiones clave de la COP 27*. Obtenido de United Nations Climate Change: <https://unfccc.int/es/proceso-y-reuniones/conferencias/sharm-el-sheikh-climate-change-conference-november-2022/cinco-conclusiones-clave-de-la-cop27>
- WBG. (2021a). *Climate Risk Profile: Costa Rica*. World Bank Group. Obtenido de [https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/15989-WB\\_Costa%20Rica%20Country%20Profile-WEB.pdf](https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/country-profiles/15989-WB_Costa%20Rica%20Country%20Profile-WEB.pdf)
- WBG. (2021b). *User Manual / Climate Change Knowledge Portal (CCKP)*. World Bank Group. Obtenido de <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>
- Yáñez, E. (2022). *Modelación de la respuesta hidrológica de cuencas de los Andes semiáridos de Chile (30°S) a escenarios de cambio climático*. Universidad de Alcalá. Obtenido de [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/52721/TFM\\_Yanez\\_SanFrancisco\\_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/52721/TFM_Yanez_SanFrancisco_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## 8. ANEXOS

### 8.1. Series de datos climáticos

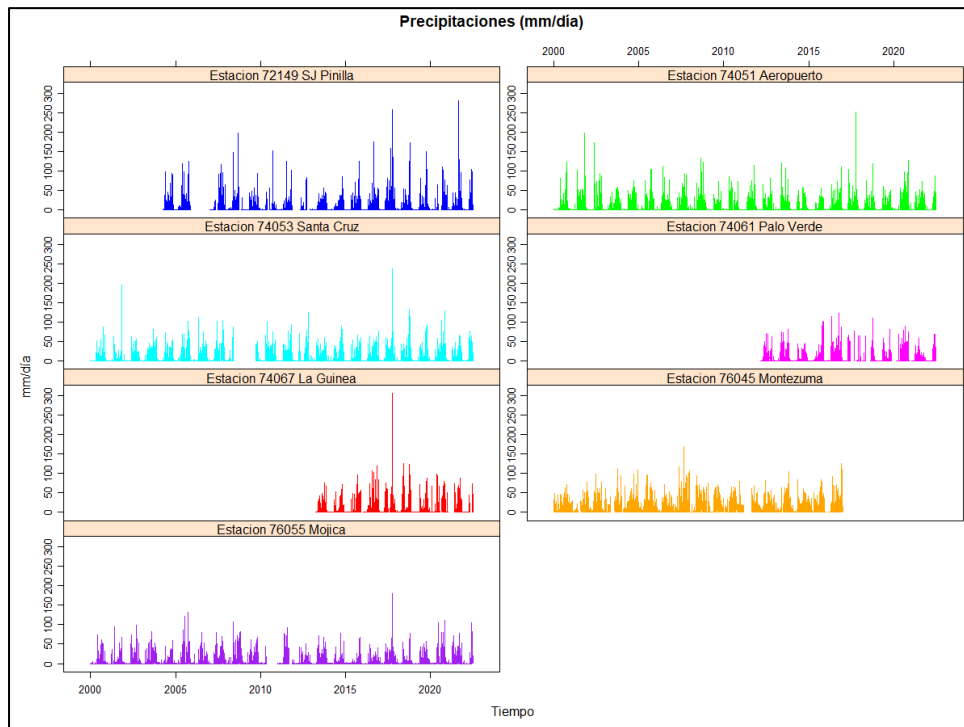


Figura 27. Datos de precipitación diaria original para la CRT.

