



MINISTERIO DE
AMBIENTE Y ENERGÍA

GOBIERNO
DE COSTA RICA

DIRECCIÓN
DE AGUA



BALANCE HIDRICO NACIONAL Y MODELADO DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Ministerio de Ambiente y Energía
Dirección de Agua
Setiembre, 2024.

Generado con información
comprendida entre 1990 y 2020.



Elaborado por:

Hugo Hidalgo León, PhD. y su equipo consultor, a cargo la determinación de la oferta hídrica, Jesús Monge Mejía del Departamento de Desarrollo Hídrico de la Dirección de Agua, quien estuvo a cargo de la determinación de la extracción hídrica y cálculo del balance hídrico.

Revisado e integrado por:

Leonardo Cascante Chavarría, Coordinador Departamento Desarrollo Hídrico de la Dirección de Agua.

Conocido y retroalimentado por el Comité Nacional de hidrología y Meteorología de Costa Rica (Conahyme), en las sesiones realizadas el 30 de agosto de 2022 y 15 de febrero de 2024.

En honor y memoria de Jesús Monge Mejía
1976-2024. QdDg.

Por sus aportes técnicos y científicos a la
gestión de agua en Costa Rica.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN:	1
2. OBJETIVOS:	3
2.1 OBJETIVO GENERAL:	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	3
3. CÁLCULO DE LA OFERTA HÍDRICA.	3
3.1 DATOS OBSERVADOS:.....	3
3.2 PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA:.....	4
3.3 CAUDALES:	5
3.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN:.....	6
3.4.1 EVAPORACIÓN POTENCIAL:	6
3.4.1.1 THORNTHWAITE.....	6
3.4.1.2 PENMAN- MONTEITH MODIFICADA.....	7
3.5 EVAPORACIÓN DE REFERENCIA:.....	8
3.5.1 PENMAN-MONTEITH	8
3.5.2 HARGREAVES	9
3.6 EVAPORACIÓN REAL	11
4. DATOS MODELADOS.....	12
5. MODELADO DE ESCORRENTÍA, EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RECARGA USANDO EL MODELO HBV	15
6. RESULTADOS.....	17
6.1 BALANCES HISTÓRICOS CON OBSERVACIONES	17
7. CÁLCULO DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA	29
7.1 CÁLCULO DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA POR CUENCA	30
8. BALANCE HÍDRICO	33
8.1 CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO POR CUENCA.....	34
9. BALANCES FUTUROS CON MODELOS.....	36
10. CONCLUSIONES GENERALES	53
11. REFERENCIAS	55
12. ANEXOS	58
Anexo 1. Estadísticos relacionados con la generación de caudales específicos históricos.....	59
Anexo 2. Información relacionada con los traslados de los caudales entre cuencas	65
Anexo 3. Coeficientes óptimos de calibración del modelo HBV optimizados con GAP.	86

Tabla de figuras

Figura 1: Esquema de funcionamiento del modelo HBV.....	16
Fuente: Westerberg y Birkel (2015).	16
Figura 2: Promedios anuales (1990–2020) de diferentes variables que provienen de las observaciones y que fueron usadas en el balance de aguas.	18
Figura 3: Caudales diarios (mm día^{-1}) de 1990 a 2020 para cuencas de Costa Rica obtenidas de la interpolación de datos del ICE.	19
Figura 4. Relaciones entre ETo usando ecuaciones de Penman–Monteith y Hargreaves–Samani para valores mensuales. 20	
Figura 5. Mapa de Oferta Hídrica por cuenca.	28
Figura 6. Mapa de extracción hídrica potencial por cuenca.	32
Figura 7. Mapa de balance hídrico disponible global por cuenca en $\text{hm}^3/\text{año}$	35
Figura 8. Proyecciones de los ensambles de los modelos: EC_earth3, GFDL_ESM4, MPI_ESM1_2_HR de 1979–2100, para escenario SSP5–8. 5.....	39
Figura 9. Proyecciones de los ensambles de los modelos: EC_earth3, GFDL_ESM4, MPI_ESM1_2_HR de 1979–2100, para escenario SSP5–8.5 para temperatura.	40
Figura 10. Cambios (%) de los escenarios futuros con respecto al escenario histórico de diferentes variables del balance de aguas.	52

Índice de Tablas

Tabla 1. Relaciones entre ETo_{Penman} y $ETo_{Hargreaves}$	21
Tabla 2. Balances históricos (1990–2020) para cuencas de Costa Rica, integrados por unidad hidrológica.	22
Tabla 3. Extracción de agua superficial por cuenca y usos, Datos de la Dirección de Agua 2020.	31
Tabla 4. Cálculo del Balance Hídrico, disponible global por cuenca en $hm^3/año$	34
Tabla 5. Estadísticas de calibración de cada una de las 34 cuencas del país.	37
Tabla 6. Balances de los modelos CMIP6, para el escenario histórico y los porcentajes de cambio para escenarios futuros.	42
Tabla 7. Resumen de los balances hídricos por Unidad Hidrológica.	51
Tabla A1. Estadísticas de verificación de caudales en 34 cuencas del país.	59
Tabla A2. Información relacionada con los traslados de caudales.	65
Tabla B1. Parámetros óptimos por cuenca.	86



Abreviaturas

AyA: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

Conahyme: Comité Nacional de Hidrología y Meteorología de Costa Rica.

ERr: Evaporación real.

HBV: Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning; Berstrom.

ICE: Instituto Costarricense de Electricidad.

IMN: Instituto Meteorológico Nacional.

PER: Evaporación potencial.

REDD: Reducción de Emisiones debido a Deforestación y Degradación de los Bosques.

RNC: Registro Nacional de Concesiones.

Senara: Servicio Nacional de Aguas Subterránea, Riego y Avenamiento.

UH: Unidad hidrológica.

Unesco: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.



1. INTRODUCCIÓN:

El presente estudio fue elaborado a partir del análisis realizado por el equipo consultor a cargo del señor Hugo Hidalgo León, PhD., para la determinación de la oferta hídrica, con información hidrometeorológica suministrado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), entre otros.

Para calcular el balance, fue necesario el desarrollo de dos grandes temas. El primer tema es la oferta hídrica, comprendida en los apartados 3, 4, 5 y 6 de este documento. El segundo tema es la extracción, desarrollado en el apartado 7. A partir de la relación, se obtuvo el balance hídrico por cuenca.

Con respecto al tratamiento de los datos, para el cálculo de la oferta se contó con series históricas de precipitación y caudales comprendidas entre 1990 y 2020. Mientras que para calcular la extracción se utilizó la información del Registro Nacional de Concesiones (RNC), para el año 2020.

Por el procedimiento aplicado en este balance, debido a la dinámica del proyecto el tema de

la oferta hídrica fue desarrollado por el equipo consultor y la extracción fue calculada por la Dirección de Agua, de tal forma, la gestión de la demanda o extracción de agua fue elaborada a partir del Registro Nacional de Concesiones (RNC) que administra la Dirección de Aguas, por parte del el Ing. Jesús Monge Mejía. exfuncionario del Departamento de Desarrollo Hídrico de esta Dirección, complementado el Balance, integro los resultados y calculó el volumen disponible para las 34 cuencas.

Los resultados obtenidos se agruparon por cuenca y por unidad hidrológica, que corresponde con la organización implementada por la Dirección de Agua a saber: Tempisque, San Juan, Caribe, Térraba y Tárcoles.

El principal resultado obtenido, corresponde a la relación entre oferta y demanda. El balance de ello, en todas las cuencas es positivo, es decir, para los años base del estudio, la precipitación fue superior a la extracción y demás salidas del sistema.



El balance es un cálculo de la cantidad de agua que entra y sale de un sistema, puede utilizarse para evaluar la disponibilidad, identificar los usos potenciales y evaluar el impacto de las actividades humanas en el ciclo del agua. También, se pueden utilizar para gestionar el agua en una variedad de escalas, desde cuencas hidrográficas individuales hasta regiones enteras. Los resultados pueden ser utilizados para ayudar a tomar decisiones sobre la planificación del agua, la asignación de recursos hídricos, el desarrollo de infraestructura hídrica y la gestión de la calidad del agua.

La metodología para determinar la oferta de agua, los resultados de esta, la extracción de agua y consecuente Balance Nacional Hídrico final, fue presentado y retroalimentado por el Comité Nacional de Hidrología y Meteorología creado por decreto ejecutivo no. 39349-Minae, que es el órgano nacional colegiado técnico-científico en materia de hidrología y meteorología, donde participan representantes de ICE. AyA SENARA, Academia y Dirección de Agua.

La utilidad de un balance hídrico desarrollado a escala de cuenca hidrográfica (34 grandes cuencas que se divide el país) y que presentamos en este documento, está asociada a:

Identificar cuencas propensas a la escasez de agua respecto al desarrollo planes de gestionar el agua por cuenca de manera sostenible.

Identificar los usos potenciales del agua en una cuenca hidrográfica, y asegurar que el agua se utilice de manera eficiente y equitativa, desde la óptica de planificación.

Determinar el impacto de las actividades humanas en el ciclo del agua para identificar fuentes de contaminación del agua, pérdidas del recurso que permite desarrollar medidas para protección.

Por la escala de tiempo y espacio de este balance, no se puede utilizar para garantizar la disponibilidad de agua a nivel de microcuenca, subcuenca o fuente de agua puntual, sobre lo cual se debe hacer estudios particulares; pero si es un instrumento que facilita la planificación a nivel de cuenca y de control del impacto acumulado en la disponibilidad de agua y escenarios futuros de planificación.



2. OBJETIVOS:

2.1 OBJETIVO GENERAL:

Calcular el balance hídrico por cuencas, para tener la relación entre oferta y extracción en el país.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

Calcular la oferta hídrica del país a partir de los datos disponibles y la modelación aplicada.

Calcular la extracción hídrica del país del año 2020, para aplicar la ecuación de balance hídrico por cuenca y grupo de cuencas que integran las unidades hidrológicas.

Identificar las variables asociadas a la instrumentación hidrometeorológica, para mejorar la cobertura y la generación.

3. CÁLCULO DE LA OFERTA HÍDRICA.

3.1 DATOS OBSERVADOS:

El estudio del balance hídrico es fundamental para comprender el ciclo del agua en un determinado ecosistema. Para realizar un análisis adecuado de esta dinámica, es esencial contar con datos precisos y confiables de variables clave como la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración.

La precipitación es el principal aporte de agua a la superficie terrestre, ya sea en forma de lluvia, nieve o granizo. Esta información es fundamental para estimar la cantidad de agua que ingresa a un sistema hidrológico y determinar su disponibilidad para el abastecimiento de fuentes de agua dulce, uso agrícola, industrial y otros usos. Asimismo, conocer la distribución espacial y temporal de la precipitación es esencial para prever fenómenos climáticos extremos como sequías o inundaciones.



Por otro lado, la temperatura, tanto del aire como de los cuerpos de agua, juega un papel crucial en la evaporación y la evapotranspiración. Estos procesos representan la pérdida de agua en forma de vapor desde la superficie de la tierra y las plantas respectivamente. Medir de manera precisa la evapotranspiración es clave para determinar la demanda hídrica de los cultivos, la disponibilidad de agua para los ecosistemas naturales y la gestión del recurso hídrico en general.

Además, el análisis de estas variables en conjunto permite evaluar de manera integral el balance hídrico de un área determinada. Comparar la cantidad de precipitación con la cantidad de agua que se evapora o se consume a través de la evapotranspiración, nos proporciona información valiosa sobre las entradas y salidas de agua en un sistema hidrológico. Esta información es esencial para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos, la planificación de infraestructuras hídricas y la adaptación al cambio climático.

En conclusión, los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración son fundamentales para el estudio del balance hídrico. Contribuyen a entender cómo se distribuye y se utiliza el agua en distintas regiones, así como a

prever y mitigar riesgos asociados a sequías e inundaciones. Estos datos son indispensables para la gestión y preservación de nuestros recursos hídricos, permitiendo una utilización responsable y sostenible del agua.

Los datos observados utilizados en este cálculo comprenden el rango de 1990 al 2020.

3.2 PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA:

Los datos de las estaciones meteorológicas y de caudal deben ser rellenados previos a su uso. En el caso de la precipitación y temperatura, el relleno temporal se efectuará mediante el método de las normales (ver UNESCO, 2007):



Ecuación # 1

$$P_x = \frac{\bar{P}_x}{3} \left(\frac{P_a}{\bar{P}_a} + \frac{P_b}{\bar{P}_b} + \frac{P_c}{\bar{P}_c} \right)$$

Donde:

P_a, P_b, P_c son los valores de estaciones A, B, C durante el período que falta en la estación X.

$\bar{P}_x, \bar{P}_a, \bar{P}_b, \bar{P}_c$ son los promedios de las estaciones.

Los datos de precipitación fueron homogeneizados considerando estaciones mecánicas que se convirtieron luego a automáticas. Cada par de estaciones (mecánica y automática) fueron consideradas cercanas si su distancia es menor o igual a 0.07 grados. Las probabilidades de excedencia de Weibull (Wilks, 2011) fueron calculadas para la parte más reciente (datos de la estación automática), y luego le fueron impuestos los percentiles a esas probabilidades usando los datos de las estaciones más antiguas (mecánicas). Esto hace que se “coloreé” los datos más recientes con los estadísticos de los

datos más antiguos. Esto por cuanto es sabido que los datos de estaciones automáticas pueden presentar un sesgo hacia precipitaciones más bajas con respecto a las estaciones mecánicas.

3.3 CAUDALES:

Para el rellenado espacial de los caudales, los datos del promedio de la precipitación multiplicado por el área de las cuencas fueron usado como parámetro para determinar la semejanza entre las cuencas con y sin datos, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación # 2

$$Q_x = \frac{A_x (\bar{P}_x)}{A_b (\bar{P}_b)} Q_b$$

Donde:

Q_x : caudal rellenado espacialmente en mm día⁻¹

A_x, A_b : Áreas de las cuencas sin datos y con datos.

\bar{P}_x, \bar{P}_b : Promedio de las precipitaciones medias reales de las cuencas sin datos y con datos



Se calcularán los caudales específicos de las cuencas, tanto por cuenca y subcuenca de acuerdo con la siguiente ecuación (UNESCO, 2007):

Ecuación # 3

$$q_{i+1} = \frac{Q_{i+1} - \sum Q_i}{A_i - \sum A_i}$$

Donde:

q_{i+1} : Caudal específico en el punto $i+1$ mm día⁻¹

Q_{i+1} : Caudal registrado en el punto $i+1$

Q_i : Caudales observados en los puntos i que limitan la cuenca aguas arriba.

A_{i+1} : Superficie de la cuenca total controlada por el punto $i+1$

A_i : Superficie de las cuencas controladas por los puntos i .

3.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN:

3.4.1 EVAPORACIÓN POTENCIAL:

El cálculo de la evaporación potencial (PET, por sus siglas en inglés) usada en los modelos hidrológicos se calculará por medio de la ecuación de Thornthwaite (1948) y la de Penman-Monteith modificada que se resumen a continuación:

3.4.1.1 THORNTHWAITE

Ecuación # 4

$$PET = 16 \left(\frac{L}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_d}{I} \right)^\alpha$$

Ecuación # 5

$$\alpha = (6.75 \times 10^{-7})I^3 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.792 \times 10^{-2})I + 0.49239$$



Ecuación # 6

$$I = \sum_{1}^{12} \left(\frac{T_{mi}}{5} \right)^{1.514}$$

Donde:

PET : es la evapotranspiración potencial calculada ($\text{mm}/\text{mes}^{-1}$).

T_d : es la temperatura diaria promedio ($^{\circ}\text{C}$) del mes que está siendo calculado.

N : es el número de días del mes calculado.

L : es el número promedio de horas de so del mes calculado.

α : es un índice anual.

I : es un índice de calor.

T_{mi} : son los promedios mensuales de temperaturas para cada año. Para el cálculo de L se usará la ecuación 21.

3. 4. 1. 2 PENMAN- MONTEITH MODIFICADA

Ecuación # 7

$$PET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + A_h) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6.43 (1 + 0.53 U_2) D}{\lambda} \quad [\text{mm día}^{-1}]$$

Ecuación # 8

$$e_s = \exp \left(\frac{17.27 T}{237.3 + T} \right)$$

Ecuación # 9

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(237.3 + T)^2}$$

Donde:

R_n : es la radiación neta mm día^{-1} .

A_h : es la energía advectada si es significativa en mm día^{-1} .

e_s : presión de saturación de vapor, en KPa.

Δ : es el gradiente de la relación entre la temperatura en grados centígrados (T).



Ecuación # 10

$$Y = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} \chi 10^{-3} = 0.0016286 \frac{P}{\lambda}$$

Donde:

Y : es la constante psicométrica, en $\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.

c_p : es el calor específico de aire húmedo ($=1.013 \text{ kJ kg}^{-1}$).

ϵ : es la razón del peso molecular del vapor de agua al del aire seco ($=0.622$).

P : es la presión atmosférica en la estación en KPa

Ecuación # 11

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 T_s$$

λ : es el calor latente de vaporización del agua, que es función de la temperatura de la superficie en grados centígrados (T_s), en MJ Kg^{-1} .

Ecuación # 12

$$D = e_s - e_a = e_s \left(1 - \frac{HR}{100} \right)$$

D : Es el déficit de presión de saturación del vapor, en KPa .

HR : Es la Humedad Relativa

3. 5 EVAPORACIÓN DE REFERENCIA:

3. 5. 1 PENMAN-MONTEITH

Para la evaporación de referencia se utilizará principalmente la fórmula de Penman-Monteith (Monteith 1965, Maidment, 1993), que dice que la evapotranspiración de referencia es la tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético, cuya altura se asume que es de 12 cm, tiene una resistencia de cultivo de 70 [s/m] y un albedo de 0.23.

Esto se asemeja a la evapotranspiración de una superficie extensa de gramilla verde, de altura

uniforme, creciendo activamente, cubriendo completamente la superficie del suelo y sin deficiencia de agua (UNESCO, 2007). Este cálculo es necesario para los balances de agua en que se dispone de la información de caudales, ya que por medio de los coeficientes de cultivo se calculará la Evapotranspiración Real para la comparación con los valores de los modelos. Los datos de cobertura de cultivos del país se obtendrán de mapas del uso de la tierra actualizados del país.

