

# Estimación de caudales en cuencas anidadas mediante regionalización hidrológica: caso de estudio en los Ríos Agua Caliente y Retes

Flow estimation in nested basins through hydrologic regionalization: case study of the Agua Caliente and Retes Rivers

Fernando Watson-Hernández<sup>1</sup>, Valeria Serrano-Núñez<sup>2</sup>, Isabel Guzmán-Arias<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 22 de mayo, 2025*  
*Fecha de aprobación: 4 de setiembre, 2025*

Watson-Hernández, F; Serrano-Núñez, V; Guzmán-Arias, I. Estimación de caudales en cuencas anidadas mediante regionalización hidrológica: caso de estudio en los Ríos Agua Caliente y Retes. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 3-19.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.7961>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
 [fwatson@itcr.ac.cr](mailto:fwatson@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
 [vserrano@itcr.ac.cr](mailto:vserrano@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-3708-9323>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.  
 [iguzman@itcr.ac.cr](mailto:iguzman@itcr.ac.cr)  
 <https://orcid.org/0000-0002-5553-3977>

## Palabras clave

Uso del suelo; oferta hídrica; modelación hidrológica; regionalización; incertidumbre.

## Resumen

La estimación de caudales en regiones con escasez de datos hidrometeorológicos, requiere técnicas especiales para este tipo de casos, una de ellas es la regionalización hidrológica basada en la transferencia de parámetros entre cuencas hidrográficas. El presente estudio implementó el modelo hidrológico HBV Light para estimar los caudales en la subcuenca del río Retes, ubicada en la zona norte de Cartago, Costa Rica, mediante la transferencia y aplicación de parámetros previamente calibrados en la subcuenca del río Agua Caliente. El análisis estadístico de los resultados evidencia un desempeño satisfactorio del modelo, reflejado en un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,865 y un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,76 durante el período de estiaje (enero-abril), lo que evidencia la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente la dinámica hidrológica en cuencas anidadas. Adicionalmente, se verificó que parámetros como la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (FC), la fracción del almacenamiento máximo (LP) y el control de distribución del agua (BETA) son congruentes con estudios previos en coberturas similares. Si bien los resultados obtenidos en el periodo lluvioso presentaron una disminución en su precisión, el estudio demuestra que una calibración cuidadosa y la regionalización basada en características físicas y climáticas permiten obtener estimaciones fiables de caudales. Este enfoque metodológico representa una contribución para optimizar la gestión de recursos hídricos en ecosistemas agrícolas particularmente vulnerables a la variabilidad y el cambio climático.

## Keywords

Land use; water availability; hydrological modeling; regionalization; uncertainty.

## Abstract

Estimating flow rates in regions with a scarcity of hydrometeorological data requires special techniques for this type of case, one of which is hydrological regionalization based on the transfer of parameters between river basins. The present study implemented the HBV Light hydrologic model to estimate flows in the Retes River sub-basin, located in the northern area of Cartago, Costa Rica, by transferring and applying parameters previously calibrated in the Agua Caliente River sub-basin. The statistical analysis of the results demonstrates the model's satisfactory performance, as evidenced by a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.865 and a Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) of 0.76 during the dry season (January-April). This substantiates the model's aptitude in accurately replicating the hydrological dynamics within nested watersheds. Furthermore, it was ascertained that parameters such as soil water storage capacity (FC), maximum storage fraction (LP) and water distribution control (BETA) are congruent with those observed in previous studies conducted on analogous coverages. Despite the observed decline in accuracy during the rainy season, the study demonstrates that meticulous calibration and regionalisation based on physical and climatic characteristics facilitate the acquisition of reliable flow estimates. This methodological approach constitutes a contribution to the optimisation of water resource management in agricultural ecosystems, which are particularly vulnerable to climate variability and change. For the estimation of flow in regions with scarce hydrometeorological data, hydrologic regionalization based on parameter transfer between watersheds is a key methodology. The present study implemented the HBV

Light hydrologic model to estimate flows in the Retes River sub-basin, located in the northern area of Cartago, Costa Rica, by transferring and applying parameters previously calibrated in the Agua Caliente River sub-basin.