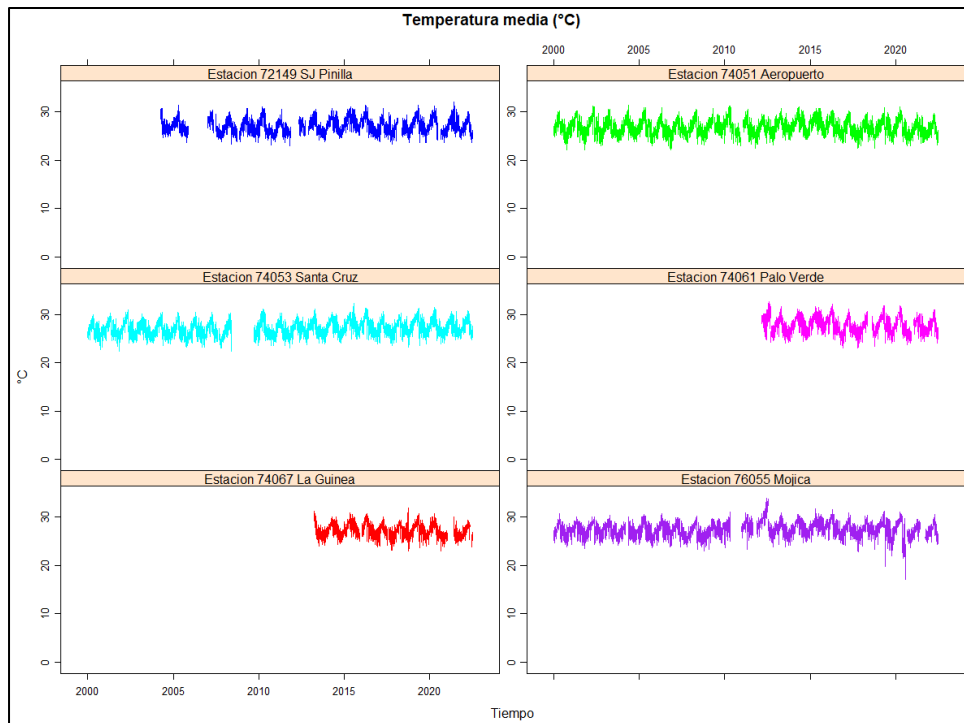


Figura 28. Datos de temperatura media original para la CRT.

## 8.2. Interpolación de Datos Climáticos HydroBID

Climate Data Interpolating Tool

Start Date (dd/mm/yyyy): 01/01/2000 End Date (dd/mm/yyyy): 30/06/2022

Navigated COMID:   Use Navigated COMID

Centroids Coord. File:

Stations Coord. File:

Folder with Precip. Files:

Folder with Temp. Files:

Precipitation Units: ...

SQLite database path:

New database table name:  met\_CRT

Number of stations to use for averaging:  2

**Figura 29.** Interpolador de Datos Climáticos HydroBID

Para la utilización del simulador HydroBID es necesario hacer una interpolación entre la información meteorológica de las estaciones y las cuencas que tenemos disponibles. De manera que se requiere completar la información con los formatos que utiliza HydroBID con estos simples pasos:

- 1) Fecha de inicio y final de nuestra serie de datos meteorológica.
- 2) Seleccionar los archivos donde se encuentra la ubicación de los centroides de las cuencas y la ubicación de las estaciones meteorológicas.
- 3) Seleccionar las carpetas donde se encuentran los archivos de precipitación y temperatura.
- 4) Seleccionar las unidades con las que estamos trabajando precipitación, en nuestro caso mm.
- 5) Selección de la base de datos HydroBID con la que estamos trabajando
- 6) Asignar un nombre a nuestra interpolación de datos climáticos y el número de estaciones con las que se requiere interpolar, en nuestro caso 2 estaciones.

### 8.3. Modelización Hidrográfica HydroBID

The screenshot displays the HydroBID software interface with the following sections and fields:

- Setup Options:**
  - Project name: Cuenca\_Rio\_Tempisque
  - Run Name: RT\_Coyolar
  - Catchment COMID: 212504800
  - Start Date (dd/mm/yyyy): 01/01/2000
  - End date (dd/mm/yyyy): 31/12/2009
  - Warm up Years: 1
- Database Options:**
  - SQLite Location: DataBase/CentralAmerica\_hi\_res\_no\_met\_obs.sqlite (with Browse button)
  - Met Data Table: met\_CRT (with Refresh Database Connection button)
  - CN Table: catchment\_nlcd\_soils
  - AWC Table: catchments
- Flow Options:**
  - Observed Flows: Flow/coyolar-flow.csv (with Browse button)
  - Point Source Flows Folder: (with Browse button)
  - Local Flow Points: (with Browse button)
- Output Options:**
  - Reservoir Folder: (with Browse button)
  - Output Folder: Out (with Browse button)
  - Output:  Outlet catchment,  All catchments,  History

The HydroBID logo is visible in the top right corner of the interface.

Figura 30. Ejemplo del modelo HydroBID para la estación de control Coyolar.

## 8.4. Proyecciones climáticas en modelización HydroBID

The screenshot shows the 'Climate Scenario' configuration window in HydroBID. It includes tabs for 'Setup', 'Climate Scenario', 'Model Parameters', 'Reservoirs', 'Sediment Parameters', 'Groundwater', 'Run Model', 'Output', and 'Hydropower'. Under 'Climate Scenario', there are three input fields: 'Temperature Adjustment (+/-)' with a value of 1.67, 'Precipitation Multiplier' with a value of 1.027, and 'Precipitation Adjustment (+/-)' with a value of 0. Each field has a 'Monthly Values' button. Additionally, there are two radio buttons: 'Use Precipitation Multiplier(s)' (checked) and 'Use Precipitation Adjustment(s)' (unchecked).

Figura 31. Ejemplo de inserción parámetros de proyecciones climáticas modelo HydroBID.

Tabla 23. Respuesta de los caudales de salida ante variaciones en precipitación para la estación de control Guardia – simulación HydroBID.