Ecuación # 13

$$E_{rc} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{900}{T + 275} U_2 D \quad [\text{mm día}^{-1}]$$

Donde, las variables ya fueron definidas con anterioridad y:

Ecuación # 14

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0.33U_2)$$

Y G es la conducción al suelo de calor:



Ecuación # 15

$$G = (T_{mes 2} - T_{mes 1}) \quad [\text{MJ m}^{-2} \text{mes}^{-1}]$$

3. 5. 2 HARGREAVES

Debido a la falta de datos de radiación y velocidad del viento, la evapotranspiración de referencia se calculó de acuerdo con la ecuación de Hargreaves-Samani (1985) basada en Hargreaves (1975).

Ecuación # 16

$$ET_o = 0.0135 \cdot k_{Rs} \cdot R_a \cdot \sqrt{T_{max} - T_{min}} \cdot (T_a + 17.8) \quad [\text{mm día}^{-1}]$$

k_{Rs} : es el coeficiente de ajuste de radiación, el cual fue considerado para regiones húmedas en 0.19 (Shahidian et al., 2012).

R_a : es la radiación extraterrestre (ver abajo).

T_{max}, T_{min}, T_a : son las temperaturas máximas, mínimas y promedio en °C respectivamente.



La radiación extraterrestre para el cálculo de la evaporación de referencia de Hargreaves se obtuvo de las siguientes fórmulas (Duffie y Beckman, 1980; Maidment, 1993).

Ecuación # 17

$$R_a = 15.392 d_r (\omega_s \sin \sin \phi \sin \sin \delta + \cos \cos \phi \cos \cos \delta \sin \sin \omega_s)$$

Donde:

R_a : es la radiación extraterrestre, en mm día⁻¹

S_0 : radiación extraterrestre en mm día⁻¹,

d_r : la distancia relativa entre la Tierra y el sol, dada por la siguiente ecuación:

Ecuación # 18

$$d_r = 1 + 0.33 \cos \cos \left(\frac{2\pi}{355} J \right)$$

J : es el día juliano.

Ecuación # 19

$$\delta = 0.4093 \sin \sin \left(\frac{2\pi}{355} J - 1.405 \right)$$

ω_s : es el ángulo horario de puesta del sol (en radianes) dado por:

Ecuación # 20

$$\omega_s = (\phi \tan \tan \delta)$$

ϕ : Es la latitud del sitio (positivo para el hemisferio Norte y negativo para el hemisferio Sur).

Para el cálculo de las horas de luz-día en la fórmula de evaporación de Thornthwaite (1948), el máximo número de horas está dado por:

Ecuación # 21

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Es sabido que los valores de ETo usando la ecuación de Hargreaves y la de evaporación potencial (PET) de Thornthwaite presentan sesgos positivos en regiones húmedas (de Sousa-Lima et al., 2013). Tanto los valores de ETo como los valores de PET fueron corregidos usando las 8 estaciones disponibles en el país con datos suficientes para calcular las estimaciones de Penman para estas



dos variables. Se calcularon regresiones para calcular los factores de corrección, lo cual mejoró significativamente los valores de cierre (errores) de los balances de agua.

3. 6 EVAPORACIÓN REAL

En las cuencas que están instrumentadas y se dispone de datos de caudal se calculará la evaporación real por medio de la transformación de la E_{rc} a E_{real} con los coeficientes de cultivo obtenidos de los mapas de cobertura del proyecto REDD+ para Costa Rica de acuerdo con la siguiente ecuación:

Ecuación # 22

$$E_{real} = K c E_{rc}$$

Con los caudales, la evapotranspiración real y los valores de precipitación obtenidos se aplicará la ecuación de balance de aguas:

Ecuación # 23

$$\langle \overline{P} \rangle - \langle \overline{Q} \rangle - \langle \overline{E_{real}} \rangle - \eta = 0$$

Donde

$\langle \overline{P} \rangle$: Precipitación media espacial y temporal

$\langle \overline{Q} \rangle$: Escorrentía media espacial y temporal

$\langle \overline{E_{real}} \rangle$: Evapotranspiración media espacial y temporal

η : Error de medición

Para el caso de los balances históricos: en adición a los balances por cuenca, se calcularon los balances por cuenca baja, media y alta de cada unidad hidrológica (UH). Para tal fin se obtuvieron las elevaciones de Costa Rica utilizando los datos de GTOPO30. Para cada UH, se definieron terciles de elevación para considerar la distribución de los puntos de grilla de cada cuenca en cada una de las subregiones (baja, media y alta). Nótese que alguna cuenca en particular puede que no tenga área en alguna de las subregiones de la UH o que, en algunos casos, incluso la cuenca se encuentre enteramente en una subregión.



4. DATOS MODELADOS

Los modelos de datos hidrológicos desempeñan un papel crucial en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Estos modelos son herramientas que permiten simular el comportamiento de las aguas en una cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta diferentes variables como la precipitación, la evaporación, la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo.

La importancia de estos modelados radica en su capacidad para predecir el flujo de agua en los ríos y los cambios en la disponibilidad de agua en el tiempo. Esto es fundamental para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del agua, como el diseño de infraestructuras hidráulicas, la planificación de la agricultura y la gestión de los recursos hídricos en general.

Además, los modelos de datos hidrológicos permiten evaluar el impacto de diferentes escenarios, como el cambio climático o la implementación de medidas de conservación del agua. Esto proporciona información valiosa para la adopción de políticas y acciones que promuevan la sostenibilidad del recurso hídrico.

En resumen, los modelos de datos hidrológicos son herramientas esenciales para comprender, predecir y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos. Su utilización contribuye a minimizar los riesgos asociados a la escasez de agua y a garantizar el suministro adecuado de este recurso vital para la vida y el desarrollo sostenible.

Para este procedimiento se efectuó para generar los datos de precipitación y temperatura, tanto de los datos de las estaciones meteorológicas, como los de los modelos climáticos de circulación general.

Los datos de los modelos climáticos de circulación general de 1979 a 2100 fueron descargados del repositorio de datos de WRF (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) para hacer un proceso de cambio de escala estadístico y así llevarlos a una resolución de 1 km. El método empleado es el de Navarro-Racines et al. (2020) de acuerdo con la siguiente metodología:



Se utilizan las climatologías a 1 km x 1 km de los datos de WorldClim (<http://ccafs-climate.org>; Fick y Hijmans, 2017) como base para usar el método delta de corrección de sesgos y cambio de escala, descrito en Navarro- Racines et al. (2020). Esto consiste en expresar los percentiles de cada una de las observaciones de las estaciones meteorológicas en términos de anomalías con respecto a sus promedios anuales respectivos.

En otras palabras:

PARA PRECIPITACIÓN:

Ecuación # 24a

$$\Delta X_i = \frac{X_{Fi} - X_{Ci}}{X_{Ci}}$$

PARA TEMPERATURA:

Ecuación # 24b

$$\Delta X_i = X_{Fi} - X_{Ci}$$

Donde:

ΔX_i : es igual a la anomalía de los datos diarios de precipitación o temperatura de los modelos climáticos calculados para la estación meteorológica i .

X_{Fi} : es el valor de precipitación o temperatura diaria del modelo.

X_{Ci} : el valor climatológico de esa locación. Para precipitación, si X_{Ci} es menor que 0.254 mm, se consideró ΔX_i igual a cero.

Luego se interpola el mapa de anomalías de todas las estaciones en la malla de climatología anual de WorldClim y se le añade esa climatología de la siguiente manera:

PARA PRECIPITACIÓN:

Ecuación # 25a

$$X_{DFi} = X_{OBSi} (1 + \Delta X_{li})$$

PARA TEMPERATURA:

Ecuación # 25b

$$X_{DFi} = X_{OBSi} + \Delta X_{li}$$

Donde:

X_{DFi} : es igual al valor del dato cambiado de escala y que conforma un punto de la malla de alta resolución (1 km) para el cálculo de la amenaza.

X_{OBSi} : es el valor de la climatología en el punto de grilla i obtenido de WorldClim.

ΔX_{li} : es el de la anomalía de percentil interpolada mencionada anteriormente.



En resumen, los datos de valores extremos serán cambiados de escala, de acuerdo con el procedimiento descrito en los párrafos anteriores de esta sección, de las ubicaciones puntuales de cada estación utilizando la base de datos global WorldClim (worldclim.org), una base de datos mundial de alta resolución.

Una vez que se obtienen los datos de precipitación y temperatura del modelo a una resolución de 1 km, se utilizó una capa de cuencas provista por el ICE para cortar las proyecciones diarias de precipitación y temperatura que están en rejilla usando los polígonos para las 34 cuencas del país (promediando los valores de la rejilla que están en cada uno de los polígonos de las cuencas). Esta información alimentará finalmente los modelos hidrológicos que previamente serán calibrados con los datos de precipitación, temperatura y caudal observados del IMN, del ICE y de otras fuentes.

Los caudales y la evapotranspiración real son parte del balance de aguas, presente y futuro. Con los datos observados del IMN, ICE y otras fuentes, se calcularán estos parámetros para la parte histórica, pero para las proyecciones futuras se necesitan obtenerlos con el modelo hidrológico calibrado una vez que se tenga como entrada los datos de precipitación y temperatura de las proyecciones climáticas para las 34 cuencas. Se muestra seguidamente unos gráficos de ensambles (calculados mediante la mediana) de 3 modelos llamados “EC_earth3” del Centro de Modelado o Grupo EC-EARTH consortium en Europa, “GFDL_ESM4” de Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) de Estados Unidos, y “MPI_ESM1_2_HR_E” del Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) en Alemania. Estos modelos son parte de la última generación (CMIP6) usados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Estos modelos probaron ser modelos con menos sesgos en la región según Almazroui et al. (2021).



5. MODELADO DE ESCORRENTÍA, EVAPOTRANSPIRACIÓN Y RECARGA USANDO EL MODELO HBV

Como una alternativa para el cálculo de los balances de agua en las 34 cuencas del país y debido a la falta de datos de caudales en muchas de éstas se utilizará un modelo hidrológico agregado denominado HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning; Bergström, 1976), el cual es un modelo conceptual que ha sido usado con anterioridad en aplicaciones hidrológicas en cuencas de Costa Rica (Westerberg y Birkel, 2015; Quesada-Montano et al. 2018; Quesada-Hernández, 2019). En la Fig. 1 se muestra un ejemplo del esquema de funcionamiento del modelo.

Los valores de los parámetros del modelo se seleccionarán de acuerdo con Westerberg y Birkel (2015). Con los datos de las variables de entrada precipitación y evaporación potencial, se estimará la respuesta de Evaporación Real y Escorrentía Total y se calcularán los balances de agua modelados.

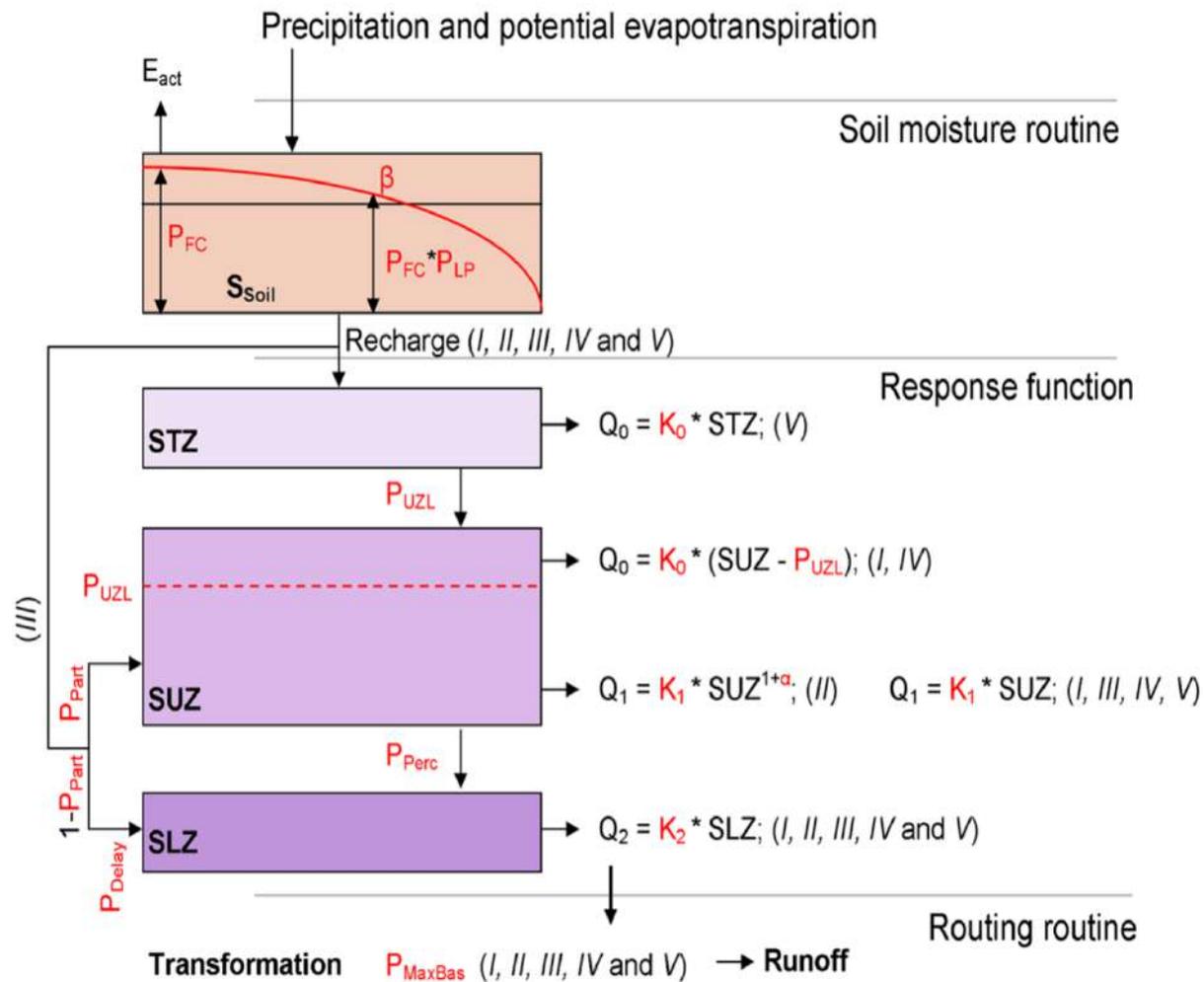


Figura 1: Esquema de funcionamiento del modelo HBV.
Fuente: Westerberg y Birkel (2015).



6. RESULTADOS

6.1 BALANCES HISTÓRICOS CON OBSERVACIONES

Los promedios anuales de 1990 a 2020 de las variables de precipitación, temperatura, caudales específicos y evapotranspiración de referencia se muestran en la figura 2.

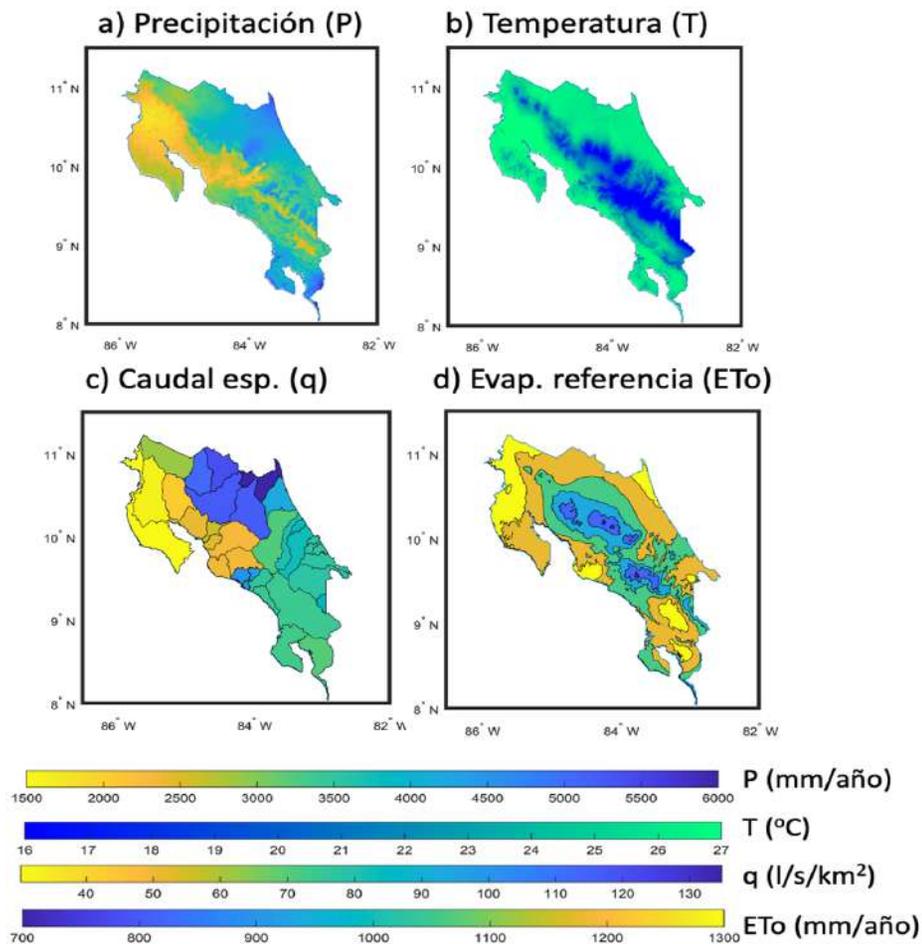


Figura 2: Promedios anuales (1990–2020) de diferentes variables que provienen de las observaciones y que fueron usadas en el balance de aguas.

Los datos para construir estos promedios fueron revisados y sometidos a una serie de pruebas. Para el caso particular del caudal, se revisó que los caudales fueran homogéneos (lo cual es una indicación de que presentan condiciones naturales en el caudal, y que es un requerimiento para aplicar la ecuación 23). Se usaron tres pruebas para probar que la primera mitad de los datos de caudal presentan las mismas características de la segunda mitad: Kolmogorow–Smirnov (KS), Mann–Whitney U test (MW) y Siegel–Tukey (ST). Los resultados se muestran en la Tabla A1 del anexo 1. También, los caudales fueron obtenidos usando la ecuación 2, de acuerdo con los siguientes traslados de caudales mostrados en Tabla A2 del anexo 2.