## Introducción

La zona norte de la provincia de Cartago, ubicada en el Valle Central de Costa Rica, se caracteriza por su intensiva producción de hortalizas tales como cebolla, remolacha, zanahoria, papa, entre otras, alcanzando un 80% del total de la producción nacional y constituye la principal actividad socioeconómica de la población concentrada en los sectores circundantes. El aporte de la producción agrícola de esta zona, al abastecimiento de alimentos al país, es de gran relevancia, no obstante, el uso del recurso hídrico para este fin es limitado, debido a las condiciones naturales de esa región y a las normas legales. El área de estudio presenta un régimen climático particular: mientras el sector oriental es influenciado por los vientos alisios y frentes fríos provenientes del Caribe, el sector occidental experimenta condiciones más cálidas y húmedas bajo la influencia del Pacífico. Esta variabilidad genera que el Valle Oriental, donde se ubica el estudio, sea la segunda región más seca del país después del Pacífico Norte. La combinación de una prolongada época seca y un bajo régimen de precipitación incrementa la vulnerabilidad hídrica, afectando directamente la sostenibilidad agrícola.

La escasez de agua durante la época seca, junto con el crecimiento demográfico y el acceso restringido al agua de riego debido a la concesión total de los caudales, limitan la capacidad de los productores para ampliar áreas de cultivo o realizar múltiples cosechas anuales. Además, la creciente variabilidad climática complica la predicción de la transición entre épocas secas y lluviosas, impactando la planificación agrícola. Esta situación plantea la necesidad urgente de fortalecer la gestión del recurso hídrico mediante la incorporación de herramientas técnicas que permitan una distribución más eficiente y equitativa del agua disponible, basada en información precisa y coordinada a nivel interinstitucional. Actualmente, aunque la Dirección de Agua del MINAE tiene la autoridad para intervenir en situaciones de escasez según el artículo 140 de la Ley de Aguas, las herramientas para proyectar caudales a partir de pronósticos climáticos siguen siendo limitadas. Si bien el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) elaboran estimaciones estacionales de precipitación y temperatura, no existen modelos hidrológicos calibrados y validados que permitan traducir estas proyecciones en caudales útiles para la toma de decisiones a mediano y largo plazo. En diversos contextos, la regionalización de parámetros hidrológicos ha surgido como una estrategia eficaz para extender la aplicabilidad de modelos en áreas con escasez de datos. En el contexto mundial, existen experiencias de aplicación interesantes, Mizukami et al. [12], [13] aplicaron esta técnica en 531 cuencas de Estados Unidos utilizando el modelo VIC, logrando resultados satisfactorios en zonas con alta variabilidad estacional y diferentes usos de suelo. De manera complementaria, Beck et al. [3] realizaron una regionalización a escala global con el modelo PCR-GLOBWB, incluyendo cuencas agrícolas y forestales de Europa Central, donde observaron la influencia significativa del almacenamiento de agua en suelos. Razavi et al. [17] exploraron esquemas de clasificación de cuencas en Ontario, Canadá, utilizando métodos de análisis no lineales para la transferencia de parámetros hidrológicos, obteniendo valores del coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) entre 0,58 y 0,79, y un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre 0,65 y 0,84, evidenciando una adecuada generalización de los parámetros regionalizados. En China, Song et al. [20] emplearon técnicas de Gradient Boosting Machine en cuencas monzónicas, alcanzando un NSE medio de 0,64 en escala diaria y 0,84 en escala mensual. En Europa, Hundecha y Bárdossy [9], regionalizaron parámetros del modelo HBV en diversas condiciones climáticas, incrementando la robustez de las predicciones hidrológicas bajo variados escenarios hidroclimáticos. En Estados Unidos, Pool et al. [16] (utilizaron el conjunto de datos

CAMELS para mejorar la regionalización del modelo HBV-Light mediante un número reducido de observaciones de caudal, obteniendo NSE promedio entre 0,45 y 0,60, y un coeficiente de eficiencia de Kling Gupta (KGE) entre 0,55 y 0,70. De forma paralela Addor et al. [1] aplicaron Random Forest para la clasificación espacial de firmas hidrológicas, logrando un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre 0,29 y 0,92 dependiendo del tipo de variable evaluada.