Mes	Referencia	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
		C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P
Enero	20.39	19.23	19.16	19.55	20.27	19.81	19.72	21.15	21.03
Febrero	14.92	14.07	14.02	14.3	14.83	14.5	14.42	15.47	15.38
Marzo	10.9	10.29	10.25	10.45	10.84	10.6	10.54	11.31	11.25
Abril	10.98	10.24	10.2	10.44	10.9	10.61	10.55	11.47	11.39
Mayo	21.23	19.13	19.22	19.84	21.03	20.27	20.12	22.53	22.33
Junio	27.98	25.57	25.42	26.22	27.73	26.77	26.57	29.64	29.38
Julio	22.66	20.66	20.54	21.2	22.45	21.65	21.49	24.01	23.8
Agosto	29.17	26.5	26.34	27.22	28.88	27.82	27.6	30.98	30.69
Septiembre	60.85	55.92	55.61	57.24	60.33	58.37	57.96	64.18	63.66
Octubre	69.74	64.47	64.14	65.89	69.19	67.09	66.66	73.3	72.75
Noviembre	40.88	38.45	38.29	39.11	40.63	39.67	39.47	42.49	42.24
Diciembre	28.79	27.14	27.04	27.59	28.62	27.97	27.83	29.86	29.7

**\*Nota:**  
C.P: Corto Plazo (2020 – 2039)  
M.P: Mediano Plazo (2040 – 2059)  
Valores en m<sup>3</sup>/s

**Tabla 24.** Respuesta de los caudales de salida ante incremento de temperatura para la estación de control Guardia – simulación HydroBID.

Mes	Referencia	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
		C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P
Enero	20.39	19.86	19.74	19.83	19.53	19.96	19.64	19.78	19.24
Febrero	14.92	14.53	14.44	14.51	14.29	14.6	14.37	14.47	14.08
Marzo	10.9	10.62	10.56	10.61	10.45	10.68	10.51	10.58	10.3
Abril	10.98	10.77	10.72	10.76	10.64	10.81	10.69	10.74	10.53
Mayo	21.23	21.01	20.96	21	20.87	21.05	20.92	20.98	20.76
Junio	27.98	27.47	27.36	27.45	27.16	27.57	27.27	27.39	26.89
Julio	22.66	22.01	21.86	21.97	21.61	22.13	21.75	21.91	21.27
Agosto	29.17	28.46	28.31	28.43	28.04	28.6	28.19	28.36	27.68
Septiembre	60.85	59.98	59.79	59.94	59.45	60.15	59.64	59.85	59
Octubre	69.74	68.73	68.51	68.68	68.1	68.92	68.32	68.57	67.56
Noviembre	40.88	39.87	39.65	39.82	39.24	40.06	39.46	39.71	38.7
Diciembre	28.79	28.03	27.86	27.99	27.56	28.17	27.72	27.91	27.15

**\*Nota:**  
C.P: Corto Plazo (2020 – 2039)  
M.P: Mediano Plazo (2040 – 2059)  
Valores en m<sup>3</sup>/s

**Tabla 25.** Respuesta de los caudales de salida ante variación en precipitación e incremento de temperatura para la estación de control Guardia – simulación HydroBID.

Mes	Referencia	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
		C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P
Enero	20.39	18.72	18.53	19	19.41	19.39	18.98	20.52	19.87
Febrero	14.92	13.69	13.56	13.9	14.2	14.19	13.89	15.01	14.54
Marzo	10.9	10.01	9.91	10.16	10.38	10.37	10.15	10.98	10.63
Abril	10.98	10.04	9.95	10.23	10.57	10.45	10.26	11.22	10.94
Mayo	21.23	19.12	18.96	19.62	20.67	20.1	19.81	22.27	21.84
Junio	27.98	24.08	24.82	25.69	26.91	26.36	25.97	29.03	28.26
Julio	22.66	20.04	19.78	20.54	21.41	21.14	20.61	23.23	22.37
Agosto	29.17	25.84	25.54	26.51	27.77	27.27	26.66	30.14	29.16
Septiembre	60.85	55.09	54.6	56.36	58.94	57.68	56.78	63.16	61.77
Octubre	69.74	63.48	62.94	64.84	67.55	66.29	65.26	72.11	70.53
Noviembre	40.88	37.45	37.08	38.06	38.99	38.86	38.06	41.3	40.03
Diciembre	28.79	26.4	26.14	26.81	27.39	27.36	26.79	28.97	28.04

**\*Nota:**  
C.P: Corto Plazo (2020 – 2039)  
M.P: Mediano Plazo (2040 – 2059)  
Valores en m<sup>3</sup>/s



**Tabla 26.** Respuesta de los caudales de salida ante variaciones en precipitación para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID.