Las series de tiempo de caudales históricos provenientes de la interpolación de los datos del ICE se muestran en la Figura 3. De la Tabla A1 y de la inspección visual de la Figura 3, se puede concluir que los datos de los caudales obtenidos tienen características naturales y poca regulación.

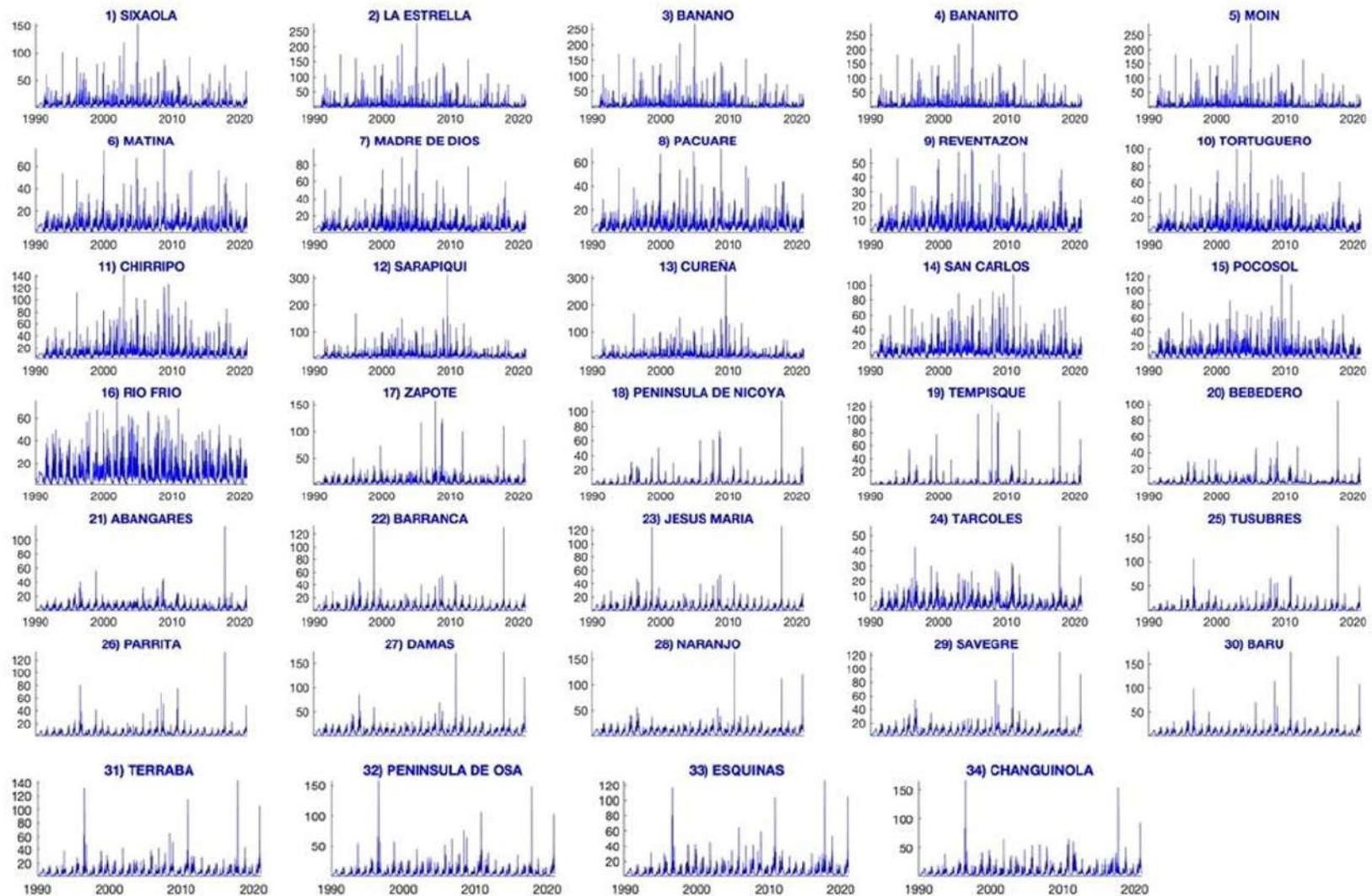


Figura 3: Caudales diarios (mm día^{-1}) de 1990 a 2020 para cuencas de Costa Rica obtenidas de la interpolación de datos del ICE.



Con respecto a la evaporación de referencia, las relaciones mensuales entre ETo de Penman y Thornthwhite se muestran en la Figura 4. Como se puede ver algunas relaciones tienen correlaciones cercanas a cero o incluso negativas. Por esa razón solo se usaron las estaciones con correlación positiva.

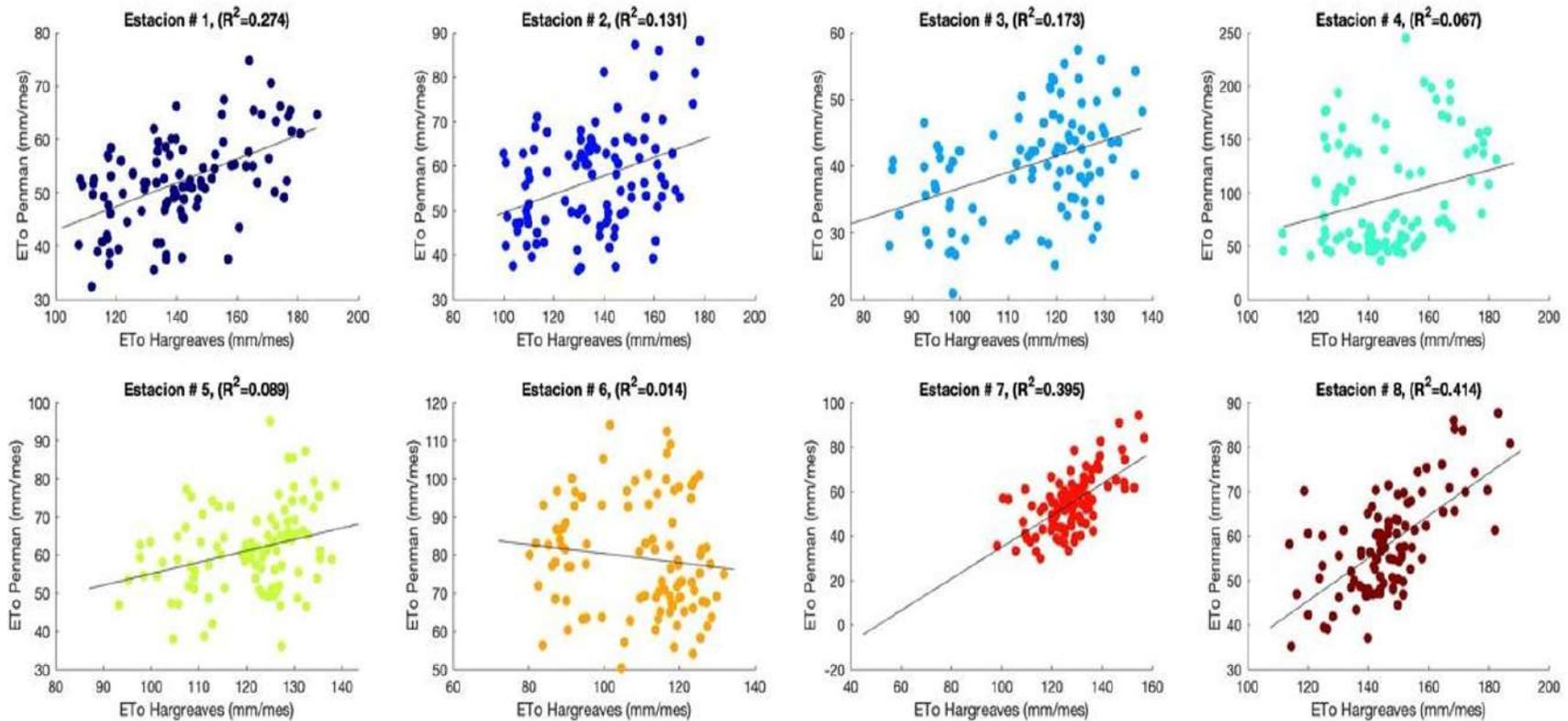


Figura 4. Relaciones entre ETo usando ecuaciones de Penman-Monteith y Hargreaves-Samani para valores mensuales.



Tabla 1. Relaciones entre ETo_{Penman} y $ETo_{Hargreaves}$.

Estación	Relación	
1	$ETo_{Penman} = 0.2219 * ETo_{Hargreaves} + 20.7938$	$R^2 = 0.274$
2	$ETo_{Penman} = 0.20778 * ETo_{Hargreaves} + 28.7129$	$R^2 = 0.131$
3	$ETo_{Penman} = 0.2364 * ETo_{Hargreaves} + 13.0716$	$R^2 = 0.173$
4	$ETo_{Penman} = 0.77925 * ETo_{Hargreaves} - 19.0346$	$R^2 = 0.067$
5	$ETo_{Penman} = 0.30048 * ETo_{Hargreaves} + 25.0225$	$R^2 = 0.089$
6	$ETo_{Penman} = -0.11999 * ETo_{Hargreaves} + 92.3588$	$R^2 = 0.014$
7	$ETo_{Penman} = 0.71418 * ETo_{Hargreaves} - 36.4403$	$R^2 = 0.395$
8	$ETo_{Penman} = 0.47908 * ETo_{Hargreaves} - 12.1137$	$R^2 = 0.414$

También se calculó la ETo mediante la fórmula de Oudin (Oudin et al. 2010), pero los resultados de Hargreaves fueron los que presentaron mejores eficiencias de Nash-Sutcliffe comparados con los estimados de Penman (no mostrado).

Los balances de agua de la parte histórica de todas las cuencas se muestran en la Tabla 2.



Tabla 2. Balances históricos (1990–2020) para cuencas de Costa Rica, integrados por unidad hidrológica.

(1) UH	(2) Nombre de Cuenca	(3) Área de Referencia en la cuenca (km ²)	(4) Área (km ²)	(5) Elevación media TOTAL (msnm)	(6) Precipitación (mm/año)	(7) Escorrentía (mm/año)	(8) Etr (mm/año)	(9) Error (mm/ año)	(10) Error (%)	(11) Caudal (mm/ año)	(12) Volumen (hm ³ /año)
CARIBE	1 SIXAOILA	TOTAL	2310.29	1275.25	3622.61	2456.51	719.04	-447.06	-12.34	2456.51	5675.25
		BAJA	236.20	32.69	3637.78	2447.41	719.49	-470.88	-12.94	2447.41	578.08
		MEDIA	826.70	572.27	3571.74	2465.48	889.57	-216.69	-6.07	2465.48	2038.22
		ALTA	1247.38	1976.44	3653.46	2452.29	605.94	-595.24	-16.29	2452.29	3058.94
	2 LA ESTRELLA	TOTAL	980.44	391.61	3600.83	2458.26	968.71	-173.86	-12.34	2456.51	2410.18
		BAJA	146.94	49.36	3621.04	2447.41	804.34	-369.29	-12.94	2447.41	359.61
		MEDIA	737.30	334.14	3543.20	2448.65	1010.41	-84.14	-6.07	2448.65	1805.39
		ALTA	96.21	1354.75	4011.55	2548.48	900.15	-562.92	-14.03	2548.48	245.18
	3 BANANO	TOTAL	206.94	587.21	3786.61	2456.51	958.18	-363.33	-9.60	2465.10	510.13
		BAJA	24.10	30.52	3452.06	2447.41	608.10	-396.55	-11.49	2447.41	58.99
		MEDIA	142.11	457.73	3678.76	2456.00	1021.82	-200.94	-5.46	2456.00	349.03
		ALTA	40.72	1368.53	4361.00	2507.34	943.29	-910.37	-20.88	2507.34	102.11
	4 BANANITO	TOTAL	225.15	168.92	3411.60	2447.41	908.97	-55.22	-1.62	2447.41	551.04
		BAJA	55.66	36.26	3534.99	2447.41	715.27	-372.31	-10.53	2447.41	136.21
		MEDIA	169.50	212.48	3371.08	2447.41	972.57	48.90	1.45	2447.41	414.83
	5 MOÍN	TOTAL	162.91	123.54	3619.54	2447.41	839.06	-333.08	-9.20	2447.41	398.71
		BAJA	53.40	41.57	3583.16	2447.41	687.97	-448.78	-15.52	2447.41	130.69
		MEDIA	109.51	161.47	3636.98	2447.41	911.96	-277.62	-7.63	2447.41	268.02
	6 MATINA	TOTAL	1612.14	1043.06	3661.57	2616.58	872.75	-172.26	-4.70	2616.58	4218.30
		BAJA	229.94	28.69	3886.60	2606.83	645.55	-634.39	-16.32	2602.83	599.42
		MEDIA	677.15	552.91	3683.97	2645.55	998.36	-40.06	-1.09	2645.55	1791.43
		ALTA	705.05	1844.65	3566.94	2591.94	825.94	-149.07	-4.18	2591.94	1827.44



(1) UH	(2) Nombre de Cuenca	(3) Área de Referencia en la cuenca (km ²)	(4) Área (km ²)	(5) Elevación media TOTAL (msnm)	(6) Precipitación (mm/año)	(7) Escorrentía (mm/año)	(8) Etr (mm/año)	(9) Error (mm/ año)	(10) Error (%)	(11) Caudal (mm/ año)	(12) Volumen (hm ³ /año)
CARIBE	7 MADRE DE DIOS	TOTAL	254.54	63.99	3961.17	2654.19	708.82	-598.16	-15.10	2654.19	675.60
		BAJA	211.56	22.95	3990.70	2654.19	654.89	-681.16	-17.08	2654.19	561.51
		MEDIA	42.99	265.96	3816.41	2654.19	937.15	-189.06	-4.95	2654.19	114.09
	8 PACUARE	TOTAL	908.34	1005.40	3745.19	2561.83	695.01	-488.43	-13.04	2561.83	2327.03
		BAJA	165.84	23.86	4047.86	2654.19	647.72	-745.95	-18.43	2654.19	440.18
		MEDIA	359.47	619.96	3553.16	2615.33	734.38	-203.45	-5.75	2615.33	940.12
		ALTA	383.04	1792.09	3795.02	2471.64	678.44	-644.93	-16.99	2471.64	946.73
	9 REVENTAZÓN	TOTAL	2810.34	1072.15	3499.52	2236.73	555.12	-707.66	-20.22	2236.73	6285.99
		BAJA	546.53	31.49	4097.07	2654.19	511.66	-931.23	-22.73	2654.19	1450.58
		MEDIA	939.31	580.78	3610.61	2425.69	554.44	-603.48	-16.71	2452.69	2303.85
		ALTA	1324.50	1850.04	3174.17	1911.33	573.54	-689.30	-21.72	1911.33	2531.56
	10 TORTUGUERO	TOTAL	1472.00	40.83	4513.57	2933.11	531.84	-1047.82	-23.21	2933.11	4317.53
		BAJA	1337.42	28.69	4515.22	2959.16	531.41	-1023.69	-22.67	2959.16	3957.63
		MEDIA	134.58	161.45	4497.15	2674.20	536.09	-1286.86	-28.62	2674.20	359.90
	11 CHIRRIPO	TOTAL	2770.28	786.60	4202.97	3687.52	549.94	34.48	0.82	3687.52	10215.44
		BAJA	778.19	101.30	4215.29	4297.94	544.90	627.55	-14.89	4297.94	3344.60
MEDIA		929.08	378.60	4470.08	3588.77	518.13	-363.18	-8.12	3588.77	3334.24	
ALTA		1063.01	1644.87	3960.51	3326.96	581.43	-52.12	-1.32	3326.96	3536.60	



(1) UH	(2) Nombre de Cuenca	(3) Área de Referencia en la cuenca (km ²)	(4) Área (km ²)	(5) Elevación media TOTAL (msnm)	(6) Precipitación (mm/año)	(7) Escorrentía (mm/año)	(8) Etr (mm/año)	(9) Error (mm/ año)	(10) Error (%)	(11) Caudal (mm/ año)	(12) Volumen (hm ³ /año)
SAN JUAN	12 SARAPIQUÍ	TOTAL	1023.31	34.75	4676.72	4251.80	502.85	77.92	1.67	4251.80	4350.92
		BAJA	1023.31	34.75	4676.72	4251.80	502.85	77.92	1.67	4251.80	4350.92
	13 CUREÑA	TOTAL	359.63	51.80	4201.66	4254.54	757.84	810.73	19.30	4254.54	1530.08
		BAJA	318.71	41.29	4210.40	4254.54	765.30	809.45	19.23	4254.54	1355.96
		MEDIA	40.93	133.62	4133.58	4254.54	699.71	820.68	19.85	4254.54	174.13
	14 SAN CARLOS	TOTAL	3129.59	574.23	3783.62	3695.50	619.53	531.40	14.04	3695.50	11565.39
		BAJA	553.03	61.09	3947.33	3989.71	600.26	642.64	16.28	3989.71	2206.41
		MEDIA	922.56	159.31	3983.81	3826.83	536.37	379.39	9.52	3826.83	3530.47
		ALTA	1654.01	977.23	3617.22	3523.87	672.35	579.00	16.01	3523.87	5828.50
	15 POCOSOL	TOTAL	1643.73	83.27	3624.80	3796.59	614.68	786.48	21.70	3796.59	6240.59
		BAJA	878.44	55.35	3569.63	3756.28	593.01	779.67	21.84	3576.28	3299.68
		MEDIA	765.29	115.31	3668.14	3482.87	639.56	794.29	21.54	3842.87	2940.91
	16 RÍO FRÍO	TOTAL	1685.53	206.30	3395.51	3563.17	607.61	775.28	22.83	3563.17	6005.82
		BAJA	798.99	47.72	3263.54	3574.37	540.16	850.99	26.08	3574.37	2855.88
		MEDIA	543.14	159.49	3447.26	3589.39	614.46	726.58	20.90	3589.39	1949.55
		MEDIA	343.40	649.31	3573.25	3495.66	753.73	676.14	18.92	3495.66	1200.39
	17 ZAPOTE	TOTAL	2450.18	397.07	2989.67	1964.02	756.60	-269.05	-9.00	1964.02	4812.21
		BAJA	523.28	51.73	2948.40	3031.50	590.69	673.79	22.85	3031.50	1586.33
		MEDIA	1036.39	214.82	3009.67	1687.20	753.42	-569.05	-18.91	1687.20	1748.59
		ALTA	890.51	680.04	2990.65	1658.92	857.78	-473.95	-15.85	1658.92	1477.29