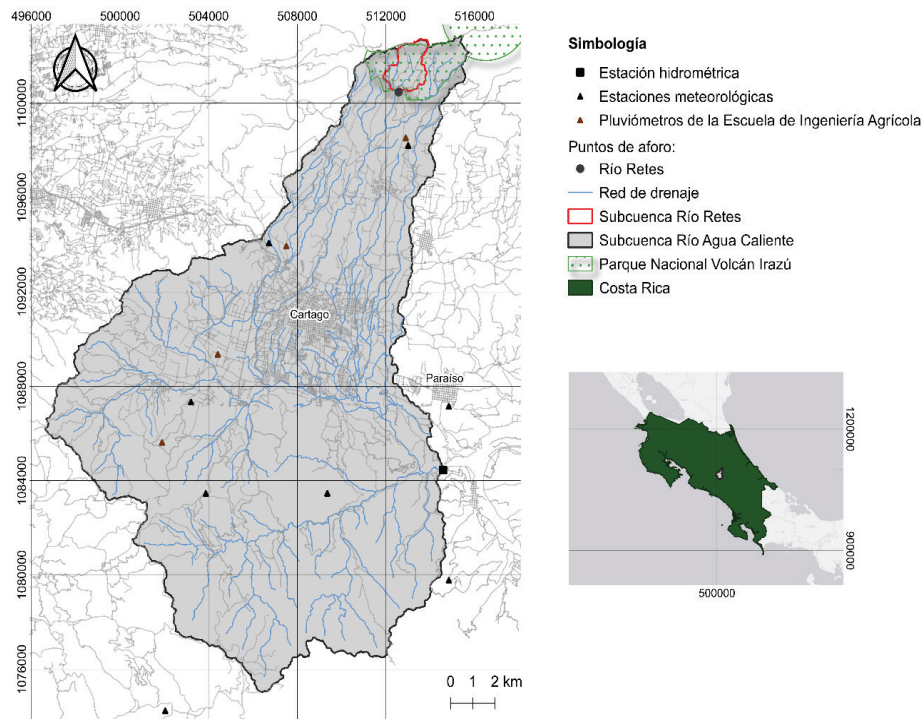
Estos estudios resaltan que, aun bajo condiciones climáticas, topográficas y de cobertura terrestre diversas, es posible lograr regionalizaciones exitosas mediante la calibración cuidadosa y la selección adecuada de variables predictoras. En este caso, la extrapolación de los enfoques mencionados a la región de Cartago podría representar una oportunidad para fortalecer la gestión hídrica local a través de modelos hidrológicos calibrados y adaptados a las particularidades de la zona, de ahí el objetivo de estimar caudales en la subcuenca del río Retes mediante una técnica regionalización hidrológica, en donde la cuenca del río Agua Caliente se utilizará para la calibración y obtención de parámetros utilizando el modelo HBV-light.

### **Materiales y métodos**

Este estudio integra investigación y extensión para la solución de un problema real de ingeniería, la fase de investigación aplicada abarca un enfoque cuantitativo que permite desarrollar una herramienta de estimación de caudales para los puntos de captación de agua para riego de hortalizas y una fase de extensión hacia grupos de productores organizados llamados Sociedades de Usuarios de Agua (SUA) en la zona norte de Cartago, Costa Rica, quienes enfrentan en sus sistemas de producción las condiciones previamente descritas. La metodología se divide en cuatro etapas principales: [1] análisis de variables hidrometeorológicas, [2] caracterización morfológica de la cuenca, [3] modelación hidrológica y [4] devolución participativa de resultados.