Mes	Referencia	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
		C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P
Enero	9.22	8.87	8.99	8.96	9.19	9.05	9.02	9.46	9.42
Febrero	7.62	7.36	7.45	7.43	7.59	7.49	7.47	7.8	7.77
Marzo	6.43	6.23	6.3	6.29	6.41	6.33	6.32	6.57	6.54
Abril	5.77	5.6	5.66	5.65	5.76	5.69	5.67	5.89	5.87
Mayo	7.34	7	7.12	7.09	7.3	7.17	7.14	7.56	7.53
Junio	10.4	9.91	10.08	10.04	10.35	10.16	10.12	10.73	10.68
Julio	10.87	10.38	10.55	10.51	10.82	10.62	10.58	11.2	11.15
Agosto	10.92	10.42	10.6	10.55	10.87	10.67	10.63	11.27	11.21
Septiembre	13.8	13.06	13.32	13.26	13.72	13.43	13.36	14.3	14.22
Octubre	15.79	14.94	15.24	15.17	15.7	15.36	15.29	16.36	16.27
Noviembre	14.32	13.68	13.91	13.85	14.26	14	13.95	14.75	14.68
Diciembre	11.59	11.1	11.27	11.23	11.54	11.35	11.3	11.92	11.86

**\*Nota:**  
C.P: Corto Plazo (2020 – 2039)  
M.P: Mediano Plazo (2040 – 2059)  
Valores en m<sup>3</sup>/s

**Tabla 27.** Respuesta de los caudales de salida ante incremento de temperatura para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID.

Mes	Referencia	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
		C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P
Enero	9.22	9.14	9.12	9.13	9.09	9.16	9.1	9.13	9.04
Febrero	7.62	7.56	7.54	7.56	7.52	7.57	7.53	7.55	7.48
Marzo	6.43	6.38	6.37	6.38	6.35	6.39	6.36	6.38	6.33
Abril	5.77	5.73	5.73	5.73	5.71	5.74	5.72	5.73	5.69
Mayo	7.34	7.29	7.28	7.29	7.26	7.3	7.27	7.28	7.23
Junio	10.4	10.32	10.3	10.32	10.27	10.34	10.29	10.31	10.22
Julio	10.87	10.77	10.74	10.76	10.7	10.79	10.73	10.75	10.65
Agosto	10.92	10.81	10.79	10.81	10.74	10.83	10.77	10.8	10.69
Septiembre	13.8	13.67	13.64	13.66	13.59	13.69	13.62	13.65	13.52
Octubre	15.79	15.63	15.6	15.62	15.54	15.66	15.57	15.61	15.45
Noviembre	14.32	14.17	14.14	14.16	14.08	14.2	14.11	14.15	14
Diciembre	11.59	11.47	11.45	11.47	11.4	11.5	11.43	11.45	11.34

**\*Nota:**  
C.P: Corto Plazo (2020 – 2039)  
M.P: Mediano Plazo (2040 – 2059)  
Valores en m<sup>3</sup>/s

**Tabla 28.** Respuesta de los caudales de salida ante variación en precipitación e incremento de temperatura para la estación de control Rancho Rey – simulación HydroBID.

Mes	Referencia	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5	
		C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P	C.P	M.P
<b>Enero</b>	9.22	8.79	8.74	8.88	9.05	8.98	8.9	9.36	9.24
<b>Febrero</b>	7.62	7.29	7.26	7.36	7.49	7.44	7.38	7.72	7.63
<b>Marzo</b>	6.43	6.19	6.16	6.24	6.33	6.29	6.25	6.51	6.44
<b>Abril</b>	5.77	5.56	5.54	5.61	5.69	5.66	5.62	5.84	5.78
<b>Mayo</b>	7.34	6.96	6.92	7.04	7.22	7.13	7.08	7.51	7.42
<b>Junio</b>	10.4	9.83	9.78	9.96	10.22	10.09	10	10.64	10.5
<b>Julio</b>	10.87	10.28	10.23	10.4	10.65	10.54	10.44	11.08	10.92
<b>Agosto</b>	10.92	10.31	10.25	10.44	10.69	10.58	10.47	11.14	10.97
<b>Septiembre</b>	13.8	12.93	12.86	13.12	13.51	13.32	13.18	14.14	13.93
<b>Octubre</b>	15.79	14.79	14.7	15.01	15.45	15.24	15.08	16.17	15.93
<b>Noviembre</b>	14.32	13.53	13.46	13.7	14.01	13.88	13.74	14.57	14.35
<b>Diciembre</b>	11.59	10.99	10.93	11.11	11.35	11.25	11.14	11.78	11.61

**\*Nota:**  
C.P: Corto Plazo (2020 – 2039)  
M.P: Mediano Plazo (2040 – 2059)  
Valores en m<sup>3</sup>/s