(1) UH	(2) Nombre de Cuenca	(3) Área de Referencia en la cuenca (km ²)	(4) Área (km ²)	(5) Elevación media TOTAL (msnm)	(6) Precipitación (mm/año)	(7) Escorrentía (mm/año)	(8) Etr (mm/año)	(9) Error (mm/ año)	(10) Error (%)	(11) Caudal (mm/ año)	(12) Volumen (hm ³ /año)
TEMPISQUE	18 RIÓS DE LA PENÍNSULA DE NICOYA	TOTAL	4176.85	190.90	2517.14	969.16	994.48	-553.91	-22.00	969.16	4048.064
		BAJA	1011.08	32.32	2471.04	989.77	916.07	-565.93	-22.90	989.77	1000.74
		MEDIA	1697.07	130.17	2505.58	972.22	999.67	-534.18	-21.32	972.22	1649.92
		ALTA	1468.71	351.69	2561.97	951.46	1042.00	-568.51	-22.19	951.46	1397.41
	19 TEMPISQUE	TOTAL	3382.15	174.28	2042.74	1037.46	849.98	-155.30	-7.60	1037.46	3508.83
		BAJA	1181.85	33.98	1994.77	975.94	761.24	-258.62	-12.96	975.94	1153.42
		MEDIA	1397.73	122.57	1998.22	1062.55	851.04	-84.46	-4.23	1062.55	1485.15
		ALTA	802.57	468.30	2189.85	1084.35	977.05	-128.45	-5.87	1084.35	870.27
	20 BEBEDERO	TOTAL	2068.34	281.73	2181.62	1361.14	683.38	-137.00	-6.28	1361.14	2815.31
		BAJA	626.92	38.12	2061.66	1549.10	633.24	121.27	5.88	1549.10	971.17
		MEDIA	540.74	125.70	2032.48	1128.23	658.03	-246.22	-12.11	1128.23	610.08
		ALTA	900.68	544.50	2354.55	1370.15	733.45	-250.95	-10.66	1370.15	1234.06
	21 ABANGARES	TOTAL	1349.58	370.98	2530.43	1632.62	730.75	-166.38	-6.58	1632.62	2203.35
		BAJA	389.29	30.78	2283.21	1227.68	647.61	-412.81	-18.08	1227.68	477.92
		MEDIA	338.47	131.18	2394.68	1090.76	763.47	-540.45	-22.57	1090.76	369.19
		ALTA	621.82	681.87	2756.34	2181.07	764.06	188.79	6.85	2181.07	1356.24



(1) UH	(2) Nombre de Cuenca	(3) Área de Referencia en la cuenca (km ²)	(4) Área (km ²)	(5) Elevación media TOTAL (msnm)	(6) Precipitación (mm/año)	(7) Escorrentía (mm/año)	(8) Etr (mm/año)	(9) Error (mm/ año)	(10) Error (%)	(11) Caudal (mm/ año)	(12) Volumen (hm ³ /año)
TÁRCOLES	22 BARRANCA	TOTAL	481.65	735.15	2655.49	1770.56	509.75	-375.18	-1 4.13	1770.56	852.79
		BAJA	127.99	179.70	2359.59	1692.73	469.41	-197.46	-8.37	1692.73	216.65
		MEDIA	248.40	786.91	2697.04	1692.73	508.20	-496.11	-18.39	1692.73	420.48
		ALTA	105.26	1279.56	2917.24	2048.47	562.46	-305.91	-10.49	2048.87	215.66
	23 JESÚS MARÍA	TOTAL	377.80	243.52	2400.26	1669.29	439.71	-291.26	-12.13	1669.29	630.65
		BAJA	292.46	141.95	2335.98	1682.04	431.49	-222.46	-9.52	1682.04	491.93
		MEDIA	83.56	580.11	2620.28	1627.27	470.32	-522.69	-19.95	1627.27	135.97
		ALTA	1.78	1132.00	2632.61	1546.23	353.52	-732.86	-27.84	1546.23	2.75
	24 GRANDE DE TÁRCOLES	TOTAL	2164.41	1026.33	2618.83	1529.92	469.18	-619.73	-23.66	1529.92	3311.37
		BAJA	214.75	166.34	2262.32	1517.93	533.36	-211.02	-9.33	1571.93	325.98
		MEDIA	1022.18	801.68	2489.46	1481.85	457.57	-550.04	-22.09	1481.85	1514.71
		ALTA	927.48	1471.48	2843.95	1585.67	467.12	-791.16	-27.82	1585.67	1470.68
	25 TUSUBRES	TOTAL	823.33	245.53	2958.74	1572.72	607.18	-778.76	-26.32	1572.72	1294.88
		BAJA	611.96	139.45	2991.52	1595.57	592.95	-802.84	-268.45	1595.57	976.43
		MEDIA	207.96	509.60	2870.43	1508.33	647.48	-714.62	-24.90	1508.33	313.68
		ALTA	3.41	1216.75	2477.52	1399.73	697.04	-380.75	-15.37	1399.73	4.77
	26 PARRITA	TOTAL	1273.83	1167.51	2734.81	1567.80	550.74	-616.28	-22.53	1567.80	1997.11
		BAJA	188.53	142.63	3161.17	1806.62	552.99	-801.55	-25.36	1806.62	340.60
		MEDIA	414.42	731.30	2664.77	1595.09	578.52	-491.16	-18.43	1595.09	661.04
		ALTA	670.89	1721.08	2658.26	1483.82	532.94	-641.50	-24.13	1483.82	995.47
	27 DAMAS	TOTAL	425.14	278.25	3493.47	3180.83	594.13	276.65	7.92	3180.03	1437.80
		BAJA	323.32	79.45	3457.30	3260.60	559.88	357.96	10.35	3260.60	1054.20
		MEDIA	108.61	638.60	3616.03	2306.24	680.64	270.85	7.49	3206.24	348.24
		ALTA	20.21	1254.54	3410.34	1749.87	674.23	-986.24	-28.92	1749.87	35.36
	28 NARANJO	TOTAL	325.20	918.44	3484.06	3049.10	580.77	145.81	4.19	3049.10	991.55
		BAJA	113.48	51.94	3531.25	4258.30	481.80	1208.86	34.23	4258.30	483.23
		MEDIA	93.16	770.59	3510.27	3354.49	645.68	489.90	13.96	3354.49	312.49
		ALTA	118.56	1470.18	3418.29	1651.76	624.49	-1142.04	-33.41	1651.76	195.83



(1) UH	(2) Nombre de Cuenca	(3) Área de Referencia en la cuenca (km ²)	(4) Área (km ²)	(5) Elevación media TOTAL (msnm)	(6) Precipitación (mm/año)	(7) Escorrentía (mm/año)	(8) Etr (mm/año)	(9) Error (mm/ año)	(10) Error (%)	(11) Caudal (mm/ año)	(12) Volumen (hm ³ /año)
TERRABA	29 SAVEGRE	TOTAL	606.50	1287.23	3293.54	2416.32	602.81	-274.41	-8.33	2416.32	276.97
		BAJA	65.04	48.87	3584.67	4258.30	537.94	1211.58	33.80	4258.30	1000.74
		MEDIA	157.96	486.02	3516.35	3387.22	651.29	522.16	14.85	3387.22	535.05
		ALTA	383.50	1800.00	3152.38	1704.00	593.84	-854.54	-27.11	1704.00	653.48
	30 BARÚ	TOTAL	545.37	377.42	3394.22	2370.37	589.86	-433.99	-12.79	2370.37	1292.73
		BAJA	173.45	86.77	3396.82	2786.64	597.70	-12.48	-0.37	2786.64	483.34
		MEDIA	322.73	405.18	3399.52	2203.22	595.10	-601.19	-17.68	2203.22	1711.06
		ALTA	49.19	934.61	3350.23	1999.14	527.77	-823.33	-24.58	1999.14	98.33
	31 GRANDE DE TÉRRABA	TOTAL	5066.15	980.97	3238.11	2327.38	495.50	-415.21	-12.82	2327.38	11790.87
		BAJA	276.83	54.76	3773.99	2265.82	482.29	-1025.77	-27.18	2265.82	627.26
		MEDIA	2118.68	514.29	3179.92	2301.62	484.78	-393.52	-12.38	2301.62	4876.41
		ALTA	2670.64	1446.32	3229.08	2354.20	505.36	-369.52	-11.44	2354.20	6287.21
	32 RÍOS DE LA PENÍNSULA DE OSA	TOTAL	1964.27	141.18	4256.25	2297.92	560.91	-1397.44	-32.83	2297.92	4513.74
		BAJA	1324.43	62.79	4306.42	2306.53	535.06	-1464.84	-34.02	2306.53	3054.84
		MEDIA	636.33	291.65	4154.69	2280.53	614.56	-1259.60	-30.32	2280.53	1451.16
		ALTA	3.51	799.75	3796.91	2203.37	556.67	-1036.87	-27.31	2203.37	7.74
	33 ESQUINAS	TOTAL	1789.30	213.07	4391.31	2223.93	500.71	-1666.71	-37.95	2223.93	3979.29
		BAJA	1087.04	58.82	4596.07	2220.45	458.41	-1917.30	-41.72	2220.45	2413.72
		MEDIA	601.32	344.28	4154.50	2233.69	583.31	-1337.50	-32.19	2233.69	1343.17
		ALTA	100.94	1067.12	3605.76	2203.37	462.39	-939.99	-26.07	2203.37	222.41
34 CHANGUINOLA	TOTAL	253.59	2316.12	3292.02	2672.57	497.04	-122.42	-3.72	2672.57	677.74	
	BAJA	253.59	2316.12	3292.02	2672.57	497.04	-122.42	-3.72	2672.57	677.74	



NOTAS:

- Algunas cuencas no cuentan con alguna de las subregiones delimitadas por el tercio de la elevación, debido a sus características topográficas, en algunos casos muy planos, o bien no se cuentan con datos en dichas áreas.
- En el estudio no se muestran los puntos de cierre, ya que el análisis se realiza de manera global en la cuenca.
- Los valores altos de error indican la necesidad de implementar una mejor red de medición de datos.
- La información que se presentan en las columnas 1 a la 10, provienen del estudio de oferta hídrica, realizada por el grupo consultor a cargo del señor Dr. Hugo Hidalgo León.
- La columna 7 y 11, presenta los mismos valores, sin embargo, en el título de la columna 11 se indica como caudal en mm/año, esto con el objetivo de facilitar la comprensión de la información.

A continuación, se muestra un mapa de cuencas, el cual muestra la oferta hídrica en hectómetros cúbicos por año ($\text{hm}^3/\text{año}$) de menor a mayor valor, utilizando la tabla 2 y tomando como el valor total por cada una de las cuencas.

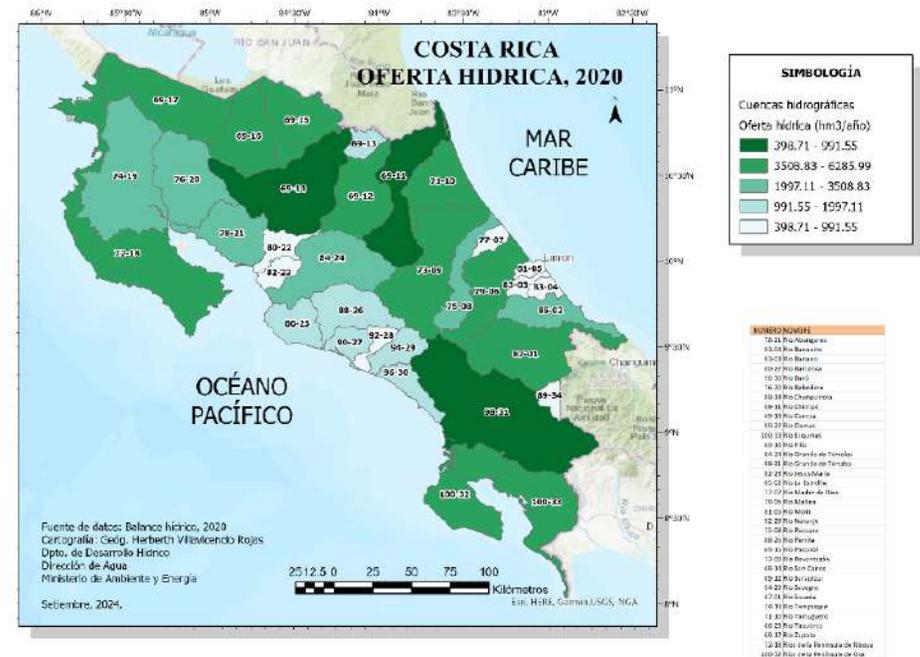


Figura 5. Mapa de Oferta Hídrica por cuenca.



7. CÁLCULO DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA

La demanda de agua es la cantidad de agua que se necesita para satisfacer las necesidades humanas y ambientales. Calcular la extracción de agua es importante para garantizar que haya suficiente agua disponible para todos los usos, tanto para las personas como para los ecosistemas.

Para las personas, la extracción de agua incluye el agua potable, el agua para la agricultura, la industria, el comercio, el turismo y la energía. Para los ecosistemas, la demanda de agua incluye el agua para los hábitats naturales, la recreación y la conservación.

El cálculo de la extracción de agua permite a los responsables de la toma de decisiones identificar las brechas entre la oferta y la extracción de agua. Esto puede ayudar a desarrollar políticas y planes para garantizar la seguridad del agua para las personas y los ecosistemas.



7.1 CÁLCULO DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA POR CUENCA

Para la determinación de la extracción de agua para las diferentes actividades y usos, se utilizó información de las extracciones del 2020, tomadas del RNC, la cual mantiene un registro de cada uno de los aprovechamientos realizados a nivel nacional del recurso hídrico superficial.

La información fue procesada a partir de los usos y las cuencas manteniendo las unidades de volumen anual en hectómetros cúbicos, esta información incluye el valor de fuerza hidráulica. Para fines del balance, los caudales de extracción asociados al uso de fuerza hidráulica se consideran como una extracción potencial, debido a que luego de generar el turbinado, el caudal regresa al cuerpo de agua original u otro. La información se presenta en la siguiente tabla 3.



Tabla 3. Extracción de agua superficial por cuenca y usos, Datos de la Dirección de Agua 2020.

Id	Número de cuenca	Nombre de la cuenca	Caudal por uso (hm ³ /año)								Total por cuenca (hm ³ /año)
				Agropecuario	Consumo humano	Comercial	Fuerza hidráulica	Industrial	Riego	Turístico	
1	78-21	Abangares	1,32	13,97	4,11	0,00	84,26	0,57	103,96	0,07	208,26
2	83-04	Bananito	0,00	0,00	0,01	0,62	0,00	0,00	0,00	0,02	0,64
3	83-03	Banano	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
4	80-22	Barranca	0,49	0,53	1,26	0,00	79,00	0,40	3,18	0,57	85,42
5	96-30	Barú	0,00	0,39	1,94	0,00	0,16	0,00	0,30	0,60	3,39
6	76-20	Bebedero	1,53	1,81	1,56	0,32	2316,48	5,75	1092,76	3,39	3423,61
7	69-11	Chirripó	0,00	5,72	12,00	0,00	432,68	1,85	8,23	0,75	461,23
8	69-13	Cureña	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
9	90-27	Damas	0,00	0,16	0,67	0,00	0,00	0,09	17,21	0,02	18,16
10	100-33	Esquinas	0,09	0,00	0,13	0,00	0,00	0,58	0,68	0,09	1,57
11	69-16	Río Frío	0,00	0,17	2,68	0,00	0,00	0,00	0,12	0,02	2,99
12	84-24	Grande de Tárcoles	15,87	2,88	63,06	0,53	7464,37	6,34	45,34	1,51	7599,90
13	98-31	Grande de Térraba	10,95	3,77	4,04	0,01	130,22	0,72	64,60	1,02	215,33
14	82-23	Jesús María	0,00	0,19	0,24	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,43
15	85-02	La Estrella	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,09	34,50	0,04	34,70
16	77-07	Madre de Dios	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,62	0,00	2,62
17	79-06	Matina	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,33
18	81-05	Moin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,48	0,00	0,00	18,48
19	92-28	Naranjo	0,00	0,00	1,22	0,00	0,00	0,00	19,97	0,00	21,19
20	75-08	Pacuare	0,00	0,12	0,43	0,05	10,67	0,53	3,66	0,04	15,49
21	88-26	Parrita	4,05	1,98	6,61	0,07	94,19	0,00	31,73	0,10	138,75
22	69-15	Pocosol	0,00	0,02	0,12	0,00	0,00	0,00	5,35	0,00	5,50
23	73-09	Reventazón	3,25	6,21	49,29	0,31	10905,91	0,88	21,74	0,47	10988,06
24	69-14	San Carlos	20,84	10,55	29,67	0,57	4465,51	1,89	23,93	7,00	4559,96
25	69-12	Sarapiquí	0,16	6,82	12,07	0,38	1582,93	0,82	2,50	0,30	1605,98
26	94-29	Savegre	0,01	0,30	0,01	0,01	0,57	0,00	19,34	0,13	20,36
27	87-01	Sixaola	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	74-19	Tempisque	38,88	7,37	0,07	0,00	0,00	3,87	321,80	3,19	375,18
29	71-10	Tortuguero	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	12,96	0,01	13,58
30	86-25	Tusubres	0,00	0,03	0,26	0,02	0,00	0,05	4,18	1,06	5,59
31	69-17	Zapote	0,00	0,59	6,15	0,22	1379,84	0,00	40,98	0,12	1427,91
32	72-18	Ríos de la Península de Nicoya	0,01	0,80	1,02	0,03	0,00	0,00	1,05	1,86	4,77
33	100-32	Ríos de la Península de Osa	0,00	0,00	0,87	0,00	0,03	0,13	0,16	2,11	3,30
34	89-34	Changuinota	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total por uso (hm ³ /año)			97,50	64,49	200,21	3,16	28946,82	43,29	1883,84	24,48	31263,79



A continuación, se muestra el mapa de extracción hídrica por cuenca, la cual muestra todos los usos registrados en el RNC de la Dirección de Agua, y gráfica de los valores de menor a mayor extracción hídrica por cada una de las cuencas.

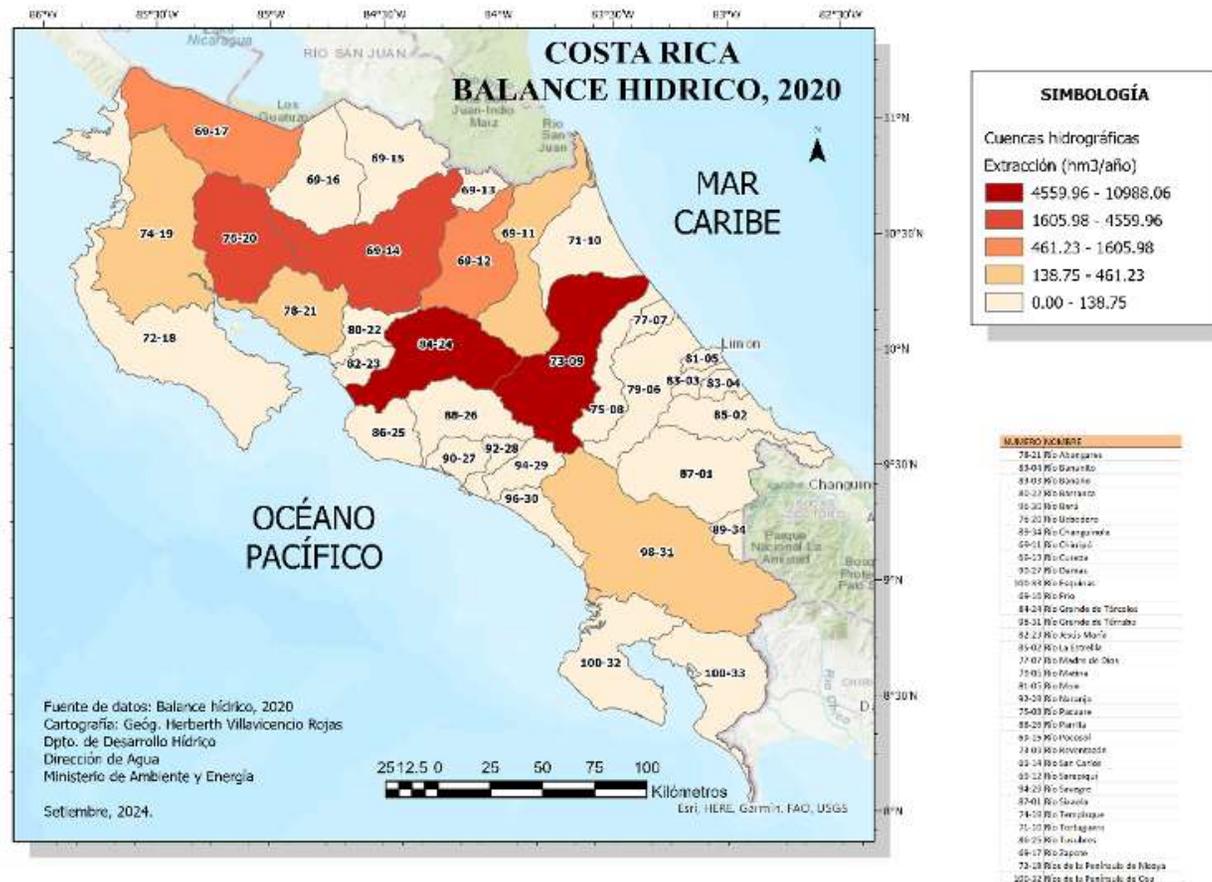


Figura 6. Mapa de extracción hídrica potencial por cuenca.



8. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico de cuencas es el cálculo de la cantidad de agua que entra y sale de una cuenca hidrográfica en un período de tiempo determinado. Se utiliza para evaluar la disponibilidad de agua en la cuenca y para identificar las fuentes de agua y las demandas de agua. El balance hídrico de cuencas se puede calcular de forma manual o mediante una aplicación informática.

En el caso del cálculo manual, se deben registrar las siguientes variables:

Oferta:

Precipitaciones, escorrentía superficial.

Extracción:

Aprovechamientos, sin considerar la extracción hídrica potencial asociada al uso fuerza hidráulica.

Para calcular el balance hídrico por cuenca se considera la diferencia entre la oferta y la extracción del recurso hídrico. El resultado puede ser positivo, negativo o neutro.



8.1 CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO POR CUENCA

El cálculo del balance hídrico se realiza haciendo una diferencia aritmética entre la oferta y la extracción, ambas expresadas en la tabla 2 y 3.

Es necesario recalcar que existe un uso el cual es de tipo no consuntivo correspondiente a la extracción de agua para el desarrollo de fuerza hidráulica, que no se considera para realizar la diferencia entre la oferta y demanda, en tanto el caudal el cual es devuelto en su mayoría a la misma fuente de agua o fuente cercana, dentro de la misma cuenca evaluada.

A continuación, se muestra la tabla 4, la cual contiene los valores de la oferta y la extracción hídrica para cada cuenca tomando en consideración todos los usos registrados excepto el de fuerza hidráulica. Además, de manera gráfica se presenta la figura 7, la cual muestra los valores del balance hídrico, por cuencas.

Tabla 4. Cálculo del Balance Hídrico, disponible global por cuenca en $\text{hm}^3/\text{año}$.

Id	Número de cuenca	Nombre de la cuenca	Oferta Hídrica ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Extracción Hídrica ($\text{hm}^3/\text{año}$)	Balace Hídrico ($\text{hm}^3/\text{año}$)
1	78-21	Abangares	2203.35	124,00	2079,35
2	83-04	Bananito	551.04	0,64	550,39
3	83-03	Banano	510.13	0,09	510,04
4	80-22	Barranca	852.79	6,43	846,36
5	96-30	Barú	1292.73	3,23	1289,50
6	76-20	Bebedero	2815.31	1107,13	1708,17
7	69-11	Chirripó	10215.44	28,55	10186,89
8	69-13	Cureña	1530.08	0,02	1530,07
9	90-27	Damas	1437.80	18,16	1419,64
10	100-33	Esquinas	3979.29	1,57	3977,73
11	69-16	Río Frío	6005.82	2,99	6002,83
12	84-24	Grande de Tárcoles	3311.37	135,52	3175,85
13	98-31	Grande de Térraba	11790.87	85,11	11705,76
14	82-23	Jesús María	630.65	1,43	629,22
15	85-02	La Estrella	2410.18	34,70	2375,48
16	77-07	Madre de Dios	675.60	2,62	672,98
17	79-06	Matina	4218.30	0,33	4217,97
18	81-05	Moín	398.71	18,48	380,23
19	92-28	Naranjo	991.55	21,19	970,37
20	75-08	Pacuare	2327.03	4,82	2322,21
21	88-26	Parrita	1997.11	44,55	1952,56
22	69-15	Pocosol	6240.59	5,50	6235,09
23	73-09	Reventazón	6285.99	82,16	6203,83
24	69-14	San Carlos	11565.39	94,45	11470,94
25	69-12	Sarapiquí	4350.92	23,05	4327,88
26	94-29	Savegre	1465.50	19,79	1445,71
27	87-01	Sixola	5675.25	0,00	5675,25
28	74-19	Tempisque	3508.83	375,18	3133,65
29	71-10	Tortuguero	4317.53	13,58	4303,95
30	86-25	Tusubres	1294.88	5,59	1289,29
31	69-17	Zapote	4812.21	48,07	4764,14
32	72-18	Ríos de la Península de Nicoya	4048.06	4,77	4043,29
33	100-32	Ríos de la Península de Osa	4513.74	3,27	4510,48
34	89-34	Changuinola	677.74	0,00	677,74

* muestran el valor de extracción en cero, debido a que no se registran aprovechamientos o usos en el RNC de la Dirección de Agua.

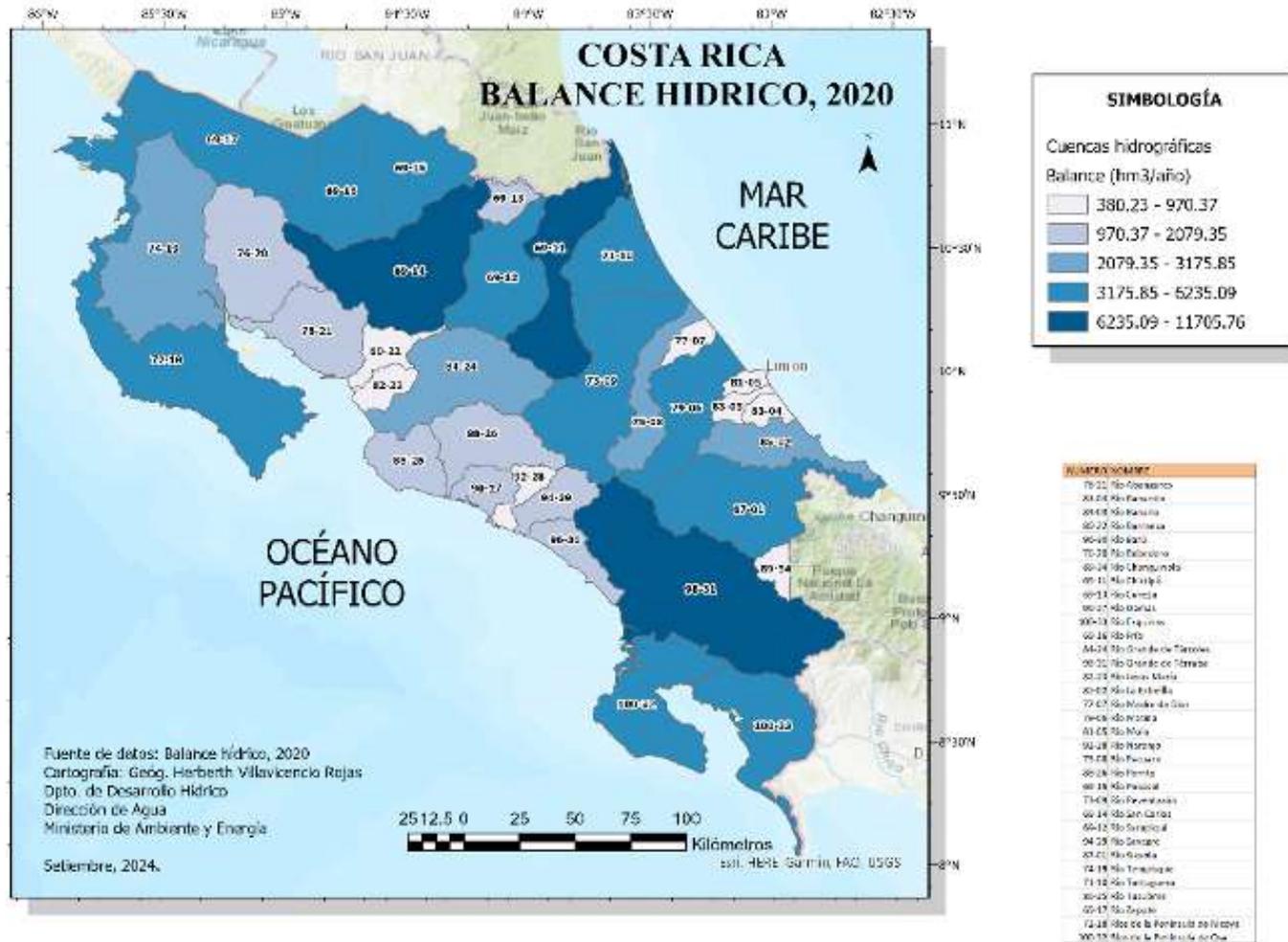


Figura 7. Mapa de balance hídrico disponible global por cuenca en hm³/año.



9. BALANCES FUTUROS CON MODELOS

Los datos de las observaciones usadas en la parte 7, fueron usados para calibrar el modelo HBV de 1990 a 2020. Las estadísticas de calibración están disponibles en la Tabla 5.

Se muestran el coeficiente de determinación (R), la eficiencia de Nash–Sutcliffe (NS) y el coeficiente de correlación de Spearman.



Tabla 5. Estadísticas de calibración de cada una de las 34 cuencas del país.

#	Cuenca	R	NS	Spearman
1	Sixaola	0.45	0.43	0.77
2	La Estrella	0.50	0.50	0.71
3	Banano	0.50	0.48	0.69
4	Bananito	0.50	0.50	0.60
5	Moin	0.43	0.42	0.57
6	Matina	0.21	0.09	0.48
7	Madre de Dios	0.15	0.14	0.14
8	Pacuare	0.35	0.22	0.61
9	Reventazón	0.53	0.41	0.77
10	Tortuguero	0.16	0.14	0.20
11	Chirripó	0.56	0.53	0.83
12	Sarapiquí	0.15	0.12	0.66
13	Cureña	0.11	0.08	0.64
14	San Carlos	0.57	0.54	0.85
15	Pocosol	0.31	0.25	0.73
16	Río Frio	0.47	0.43	0.80
17	Zapote	0.35	0.34	0.77
18	Ríos de la Península de Nicoya	0.65	0.56	0.89
19	Tempisque	0.69	0.69	0.84
20	Bebedero	0.61	0.60	0.74
21	Abangares	0.65	0.64	0.85
22	Barranca	0.67	0.65	0.90
23	Jesús María	0.69	0.68	0.89
24	Grande de Térrabes	0.72	0.63	0.88
25	Tusubres	0.51	0.48	0.84
26	Parrita	0.74	0.69	0.91
27	Damas	0.52	0.50	0.82
28	Naranjo	0.60	0.55	0.82
29	Savegre	0.68	0.67	0.86
30	Barú	0.64	0.63	0.87
31	Grande de Térraba	0.64	0.53	0.85
32	Ríos de la Península de Osa	0.49	0.34	0.82
33	Esquinas	0.35	0.21	0.73
34	Changuinola	0.37	0.37	0.74



NOTAS:

- El coeficiente de correlación es la medida específica que cuantifica la intensidad de la relación lineal entre dos variables en un análisis de correlación.
- La eficiencia de Nash–Sutcliffe NSE es utilizado como criterio para evaluar el poder reproductivo del modelo hidrológico, que consiste en la comparación de la magnitud relativa de la varianza residual (“caudal simulado”) con la variación de los datos de medición (“caudal observado”).
- El coeficiente de correlación de Spearman es una medida no paramétrica de la correlación de rango (dependencia estadística del ranking entre dos variables). Se utiliza principalmente para el análisis de datos. Mide la fuerza y la dirección de la asociación entre dos variables clasificadas.

Nótese que los primeros dos años de las simulaciones fueron eliminados para usarlos de calentamiento del modelo HBV. Los escenarios histórico, cercano, medio y futuro están entonces centrados en los años 1990, 2030, 2040 y 2050 respectivamente. Los valores de los parámetros óptimos obtenidos de la simulación de algoritmos genéticos GAP, se encuentran en el Anexo 3.

Las figuras 8 y 9 muestran la proyección diaria (series de tiempo diarias de 1979 a 2100) de precipitación (P) en mm/día y temperatura promedio del aire (T) en °C del ensamble de los tres modelos de circulación general climáticos usados.

Esto indica los valores diarios modelados de estas dos variables para todo el período desde 1979 a final de siglo. Estos datos son parte de las variables de entrada al modelo hidrológico HBV. Cada una de las figuras representa la proyección para cada una de las 34 cuencas del país.



Figura 8. Proyecciones de los ensambles de los modelos: EC_earth3, GFDL_ESM4, MPI_ESM1_2_HR de 1979–2100, para escenario SSP5–8. 5.



Figura 9. Proyecciones de los ensambles de los modelos: EC_earth3, GFDL_ESM4, MPI_ESM1_2_HR de 1979–2100, para escenario SSP5–8.5 para temperatura.



En la Tabla 6 se muestran los balances de los modelos CMIP6 para el escenario histórico, y los respectivos porcentajes de cambio para los escenarios cercano, medio y lejano. La Figura 10 describe los cambios de cada uno de esos escenarios futuros. Como se puede ver, la precipitación en la vertiente del Pacífico tiende a aumentar en el futuro, mientras que en la zona Caribe-norte y norte tiende a disminuir. La escorrentía tenderá a disminuir significativamente en Guanacaste y en la zona Caribe-norte y aumentará en el Pacífico sur. La ETr tiende a aumentar en todas las zonas del país. La recarga tiene los mismos patrones de cambio que la escorrentía. El símbolo “*” (“n”) se usa para identificar cambios (no) significativos al 95% de confianza usando un t-test.



Tabla 6. Balances de los modelos CMIP6, para el escenario histórico y los porcentajes de cambio para escenarios futuros.

SIXAOLA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Esorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3886	3225	638	3202	-39	-1.0
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.8111n	2.9713n	5.068*	3.7959n		
	MEDIO (2025-2055)	2.7755n	2.479n	7.7204*	3.2545n		
	LEJANO (2035-2065)	2.3419n	1.3809n	11.0915*	2.1243n		
LA ESTRELLA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Esorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4173	3201	956	3174	-32	-0.8
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.7714n	0.22402n	8.4918*	1.1299n		
	MEDIO (2025-2055)	1.1141n	-1.9712n	13.0431*	-1.1208n		
	LEJANO (2035-2065)	0.00037274n	-4.9629n	18.6944*	-4.1629n		
BANANO							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Esorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4378	3477	882	3449	-33	-0.8
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.3523n	0.36634n	7.2491*	1.2353n		
	MEDIO (2025-2055)	0.58911n	-1.5322n	11.085*	-0.69993n		
	LEJANO (2035-2065)	-1.1112n	-4.7626n	15.8026*	-3.9713n		



BANANITO							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	1.2283n	-1.8978n	9.0887*	-0.29803n	4	0.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	0.46822n	-4.8827n	13.9251*	-3.2789n		
	MEDIO (2025-2055)	-1.4051n	-9.252*	19.8763*	-8.1141*		
	LEJANO (2035-2065)	2.3419n	1.3809n	11.0915*	2.1243n		
MOÍN							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4277	3107	1153	3080	-29	-0.7
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.274n	-1.2635n	9.5709*	-0.33258n		
	MEDIO (2025-2055)	0.62797n	-4.0246n	14.6797*	-3.1309n		
	LEJANO (2035-2065)	-1.3745n	-8.9541*	20.9863*	-8.123*		
MATINA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4090	3350	717	3328	-32	-0.8
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.0556n	1.8786n	5.6937*	2.6449n		
	MEDIO (2025-2055)	1.7239n	0.9006n	8.6882*	1.6516n		
	LEJANO (2035-2065)	0.5985n	-1.2202n	12.4363*	-0.48226n		
MADRE DE DIOS							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4768	3535	1014	3729	3378	71.2
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.3819n	4.8486*	7.5805*	0.40504n		
	MEDIO (2025-2055)	0.8294n	4.9602*	10.8221*	-1.2247n		
	LEJANO (2035-2065)	-0.70866n	3.8327*	14.2364*	-4.0769n		



PACUARE							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4012	3258	730	3234	-34	-0.8
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.9479n	1.6261n	6.3245*	2.476n		
	MEDIO (2025-2055)	1.9093n	0.89025n	9.6795*	1.7236n		
	LEJANO (2035-2065)	0.9893n	-1.1506n	13.9538*	-0.33636n		
REVENTAZÓN							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3547	2818	704	2793	-37	-1.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.1966n	0.90326n	5.6045*	1.8734n		
	MEDIO (2025-2055)	1.4731n	0.59375n	8.5204*	1.5475n		
	LEJANO (2035-2065)	0.52757n	-1.4948n	12.2671*	-0.56757n		
TORTUGUERO							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	5030	3622	1042	3986	-366	-7.3
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	0.15152n	5.9513*	7.5227*	-1.6871n		
	MEDIO (2025-2055)	-0.84144n	6.1989*	10.8739*	-3.8579n		
	LEJANO (2035-2065)	-2.6175n	5.261*	14.5396*	-7.041*		
CHIRRIPO							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4332	3489	824	3460	-30	-0.7
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	-0.21065n	-1.3489n	6.5617*	-0.4516n		
	MEDIO (2025-2055)	-0.41127n	-2.3136n	9.9423*	-1.4377n		
	LEJANO (2035-2065)	-1.9822n	-5.2439n	14.2628*	-4.4014n		



SARAPIQUÍ							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	5223	4267	951	4248	-1	0.0
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	-1.5096n	-3.1263n	6.4932*	-2.6793n		
	MEDIO (2025-2055)	-2.8034n	-5.3853*	9.2867*	-4.9328n		
	LEJANO (2035-2065)	-4.6916n	-8.3778*	12.4018*	-7.9328*		
CUREÑA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4656	4173	490	4160	14	0.3
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	-2.2889n	-2.9298n	1.4332n	-2.592n		
	MEDIO (2025-2055)	-3.4844n	-4.446n	2.867n	-4.0942n		
	LEJANO (2035-2065)	-5.4201*	-6.7836*	4.0939*	-6.4049*		
SAN CARLOS							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3848	3454	390	3438	-2	-0.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	-0.27594n	-0.71786n	3.7794*	-0.20309n		
	MEDIO (2025-2055)	0.41739n	-0.18727n	5.9933*	0.31303n		
	LEJANO (2035-2065)	-1.3749n	-2.2976n	7.0621*	-1.8093n		
POCOSOL							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4116	3668	470	3657	29	0.7
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	-2.7825n	-3.6093n	-0.82806n	-3.3123n		
	MEDIO (2025-2055)	-3.799n	-4.9337*	0.78757n	-4.6257*		
	LEJANO (2035-2065)	-5.9085*	-7.4583*	1.8529n	-7.1399*		



RÍO FRÍO							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3622	3237	382	3220	-2	0.0
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	-2.0557n	-2.6339n	2.9355*	-2.0945n		
	MEDIO (2025-2055)	-2.2124n	-3.0241n	4.8769*	-2.5008n		
	LEJANO (2035-2065)	-4.0397n	-5.1714*	5.6616*	-4.6476n		
ZAPOTE							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3549	2491	1042	2477	-11	-0.3
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	-0.49324n	-3.6355n	8.6406*	-3.037n		
	MEDIO (2025-2055)	0.11533n	-4.2145n	12.6414*	-3.641n		
	LEJANO (2035-2065)	-1.411n	-8.2621*	16.2463*	-7.61*		
RÍOS DE LA PENÍNSULA DE NICOYA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2970	1767	1176	1751	-33	-1.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.6946n	-2.7922n	11.3153*	-1.94n		
	MEDIO (2025-2055)	2.6297n	-4.583n	17.0417*	-3.8003n		
	LEJANO (2035-2065)	1.3356n	-12.1678*	24.9502*	-11.4459*		
TEMPISQUE							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2365	1255	1105	1245	-3	-0.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	3.019n	-2.8967n	10.1494*	-2.1023n		
	MEDIO (2025-2055)	4.7119n	-4.0041n	15.0384*	-3.2174n		
	LEJANO (2035-2065)	3.4891n	-11.1306*	20.5515*	-10.4271n		



BEBEDERO							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2300	1460	831	1455	-5	-0.2
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.1972n	-0.37739n	7.742*	-0.018957n		
	MEDIO (2025-2055)	4.925n	1.4786n	12.0055*	1.8689n		
	LEJANO (2035-2065)	4.665n	-1.1524n	15.9332*	-0.77754n		
ABANGARES							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2805	1779	1020	1769	-4	-0.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	3.1459n	-0.14631n	9.5068*	0.41985n		
	MEDIO (2025-2055)	6.1615*	1.8536n	14.2425*	2.4491n		
	LEJANO (2035-2065)	6.0195*	-1.7713n	20.26*	-1.1915n		
BARRANCA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2947	2126	814	2115	-5	-0.2
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.3099n	0.51798n	7.7439*	1.0345n		
	MEDIO (2025-2055)	4.8029n	2.4075n	11.6748*	2.9653n		
	LEJANO (2035-2065)	4.2369n	-0.41281n	17.1124*	0.12799n		
JESÚS MARÍA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2698	1757	937	1746	-2	-0.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.5855n	-0.18053n	8.1206*	0.4458n		
	MEDIO (2025-2055)	5.4029*	1.8547n	12.3236*	2.5057n		
	LEJANO (2035-2065)	4.9347n	-1.1355n	16.6183*	-0.49816n		



GRANDE DE TÁRCOLES							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2681	1926	734	1913	-28	-1.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.0637n	0.1968ln	6.053*	0.90658n		
	MEDIO (2025-2055)	2.9635n	1.6316n	9.112*	2.3888n		
	LEJANO (2035-2065)	2.1436n	-0.97429n	13.2601*	-0.27755n		
TUSUBRES							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3434	2303	1107	2278	-32	-0.9
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.022n	-1.0126n	10.8264*	0.1308n		
	MEDIO (2025-2055)	5.9174n	2.132n	16.3898*	3.311n		
	LEJANO (2035-2065)	4.8248n	-3.1761n	24.2392*	-2.0459n		
PARRITA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	2975	2278	691	2263	-9	-0.3
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	1.8963n	1.0594n	5.4377*	1.7568n		
	MEDIO (2025-2055)	4.7416n	3.8888n	8.1681*	4.6224n		
	LEJANO (2035-2065)	3.893n	1.6647n	11.898*	2.382n		
DAMAS							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4150	3590	569	3575	17	0.4
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.5812n	2.0204n	4.1558*	2.4875n		
	MEDIO (2025-2055)	6.69*	6.145n	8.166*	6.608*		
	LEJANO (2035-2065)	5.823n	4.7869n	10.5471*	5.2424n		



NARANJO							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3842	3086	753	3069	-1	0.0
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.3312n	1.4554n	5.9212*	2.0416n		
	MEDIO (2025-2055)	5.695*	4.9258n	8.9016*	5.5178n		
	LEJANO (2035-2065)	4.9466n	3.0068n	12.9745*	3.5845n		
SAVEGRE							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3495	2869	623	2855	-2	-0.1
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	2.2218n	1.578n	5.2629*	2.1395n		
	MEDIO (2025-2055)	5.1702*	4.6001n	7.9396*	5.1614n		
	LEJANO (2035-2065)	4.6176n	3.141n	11.6079*	3.6865n		
BARÚ							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3778	2812	963	2796	-2	0.0
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	3.7297n	2.2749n	7.9578*	2.9457n		
	MEDIO (2025-2055)	7.6368*	6.1574n	12.0499*	6.8172n		
	LEJANO (2035-2065)	7.4757*	4.0372n	17.6968*	4.6695n		
GRANDE DE TERRABA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3317	2597	717	2589	-1	0.0
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	3.2598n	2.6972n	5.2424*	3.0395n		
	MEDIO (2025-2055)	5.8223*	5.2659n	7.9078*	5.593n		
	LEJANO (2035-2065)	5.8218*	4.278n	11.5263*	4.5902n		



RÍOS DE LA PENÍNSULA DE OSA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4503	3326	1158	3300	-28	-0.6
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	4.5765n	3.2451n	10.0853*	4.1497n		
	MEDIO (2025-2055)	8.3935*	6.5966*	15.3735*	7.4706*		
	LEJANO (2035-2065)	8.9753*	4.8818n	22.7984*	5.7451n		
ESQUINAS							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	4703	3612	1072	3588	-31	-0.7
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	3.4724n	2.2888n	9.465*	3.0392n		
	MEDIO (2025-2055)	6.7086*	5.0125n	14.3998*	5.753n		
	LEJANO (2035-2065)	6.7457*	3.0077n	21.4495*	3.7563n		
CHANGUINOLA							
Escenarios		Precipitación (mm/año)	Escorrentía (mm/año)	ETr (mm/año)	Recarga (mm/año)	Error (mm/año)	Error (%)
Histórico	(1986-2014)	3531	3074	455	3074	-1	0.0
% de cambio escenarios futuros:	CERCANO (2015-2045)	3.167n	3.1413n	2.687*	3.2018n		
	MEDIO (2025-2055)	3.8545n	3.7971n	3.9955*	3.8067n		
	LEJANO (2035-2065)	3.6137n	3.2997n	5.646*	3.2896n		
*: cambio significativo al 95% de confianza							
n: cambio NO significativo al 95% de confianza							



A modo de resumen y con la intención de facilitar la comprensión de los datos anteriores se presenta en la tabla 7, la cual muestra la información desde las unidades hidrológicas.

Tabla 7. Resumen de los balances hídricos por Unidad Hidrológica.

Unidad Hidrológica	Área total (km ²)	Elevación Media (msnm)	Precipitación Media (mm/año)	Q medio (mm/año)	ETr medio (mm/año)	error medio (mm/año)	error medio (%)
Caribe	13713.4	598.5	3782	2633	760	-389	-10.1
San Juan	10292.0	185.5	3240	3076	551	388	10.1
Tempisque	10976.9	254.8	2318	1243	811	-264	-11.0
Tárcoles	5898.4	658.4	2904	2049	533	-323	-12.4
Térraba	10225.2	889.9	3642	2384	545	-713	-17.9
Total país	51105.8	517.4	3177	2277	640	-260	-8.3
Recursos hídricos renovables: 116.364 km ³							
Población al 2020: 5 094 000 habitantes							
Recurso hídrico por habitante: 22843.3 m ³ /habitante/año							

Se muestran los cambios anuales en precipitación (P), escorrentía (Q), evapotranspiración actual (ETr) y recarga (R) para cuatro escenarios: histórico (1987–2014), futuro cercano (2015–2045), futuro mediano plazo (2025–2055) y futuro lejano (2035–2065) comparado con el escenario histórico (1986–2014).

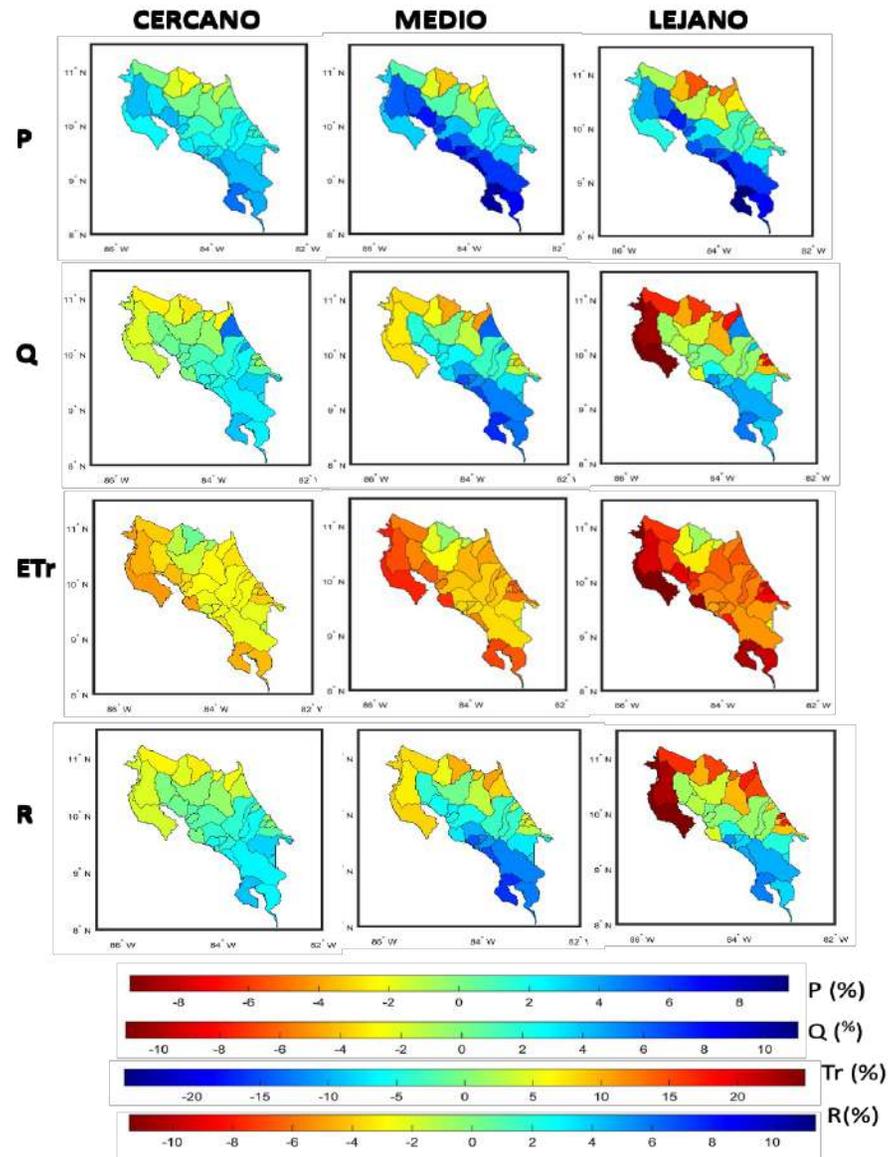


Figura 10. Cambios (%) de los escenarios futuros con respecto al escenario histórico de diferentes variables del balance de aguas.



10. CONCLUSIONES GENERALES

En relación con el balance hídrico, se concluye que, en todas las cuencas del país, la oferta hídrica es superior a la extracción.

Aquellas cuencas que en la Tabla 2 muestran los mayores errores porcentuales de cierre, deben ser prioritarias para la instrumentación hidrológica y meteorológica. Además, para todo el país es necesario crear una red de estaciones meteorológicas automáticas que recolectan información (al menos diaria) de los parámetros necesarios para calcular la evapotranspiración por medio de la ecuación de Penman (ver un ejemplo de estas redes en otras partes del mundo en: <https://cimis.water.ca.gov>; Hidalgo et al. 2005). Es notable la falta de cobertura espacial y temporal en el país de radiación neta, humedad relativa y velocidad del viento a nivel de estaciones meteorológicas; parámetros indispensables para el cálculo de la evapotranspiración por métodos de Penman Monteith.



Las variables hidrológicas (caudal) son las que muestran menor cobertura espacial y temporal en el país. Hace falta un esfuerzo para crear una red con mayor cobertura espacial y temporal hidrológica y disponible para estudios hidroclimáticos.

En cuanto a las proyecciones de este escenario y estos modelos, es evidente que, aunque la vertiente Pacífica muestra aumentos en el futuro, el aumento en la evapotranspiración producto del calentamiento, sobrepasa cualquier aumento en los caudales, y más bien, se esperan reducciones en la disponibilidad de agua superficial y subterránea en Guanacaste, precisamente la región más árida del país. Otra región que puede verse afectada con reducciones en los caudales y en la recarga es la zona norte. Por otra parte, la zona de la Península de Osa experimentará aumentos en la escorrentía, y al ser una zona muy húmeda podría traer repercusiones con relación a las inundaciones.



11. REFERENCIAS

- Almazroui, M., Islam, M.N., Saeed, F. et al. Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Syst Environ* 5, 1–24 (2021). <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>
- Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI RHO 7. Norrköping. 134 pp.
- de Sousa Lima, J.R., Antonino, A.C.D., de Souza, E.S., Hammecker, C., Montenegro, S.M.G.L. and de Oliveira Lira, C.A.B. (2013) Calibration of Hargreaves–Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Sub-Humid Region of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 1–5. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.512A001>



- Duffie J.A. y W.A. Beckman (1980) *Solar Energy of Thermal Processes*, Wiley, New York, pp. 1-109.
- Fick, S.E. y R.J. Hijmans (2017) WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.
- Hargreaves G.H. (1975) Moisture Availability and Crop Production, *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* Vol 18, no 5, pp. 1980-984.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985) Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1, 96-99.
- Maidment D.R, (1993) *Handbook of hydrology*. McGraw- Hill, Inc. 1424 pp.
- Monteith, J.L. (1965) Evaporation and the Environment. *Symp. Soc. Expl. Biol.* Vol 19. Pp. 205-234.
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., and Ramirez-Villegas, J. (2020) High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Sci Data* 7, 7, doi:10.1038/s41597-019-0343-8
- Oudin, L., Moulin, L., Bendjoudi, H. & Ribstein, P. (2010) Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. *Hydrol. Sci. J.* 55(2), 209-222.
- Quesada-Hernández, L.E. (2019) *Respuesta de la hidrología superficial de la cuenca del río Tempisque a la variabilidad climática y cambio de cobertura de la tierra*. Tesis de Maestría. Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica. 97 pp.



Quesada–Montano B., I. K. Westerberg, D. Fuentes–Andino, H. G. Hidalgo, S. Halldin. (2018). Can climate variability information constrain a hydrological model for an ungauged Costa Rican catchment? *Hydrological Process.* 2018; 1–7.

Shahidian, S., Serralheiro, R., Serrano, J., Teixeira, J., Haie, N., & Santos, F. (2012). Hargreaves and Other Reduced–Set Methods for Calculating Evapotranspiration. In *Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling*. InTech. <https://doi.org/10.5772/18059>

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review.* 38 (1): 55–94. doi:10.2307/210739. JSTOR 210739.

UNESCO (2007) *Balance hídrico superficial de Costa Rica*. Período: 1970–2002. Documentos Técnicos del PHI–LAC, N°10, 55pp.

Westerberg I. y C. Birkel (2015) Observational uncertainties in hypothesis testing: investigating the hydrological functioning of a tropical catchment. *Hydrological Processes.* 29, 4863–4879.

Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed.). Academic Press.

12. ANEXOS



Anexo 1. Estadísticos relacionados con la generación de caudales específicos históricos

Tabla A1. Estadísticas de verificación de caudales en 34 cuencas del país.

Estación: Sixaola				Estación: La Estrella			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
1	0.00	0.00	0	2	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	6.80	6.62		Promedio	7.21	6.20	
Std	1.18	1.18		Std	1.74	1.63	
C.V.	0.17	0.18		C.V.	0.24	0.26	
Kurtosis	2.27	2.97		Kurtosis	2.34	2.73	
Skewness	-0.26	-0.49		Skewness	-0.33	-0.12	
mediana	6.97	7.02		mediana	7.50	6.17	
IQR	1.58	1.48		IQR	2.56	2.00	
rho1	0.32	0.19		rho1	0.18	0.01	
Estación: Banano				Estación: Bananito			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
3	0.00	0.00	0	4	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	7.20	6.24		Promedio	7.21	6.14	
Std	1.70	1.59		Std	1.80	1.69	
C.V.	0.24	0.25		C.V.	0.25	0.28	
Kurtosis	2.30	2.69		Kurtosis	2.41	2.79	
Skewness	-0.31	-0.18		Skewness	-0.35	-0.03	
mediana	7.45	6.20		mediana	7.57	6.12	
IQR	2.52	1.97		IQR	2.62	2.04	
rho1	0.18	0.02		rho1	0.17	0.00	
Estación: Moín				Estación: Matina			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
5	0.00	0.00	0	6	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	7.21	6.14		Promedio	7.08	7.23	
Std	1.80	1.69		Std	0.97	1.09	
C.V.	0.25	0.28		C.V.	0.14	0.15	
Kurtosis	2.41	2.79		Kurtosis	2.20	1.82	
Skewness	-0.35	-0.03		Skewness	0.32	-0.06	
mediana	7.57	6.12		mediana	6.79	7.17	
IQR	2.62	2.04		IQR	1.55	1.72	
rho1	0.17	0.00		rho1	0.18	0.23	



Estación: Madre de Dios				Estación: Pacuare			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
7	0.00	0.00	0	8	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	7.39	7.11		Promedio	7.04	6.96	
Std	1.07	1.09		Std	0.90	1.07	
C.V.	0.14	0.15		C.V.	0.13	0.15	
Kurtosis	2.07	2.02		Kurtosis	2.64	2.00	
Skewness	0.44	-0.06		Skewness	0.49	-0.17	
mediana	7.26	7.20		mediana	6.89	6.98	
IQR	1.71	1.73		IQR	1.39	1.75	
rho1	0.55	0.14		rho1	0.31	0.20	
Estación: Reventazón				Estación: Tortuguero			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
9	0.00	0.00	0	10	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	6.29	5.92		Promedio	8.16	7.88	
Std	0.87	0.97		Std	1.27	1.28	
C.V.	0.14	0.16		C.V.	0.16	0.16	
Kurtosis	2.26	2.11		Kurtosis	1.60	1.89	
Skewness	0.44	0.04		Skewness	0.14	-0.08	
mediana	6.19	5.90		mediana	8.06	8.15	
IQR	1.58	1.52		IQR	2.19	2.04	
rho1	0.48	0.15		rho1	0.64	0.43	
Estación: Chirripó				Estación: Sarapiquí			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
11	0.00	0.00	0	12	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	10.25	9.89		Promedio	11.76	11.48	
Std	1.93	1.75		Std	2.51	3.38	
C.V.	0.19	0.18		C.V.	0.21	0.29	
Kurtosis	1.19	3.25		Kurtosis	1.42	8.72	
Skewness	-0.21	0.28		Skewness	-0.06	2.07	
mediana	10.91	10.13		mediana	12.50	10.80	
IQR	3.60	1.98		IQR	4.48	2.29	
rho1	0.74	0.62		rho1	0.65	0.52	



Estación: Cureña				Estación: San Carlos			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
13	0.00	0.00	0	14	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	11.76	11.48		Promedio	10.50	9.67	
Std	2.51	3.38		Std	1.86	1.89	
C.V.	0.21	0.29		C.V.	0.18	0.20	
Kurtosis	1.42	8.72		Kurtosis	1.71	2.99	
Skewness	-0.06	2.07		Skewness	0.04	0.40	
mediana	12.51	10.80		mediana	10.91	9.81	
IQR	4.49	2.29		IQR	3.34	2.46	
rho1	0.65	0.52		rho1	0.63	0.65	
Estación: Pocosol				Estación: Río Frío			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
15	0.00	0.00	0	16	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	10.51	10.24		Promedio	9.96	9.47	
Std	1.88	1.66		Std	1.72	1.33	
C.V.	0.18	0.16		C.V.	0.17	0.14	
Kurtosis	2.19	3.66		Kurtosis	2.45	1.89	
Skewness	0.47	0.61		Skewness	0.72	0.12	
mediana	10.43	10.13		mediana	9.31	9.16	
IQR	2.88	2.14		IQR	2.76	2.22	
rho1	0.54	0.45		rho1	0.30	0.32	
Estación: Zapote				Estación: Ríos de la Península de Nicoya			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
17	0.00	0.00	0	18	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	5.20	5.51		Promedio	2.51	2.70	
Std	0.96	1.30		Std	1.02	1.09	
C.V.	0.18	0.24		C.V.	0.41	0.40	
Kurtosis	2.18	2.68		Kurtosis	2.56	1.84	
Skewness	0.27	0.72		Skewness	0.73	0.73	
mediana	5.16	5.14		mediana	2.28	2.09	
IQR	1.83	2.11		IQR	1.57	1.88	
rho1	0.59	0.19		rho1	0.18	0.13	



Estación: Tempisque				Estación: Bebedero			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
19	0.00	0.00	0	20	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	2.62	3.05		Promedio	3.85	3.58	
Std	1.13	1.32		Std	0.79	1.09	
C.V.	0.43	0.43		C.V.	0.20	0.30	
Kurtosis	3.11	1.51		Kurtosis	1.76	3.21	
Skewness	0.98	0.59		Skewness	-0.07	1.02	
mediana	2.22	2.18		mediana	4.04	3.06	
IQR	1.69	2.50		IQR	1.35	1.69	
rho1	0.24	0.11		rho1	0.46	0.34	
Estación: Abangares				Estación: Barranca			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
21	0.00	0.00	0	22	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	4.63	4.19		Promedio	4.77	4.90	
Std	0.91	1.17		Std	1.03	1.26	
C.V.	0.20	0.28		C.V.	0.22	0.26	
Kurtosis	2.10	2.69		Kurtosis	1.61	1.72	
Skewness	0.01	0.71		Skewness	0.31	0.52	
mediana	4.81	4.12		mediana	4.35	4.41	
IQR	1.28	1.70		IQR	1.87	2.28	
rho1	0.32	0.46		rho1	0.15	0.00	
Estación: Jesús María				Estación: Grande de Tárcoles			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
23	0.00	0.00	0	24	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	4.47	4.66		Promedio	4.26	4.10	
Std	1.02	1.24		Std	0.86	1.02	
C.V.	0.23	0.27		C.V.	0.20	0.25	
Kurtosis	1.58	1.64		Kurtosis	1.80	2.28	
Skewness	0.39	0.49		Skewness	0.28	0.65	
mediana	4.04	4.14		mediana	4.09	3.85	
IQR	1.90	2.35		IQR	1.46	1.63	
rho1	0.12	-0.03		rho1	0.35	0.10	



Estación: Tusubres				Estación: Parrita			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
25	0.00	0.00	0	26	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	4.06	4.55		Promedio	4.12	4.45	
Std	1.33	1.63		Std	1.03	1.41	
C.V.	0.33	0.36		C.V.	0.25	0.32	
Kurtosis	3.14	1.82		Kurtosis	2.58	2.10	
Skewness	1.14	0.40		Skewness	0.80	0.64	
mediana	3.48	4.09		mediana	3.78	3.98	
IQR	1.90	2.82		IQR	1.71	2.43	
rho1	0.15	-0.09		rho1	0.12	-0.06	
Estación: Damas				Estación: Naranja			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
27	0.00	0.00	0	28	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	8.44	8.95		Promedio	8.18	8.48	
Std	1.90	1.78		Std	1.72	1.58	
C.V.	0.23	0.20		C.V.	0.21	0.19	
Kurtosis	5.33	2.34		Kurtosis	5.01	2.41	
Skewness	1.32	0.18		Skewness	1.21	0.43	
mediana	7.80	8.57		mediana	7.56	8.18	
IQR	2.21	2.44		IQR	2.23	2.35	
rho1	-0.06	-0.14		rho1	-0.09	-0.03	
Estación: Savegre				Estación: Barú			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
29	0.00	0.00	0	30	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	6.60	6.60		Promedio	6.42	6.50	
Std	1.43	2.04		Std	1.34	1.86	
C.V.	0.22	0.31		C.V.	0.21	0.29	
Kurtosis	4.23	2.56		Kurtosis	3.04	2.38	
Skewness	1.06	0.64		Skewness	0.74	0.50	
mediana	6.28	5.89		mediana	6.11	6.17	
IQR	2.11	3.07		IQR	2.13	2.55	
rho1	-0.01	0.17		rho1	0.00	-0.09	



Estación: Grande de Térraba				Estación: Ríos de la Península de Osa			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
31	0.00	0.00	0	32	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	5.95	6.79		Promedio	6.17	6.38	
Std	1.22	1.66		Std	1.38	1.70	
C.V.	0.20	0.24		C.V.	0.22	0.27	
Kurtosis	2.02	1.96		Kurtosis	1.97	2.30	
Skewness	0.25	0.32		Skewness	0.23	0.55	
mediana	5.79	6.34		mediana	5.95	5.98	
IQR	1.97	2.44		IQR	2.35	2.59	
rho1	-0.04	-0.13		rho1	0.02	-0.12	
Estación: Esquinas				Estación: Changuinola			
#	KS	MW	ST	#	KS	MW	ST
33	0.00	0.00	0	34	0.00	0.00	0
Estadístico	primera mitad	segunda mitad		Estadístico	primera mitad	segunda mitad	
Promedio	5.53	6.65		Promedio	6.77	7.86	
Std	1.25	1.74		Std	1.45	2.09	
C.V.	0.23	0.26		C.V.	0.21	0.27	
Kurtosis	2.57	1.43		Kurtosis	2.08	1.84	
Skewness	0.47	0.09		Skewness	0.39	0.35	
mediana	5.31	6.50		mediana	6.58	7.62	
IQR	1.73	3.05		IQR	2.48	3.42	
rho1	-0.02	-0.12		rho1	-0.18	0.03	



Anexo 2. Información relacionada con los traslados de los caudales entre cuencas

Tabla A2. Información relacionada con los traslados de caudales.

Rellenando caudal, estación: 1428, AGUA GATA	
Rellenado escala temporal con estaciones:	
Arenal Nuevo	
El Cairo	
Jabillos	
Peñas Blancas	
Pocosol	
Río Chiquito	
$Ax*Px=32418111.2469$ m3	
$Ab*Pb=32418111.2469$ m3	
Rellenando caudal, estación: 2411, ALUMBRE	
Rellenado escala temporal con estaciones:	
Balsa	
Echeverria	
La Garita Arriba	
Nuestro Amo	
Santo Domingo	
$Ax*Px=15513743.8973$ m3	
$Ab*Pb=15513743.8973$ m3	
Rellenando caudal, estación: 903, ANGOSTURA	
Rellenando caudal, estación: 2428, ANONOS (PLANTEL C.N.F. L)	
Rellenado escala temporal con estaciones:	
Balsa	
Echeverria	
La Garita Arriba	
Nuestro Amo	
Santo Domingo	
$Ax*Px=15513743.8973$ m3	



Ab*Pb=15513743.8973 m3
Rellenando caudal, estación: 1417, ARENAL NUEVO
Rellenando caudal, estación: 805, BAJO HUACAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Pacuare
Ax*Px=9303710.7704 m3
Ab*Pb=9303710.7704 m3
Rellenando caudal, estación: 1225, BAJOS DE CHILAMATE
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro
Veracruz
Ax*Px=31876366.84 m3
Ab*Pb=31876366.84 m3
Rellenando caudal, estación: 2406, BALSA
Rellenando caudal, estación: 602, BARBILLA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Guatuso
Santa Lucía
Ax*Px=16150011.8935 m3
Ab*Pb=15665461.4365 m3
Rellenando caudal, estación: 908, Belén
Rellenando caudal, estación: 1103, Bellavista
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro
Veracruz
Ax*Px=31876366.84 m3
Ab*Pb=31876366.84 m3



Rellenando caudal, estación: 2603, Bijagual

Rellenando caudal, estación: 3112, Cabagra

Rellenando caudal, estación: 3107, Caracucho

Rellenando caudal, estación: 2008, CASA DE MÁQUINAS ARENAL

Rellenando caudal, estación: 2905, CASA DE MÁQUINAS BRU

Rellenado escala temporal con estaciones:

Providencia

$Ax*Px=5468830.8523$ m3

$Ab*Pb=5468830.8523$ m3

Rellenando caudal, estación: 956, COLA EMBALSE ANGOSTURA

Rellenado escala temporal con estaciones:

Angostura

Belén

El Congo

El Humo

Murcia

Oriente

Palomo

Pascua

Puente Negro

s. presa Guayabo

Tapantí arriba

TOMA MONTECRISTO

$Ax*Px=26919745.0803$ m3

$Ab*Pb=26919745.0803$ m3

Rellenando caudal, estación: 1431, COLA EMBALSE PEÑAS B

Rellenado escala temporal con estaciones:

Arenal Nuevo

El Cairo

Jabillos

Peñas Blancas

Pocosol

Río Chiquito



Ax*Px=32418111.2469 m3
Ab*Pb=32418111.2469 m3
Rellenando caudal, estación: 2612, COLA EMBALSE PIRRIS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Bijagual
Dota
El Rey
Ax*Px=9537841.9542 m3
Ab*Pb=9537841.9542 m3
Rellenando caudal, estación: 964, COLA EMBALSE REVENTAZÓN
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén
El Congo
El Humo
Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
TOMA MONTECRISTO
Ax*Px=26919745.0803 m3
Ab*Pb=26919745.0803 m3
Rellenando caudal, estación: 2001, COROBICÍ
Rellenando caudal, estación: 1906, COYOLAR
Rellenando caudal, estación: 1104, DELTA COLORADO
Rellenado escala temporal con estaciones:
Casa de máquinas Are
Corobici
Rancho Rey



Tilarán
$Ax*Px=13108251.2474 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=12353831.8973 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2907, DIVISIÓN
Rellenado escala temporal con estaciones:
Providencia
$Ax*Px=5468830.8523 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=5468830.8523 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 803, DOS MONTAÑAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Pacuare
$Ax*Px=9303710.7704 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=9303710.7704 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2602, Dota
Rellenando caudal, estación: 2429, Echeverría
Rellenando caudal, estación: 3103, El Brujo
Rellenando caudal, estación: 1412, El Cairo
Rellenando caudal, estación: 3120, El Ceibo
Rellenado escala temporal con estaciones:
Cabagra
Caracucho
El Brujo
La Cuesta
Las Juntas
Palmar
Remolino
Rivas
$Ax*Px=44924819.4102 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=44924819.4102 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 910, El Congo
Rellenando caudal, estación: 904, El Humo
Rellenando caudal, estación: 2601, El Rey



Rellenando caudal, estación: 2606, El Salado

Rellenado escala temporal con estaciones:

Bijagual

Dota

El Rey

$Ax*Px=9537841.9542 \text{ m}^3$

$Ab*Pb=9537841.9542 \text{ m}^3$

Rellenando caudal, estación: 1907, EL SALTO

Rellenado escala temporal con estaciones:

Coyolar

Guardia

$Ax*Px=18912230.4086 \text{ m}^3$

$Ab*Pb=18912230.4086 \text{ m}^3$

Rellenando caudal, estación: 1220, Fátima

Rellenado escala temporal con estaciones:

Quebrada sin nombre

Río Desagüe

Río Segundo

Toro

Veracruz

$Ax*Px=31876366.84 \text{ m}^3$

$Ab*Pb=31876366.84 \text{ m}^3$

Rellenando caudal, estación: 2202, GUAPINOL

Rellenado escala temporal con estaciones:

LONDRES

$Ax*Px=3500120.0621 \text{ m}^3$

$Ab*Pb=3101923.8602 \text{ m}^3$

Rellenando caudal, estación: 1901, GUARDIA

Rellenando caudal, estación: 1602, GUATUSO

Rellenando caudal, estación: 939, HAMBURGO

Rellenado escala temporal con estaciones:

Angostura



Belén
El Congo
El Humo
Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
TOMA MONTECRISTO
$Ax*Px=26919745.0803 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=26919745.0803 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1208, HDA DOÑA TERESA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada Sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro
Veracruz
$Ax*Px=31876366.84 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=31876366.84 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1402, JABILLOS
Rellenando caudal, estación: 1418, LA ARGENTINA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Arenal Nuevo
El Cairo
Jabillos
Peñas Blancas
Pocosol
Río Chiquito
$Ax*Px=32418111.2469 \text{ m}^3$



Ab*Pb=32418111.2469 m3
Rellenando caudal, estación: 2426, LA CAJA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Balsa
Echeverría
La Garita arriba
Nuestro Amo
Santo Domingo
Ax*Px=15513743.8973 m3
Ab*Pb=15513743.8973 m3
Rellenando caudal, estación: 3109, LA CUESTA
Rellenando caudal, estación: 937, LA ESPERANZA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén
El Congo
El Humo
Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
Toma Montecristo
Ax*Px=26919745.0803 m3
Ab*Pb=26919745.0803 m3
Rellenando caudal, estación: 2422, LA GARITA ARRIBA
Rellenando caudal, estación: 924, LA TROYA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén



El Congo
El Humo
Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
Toma Montecristo
Ax*Px=26919745.0803 m3
Ab*Pb=26919745.0803 m3
Rellenando caudal, estación: 3105, LAS JUNTAS
Rellenando caudal, estación: 936, LAS PALMAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén
El Congo
El Humo
Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
Toma Montecristo
Ax*Px=26919745.0803 m3
Ab*Pb=26919745.0803 m3
Rellenando caudal, estación: 2423, LAS VUELTAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Balsa



Echeverria
La Garita arriba
Nuestro Amo
Santo Domingo
$Ax*Px=15513743.8973 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=15513743.8973 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2101, LIMONAL VIEJO
Rellenado escala temporal con estaciones:
PACUARE
$Ax*Px=9316744.7066 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=9303710.7704 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2801, LONDRES
Rellenando caudal, estación: 2802, LOS LLANOS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Londres
$Ax*Px=3101923.8602 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=3101923.8602 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2010, MAGDALENA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Casa de máquinas Are
Corobici
Rancho Rey
Tilarán
$Ax*Px=12353831.8973 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=12353831.8973 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1223, MARIA AGUILAR
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro



Veracruz
$Ax*Px=31876366.84 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=31876366.84 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 946, MURCIA
Rellenando caudal, estación: 2201, NAGATAC
Rellenado escala temporal con estaciones:
Londres
$Ax*Px=3500120.0621 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=3101923.8602 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2424, NUESTRO AMO
Rellenando caudal, estación: 1238, NUEVA TORO
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro
Veracruz
$Ax*Px=31876366.84 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=31876366.84 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 909, ORIENTE
Rellenando caudal, estación: 3113, P.H. CEIBO
Rellenado escala temporal con estaciones:
Cabagra
Caracucho
El Brujo
La Cuesta
Las Juntas
Palmar
Remolino
Rivas
$Ax*Px=44924819.4102 \text{ m}^3$



Ab*Pb=44924819.4102 m3
Rellenando caudal, estación: 801, Pacuare
Rellenando caudal, estación: 3101, Palmar
Rellenando caudal, estación: 919, Palomo
Rellenando caudal, estación: 202, Pandora
Rellenando caudal, estación: 912, Pascua
Rellenando caudal, estación: 2014, Paso Hondo
Rellenado escala temporal con estaciones:
Casa de máquinas Are
Corobicí
Rancho Rey
Tilarán
Ax*Px=12353831.8973 m3
Ab*Pb=12353831.8973 m3
Rellenando caudal, estación: 3110, PEJIBAYE
Rellenado escala temporal con estaciones:
Cabagra
Caracucho
El Brujo
La Cuesta
Las Juntas
Palmar
Remolino
Rivas
Ax*Px=44924819.4102 m3
Ab*Pb=44924819.4102 m3
Rellenando caudal, estación: 959, PERALTA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén
El Congo
El Humo



Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
toma montecristo
$Ax*Px=26919745.0803 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=26919745.0803 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1405, PEÑAS BLANCAS
Rellenando caudal, estación: 2906, PIEDRAS BLANCAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Providencia
$Ax*Px=5468830.8523 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=5468830.8523 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1419, PIEDRAS NEGRAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Arenal Nuevo
El Cairo
Jabillos
Peñas Blancas
Pocosol
Río Chiquito
$Ax*Px=32418111.2469 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=32418111.2469 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 3119, PILAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Cabagra
Caracucho
El Brujo
La Cuesta



Las Juntas
Palmar
Remolino
Rivas
$Ax*Px=44924819.4102 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=44924819.4102 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1420, POCOSOL
Rellenando caudal, estación: 1429, PRESA PEÑAS BLANCAS
Rellenado escala temporal con estaciones:
Arenal Nuevo
El Cairo
Jabillos
Peñas Blancas
Pocosol
Río Chiquito
$Ax*Px=32418111.2469 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=32418111.2469 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2902, PROVIDENCIA
Rellenando caudal, estación: 2901, PUENTE DE HAMACA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Providencia
$Ax*Px=5468830.8523 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=5468830.8523 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1222, PUENTE LA VIRGEN
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro
Veracruz
$Ax*Px=31876366.84 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=31876366.84 \text{ m}^3$



Rellenando caudal, estación: 945, PUENTE NEGRO

Rellenando caudal, estación: 1203, PUERTO VIEJO

Rellenado escala temporal con estaciones:

Quebrada sin nombre

Río Desagüe

Río Segundo

Toro

Veracruz

$Ax * Px = 31876366.84 \text{ m}^3$

$Ab * Pb = 31876366.84 \text{ m}^3$

Rellenando caudal, estación: 2007, PUNTA DE PALO

Rellenado escala temporal con estaciones:

Casa de máquinas Are

Corobici

Rancho Rey

Tilarán

$Ax * Px = 12353831.8973 \text{ m}^3$

$Ab * Pb = 12353831.8973 \text{ m}^3$

Rellenando caudal, estación: 1214, QUEB.SIN NOMBRE

Rellenando caudal, estación: 1215, QUEBRADA GATA

Rellenado escala temporal con estaciones:

Quebrada sin nombre

Río Desagüe

Río Segundo

Toro

Veracruz

$Ax * Px = 31876366.84 \text{ m}^3$

$Ab * Pb = 31876366.84 \text{ m}^3$

Rellenando caudal, estación: 606, QUEBRADOR

Rellenado escala temporal con estaciones:

Guatuso

Santa Lucía



Ax*Px=16150011.8935 m3
Ab*Pb=15665461.4365 m3
Rellenando caudal, estación: 2013, RANCHO HORIZONTES
Rellenado escala temporal con estaciones:
Casa de máquinas Are
Corobici
Rancho Rey
Tilarán
Ax*Px=12353831.8973 m3
Ab*Pb=12353831.8973 m3
Rellenando caudal, estación: 2003, RANCHO REY
Rellenando caudal, estación: 3104, REMOLINO
Rellenando caudal, estación: 1425, RIO CHIQUITO
Rellenando caudal, estación: 1226, RIO CLARO
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro
Veracruz
Ax*Px=31876366.84 m3
Ab*Pb=31876366.84 m3
Rellenando caudal, estación: 1209, RÍO DESAGUE
Rellenando caudal, estación: 1213, RÍO SEGUNDO
Rellenando caudal, estación: 3108, RIVAS
Rellenando caudal, estación: 1423, RUGAMA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Arenal Nuevo
El Cairo
Jabillos
Peñas Blancas



Pocosol
Río Chiquito
$Ax * Px = 32418111.2469 \text{ m}^3$
$Ab * Pb = 32418111.2469 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 927, S. PRESA GUAYABO
Rellenando caudal, estación: 2405, SAN MIGUEL
Rellenado escala temporal con estaciones:
Balsa
Echeverría
La Garita arriba
Nuestro Amo
Santo Domingo
$Ax * Px = 15513743.8973 \text{ m}^3$
$Ab * Pb = 15513743.8973 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2614, SANTA JUANA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Bijagual
Dota
El Rey
$Ax * Px = 9537841.9542 \text{ m}^3$
$Ab * Pb = 9537841.9542 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1605, SANTA LUCIA
Rellenando caudal, estación: 2427, SANTO DOMINGO
Rellenando caudal, estación: 2904, SAVEGRE
Rellenado escala temporal con estaciones:
Providencia
$Ax * Px = 5468830.8523 \text{ m}^3$
$Ab * Pb = 5468830.8523 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 2903, SITIO DE PRESA SAVEG
Rellenado escala temporal con estaciones:
Providencia



Ax*Px=5468830.8523 m3
Ab*Pb=5468830.8523 m3
Rellenando caudal, estación: 102, SIXAOLA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén
El Congo
El Humo
Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
Toma Montecristo
Ax*Px=22930288.1558 m3
Ab*Pb=26919745.0803 m3
Rellenando caudal, estación: 2604, TABACALES
Rellenado escala temporal con estaciones:
Bijagual
Dota
El Rey
Ax*Px=9537841.9542 m3
Ab*Pb=9537841.9542 m3
Rellenando caudal, estación: 2402, TACARES
Rellenado escala temporal con estaciones:
Balsa
Echeverría
La Garita arriba
Nuestro Amo
Santo Domingo



Ax*Px=15513743.8973 m3
Ab*Pb=15513743.8973 m3
Rellenando caudal, estación: 922, TAPANTI ARRIBA
Rellenando caudal, estación: 1404, TERRON COLORADO
Rellenado escala temporal con estaciones:
Arenal Nuevo
El Cairo
Jabillos
Peñas Blancas
Pocosol
Río Chiquito
Ax*Px=32418111.2469 m3
Ab*Pb=32418111.2469 m3
Rellenando caudal, estación: 2004, TILARAN
Rellenando caudal, estación: 932, TOMA MONTECRISTO
Rellenando caudal, estación: 1234, TOMA QUICUYAL
Rellenado escala temporal con estaciones:
Quebrada sin nombre
Río Desagüe
Río Segundo
Toro
Veracruz
Ax*Px=31876366.84 m3
Ab*Pb=31876366.84 m3
Rellenando caudal, estación: 941, TOMA RIO TAPANTI
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén
El Congo
El Humo
Murcia
Oriente



Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
Toma Montecristo
$Ax * Px = 26919745.0803 \text{ m}^3$
$Ab * Pb = 26919745.0803 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1206, TORO
Rellenando caudal, estación: 926, TURRIALBA
Rellenado escala temporal con estaciones:
Angostura
Belén
El Congo
El Humo
Murcia
Oriente
Palomo
Pascua
Puente Negro
s. presa Guayabo
Tapantí arriba
Toma Montecristo
$Ax * Px = 26919745.0803 \text{ m}^3$
$Ab * Pb = 26919745.0803 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 1204, VERACRUZ
Rellenando caudal, estación: 3118, VERGEL
Rellenado escala temporal con estaciones:
Cabagra
Caracucho
El Brujo
La Cuesta



Las Juntas
Palmar
Remolino
Rivas
$Ax*Px=44924819.4102 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=44924819.4102 \text{ m}^3$
Rellenando caudal, estación: 3121, VOLCAN
Rellenado escala temporal con estaciones:
Cabagra
Caracucho
El Brujo
La Cuesta
Las Juntas
Palmar
Remolino
Rivas
$Ax*Px=44924819.4102 \text{ m}^3$
$Ab*Pb=44924819.4102 \text{ m}^3$



Anexo 3. Coeficientes óptimos de calibración del modelo HBV optimizados con GAP.

Tabla B1. Parámetros óptimos por cuenca.

CUENCA	PERC_1	UZI_1	K0_1	K1_1	K2_1	MAXBAS_1	PCALTI	TCALT_1	Pativ_1	Tslav_1	TT_1_1	CFMAX_1_1	SFCF_1_1	CFR_1_1	CWH_1_1	FC_1_1	LP_1_1	BETA_1_1
1	16.215597	43.721357	0.207561	0.225955	0.062107	1.500000	10	0.6	0	0	0.380034	2.003432	0.588339	0.05	0.1	3499.983500	0.100000	0.494449
2	14.500723	41.408771	0.270775	0.252666	0.131072	1.500000	10	0.6	0	0	-1.356623	2.723927	0.500077	0.05	0.1	3499.977600	0.140318	0.800590
3	10.394412	60.782188	0.282699	0.173843	0.044611	1.500000	10	0.6	0	0	-1.715873	1.920788	0.607490	0.05	0.1	3499.999800	0.100000	0.528183
4	5.407249	57.050796	0.349556	0.163003	0.000118	1.500000	10	0.6	0	0	-1.629645	3.080029	0.655766	0.05	0.1	3499.990100	0.100000	0.807295
5	9.242083	45.701025	0.224307	0.184604	0.050986	1.500000	10	0.6	0	0	-1.688455	2.083865	0.503968	0.05	0.1	3499.996200	0.100000	0.695381
6	43.401344	0.000000	0.016258	0.094320	0.030708	1.005000	10	0.6	0	0	-1.209985	3.510273	0.774979	0.05	0.1	3499.999800	0.100000	0.289582
7	27.669889	69.996927	0.002400	0.057106	0.000127	1.049632	10	0.6	0	0	-0.010354	3.730235	0.552963	0.05	0.1	3499.995100	0.688352	0.454559
8	45.215059	0.000031	0.032564	0.106879	0.036647	1.015000	10	0.6	0	0	-1.709435	2.193763	0.870797	0.05	0.1	3499.999600	0.100000	0.348474
9	17.218456	69.999744	0.042739	0.148844	0.039945	1.005000	10	0.6	0	0	-0.291425	1.405348	0.652355	0.05	0.1	3499.999900	0.100000	0.486498
10	24.549648	69.997440	0.002400	0.072251	0.000091	1.277947	10	0.6	0	0	-1.842113	3.721972	0.506187	0.05	0.1	3499.990500	0.746453	0.539531
11	16.808264	28.209174	0.184484	0.249162	0.070954	1.097900	10	0.6	0	0	-0.118750	2.263331	0.807208	0.05	0.1	3499.998400	0.157478	0.535431
12	23.937434	0.066311	0.058159	0.066774	0.062121	1.254902	10	0.6	0	0	0.200985	3.174899	0.597395	0.05	0.1	3500.000000	0.713239	0.361573
15	143.998750	48.025647	0.282767	0.228411	0.047616	1.000010	10	0.6	0	0	-1.551488	2.205239	0.812526	0.05	0.1	2662.772400	0.799999	0.100116
14	14.383390	18.520680	0.101318	0.194462	0.093352	1.298177	10	0.6	0	0	-0.489002	1.915470	0.741323	0.05	0.1	523.959000	0.759202	0.100000
15	127.481920	44.833221	0.002400	0.000257	0.052906	1.099951	10	0.6	0	0	-1.335381	3.204635	0.613785	0.05	0.1	3499.990300	0.799999	0.100000
15	122.395100	67.904050	0.080949	0.000243	0.145844	1.300110	10	0.6	0	0	-1.270775	1.410471	0.509067	0.05	0.1	191.130900	0.799999	0.100000
17	20.009419	69.873486	0.002400	0.119910	0.019520	1.004995	10	0.6	0	0	-1.622483	2.075997	0.637960	0.05	0.1	3499.992700	0.409069	0.500378
18	13.840792	57.283493	0.078770	0.091620	0.013730	1.004998	10	0.6	0	0	-0.071722	3.515235	0.500030	0.05	0.1	3499.998300	0.196883	0.901584
19	11.431479	47.615440	0.244872	0.155502	0.018903	1.198397	10	0.6	0	0	-1.410124	1.593283	0.695133	5.00	0.1	1095.177800	0.800000	3.834293
20	21.818590	69.999840	0.382871	0.319590	0.012993	1.364984	10	0.6	0	0	0.377762	2.101615	0.500000	5.00	0.1	77.5.692000	0.799983	1.032241
21	111.588660	43.841956	0.999899	0.712524	0.033870	1.463868	10	0.6	0	0	-1.238864	1.821868	0.818265	5.00	0.1	1529.463000	0.689447	1.927569
22	26.047437	69.999998	0.999893	0.234376	0.026875	1.500000	10	0.6	0	0	-1.984314	1.440031	0.865485	0.05	0.1	2303.530800	0.759951	2.747396
25	19.057150	69.999990	0.999893	0.169357	0.044328	1.499998	10	0.6	0	0	-1.116112	1.907465	0.509714	0.05	0.1	688.357200	0.797962	1.644296
24	10.561071	69.999993	0.173274	0.118930	0.011755	1.044960	10	0.6	0	0	-1.466062	3.652946	0.782038	0.05	0.1	3499.980800	0.442578	1.199939
25	55.304063	69.999884	0.715426	0.083389	0.045051	1.499999	10	0.6	0	0	-1.438423	2.255571	0.592754	0.05	0.1	3499.998500	0.100000	0.781646
25	18.737298	54.658923	0.463224	0.190348	0.034935	1.500000	10	0.6	0	0	-1.380396	1.682979	0.712262	0.05	0.1	2894.330800	0.527167	3.018111
27	51.229110	69.999932	0.196444	0.095095	0.051572	1.499986	10	0.6	0	0	-1.817695	1.297835	0.500266	0.05	0.1	3499.950600	0.799977	0.177802
23	38.528230	69.999980	0.454776	0.100855	0.067729	1.499992	10	0.6	0	0	-1.598737	3.994045	0.581727	0.05	0.1	1356.030400	0.568878	3.712428
29	24.529463	69.999951	0.369762	0.140065	0.060925	1.472328	10	0.6	0	0	-0.288778	3.077349	0.899787	0.05	0.1	1601.893500	0.543988	4.958817
30	44.002497	40.688046	0.255308	0.167709	0.077779	1.499998	10	0.6	0	0	-1.996023	1.843916	0.513654	0.05	0.1	1789.670300	0.367741	4.810279
31	19.460041	69.999839	0.274123	0.261133	0.090393	1.499999	10	0.6	0	0	-0.488670	2.372825	0.648059	0.05	0.1	1464.163500	0.544985	5.999105
32	24.872055	44.551442	0.115150	0.101944	0.047314	1.500000	10	0.6	0	0	-1.116276	2.290233	0.817711	0.05	0.1	3499.996300	0.100000	0.593547
33	57.926509	56.532024	0.547191	0.062027	0.045700	1.385000	10	0.6	0	0	-1.492727	1.843481	0.758563	0.05	0.1	3500.000000	0.100000	0.665609
34	92.443760	69.991372	0.027955	0.000241	0.076070	1.000001	10	0.6	0	0	-0.397295	3.518865	0.510566	0.05	0.1	1154.201500	0.441263	5.998538

El GEF CReW+ es un proyecto de colaboración financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM / GEF por sus siglas en inglés) que está siendo implementado conjuntamente por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 18 países de la Región del Gran Caribe (WCR). Este proyecto innovador tiene como base la exitosa fase anterior llamada "El Fondo Regional del Caribe para la Gestión de Aguas Residuales (CReW)" (2011–2017). GEF CReW+ está siendo ejecutado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) y la Secretaría de la Convención de Cartagena (UCR/CAR) en nombre del BID y el PNUMA respectivamente.

El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) ha proveído de \$22 billones en ayudas económicas y recursos financieros y ha movilizado cerca de \$120 billones en cofinanciamiento en más de 5,200 proyectos y programas. El GEF es el fondo fiduciario más grande enfocado en permitir a países en desarrollo invertir en la naturaleza y apoya la implementación de convenios internacionales en biodiversidad, cambio climático, químicos y desertificación. Reúne 184 gobiernos, adicionalmente sociedad civil, organizaciones internacionales, sector privado y aliados.

En alianza con



Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por