### **Área de estudio**

El área de estudio comprende la subcuenca del río Retes y el río Agua Caliente. Estas subcuencas se localizan en la zona norte de Cartago, una región caracterizada por una intensa actividad agrícola y ganadera, así como por la presencia de áreas protegidas asociadas al volcán Irazú. La subcuenca del río Agua Caliente se extiende hasta la estación hidrométrica ubicada en Puente Negro, en el sector de Orosí, mientras que la subcuenca del río Retes se ubica en zonas de mayor elevación, con cobertura predominantemente forestal y vegetal. En la Figura 1 se muestra la ubicación del área de estudio.



**Figura 1:** Ubicación del área de estudio del proyecto.

### Análisis de variables hidrometeorológicas

En esta etapa, se recopilieron datos hidrometeorológicos históricos de las estaciones ubicadas dentro y en las cercanías del área de estudio. Las instituciones proveedoras de datos incluyeron el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Las variables solicitadas incluyeron precipitación acumulada, radiación solar, temperaturas máximas, mínima y promedio, y caudal observado, todas con una frecuencia diaria. Se seleccionaron estaciones con menos del 25% de datos faltantes, y los vacíos se completaron mediante regresiones multivariantes entre estaciones con alta correlación. En el Cuadro 1 se presentan las estaciones meteorológicas e hidrométricas utilizadas en el análisis.

**Cuadro 1.** Estaciones meteorológicas e hidrométricas.

Número	Nombre	Entidad	Coordenadas CRTM05	
			X	Y
73011	Sanatorio Durán	ICE	513005,336	1098217,183
73018	Linda Vista, El Guarco	IMN	503199,144	1087342,403
73029	El Llano	ICE	514840,295	1079786,605
73041	La Cangreja	ICE	503869,357	1083470,054
73042	Muñeco	ICE	509354,089	1083471,036
73104	Concavas	ICE	514837,333	1087159,078
73129	Recope, Ochomogo	IMN	506719,636	1094077,281
88018	El Jardín	ICE	502041,639	1074254,348
730945	Puente Negro	ICE	514581,714	1084452,966

### Caracterización morfológica de la cuenca

Para la caracterización morfológica, se utilizó un modelo de elevación digital (MED) ALOS PALSAR, descargado a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE). Este modelo se procesó en el sistema de información geográfica (SIG) QGIS para corregir depresiones superficiales y delimitar la subcuenca de estudio. La subcuenca del río Agua Caliente se subdividió en doce zonas de elevación, mientras que la subcuenca del río Retes se delimitó a partir de los puntos de aforo. Además, se realizó una clasificación semisupervisada del uso del suelo utilizando imágenes Sentinel-2, identificando tres clases principales: cobertura forestal, vegetación no forestal y áreas sin vegetación. La precisión de la clasificación se evaluó mediante el coeficiente kappa de Cohen.

### Modelación hidrológica

Se empleó el modelo hidrológico Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), un modelo conceptual semidistribuido desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia, para simular la respuesta hidrológica de las cuencas. Se utilizó una metodología de regionalización basada en la transferencia de parámetros desde la cuenca del río Agua Caliente (cuenca donante, con un registro histórico de 30 años) hacia la cuenca del río Retes (cuenca receptora, con registro limitado de 1.5 años), con el fin de estimar caudales en esta última bajo un enfoque de cuenca no aforada.

El proceso inició en la cuenca del río Agua Caliente; los datos de entrada incluyeron series diarias de precipitación, temperatura y caudal, así como promedios mensuales de temperatura y evapotranspiración. La calibración del modelo se realizó mediante el método de Monte Carlo con 2.000.000 de iteraciones, evaluando el desempeño a través de funciones objetivo como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Posteriormente, el modelo calibrado se validó utilizando un conjunto de datos independiente correspondiente a los últimos cinco años de la serie histórica. Las ecuaciones de estas funciones objetivo se presentan a continuación (Cuadro 2).

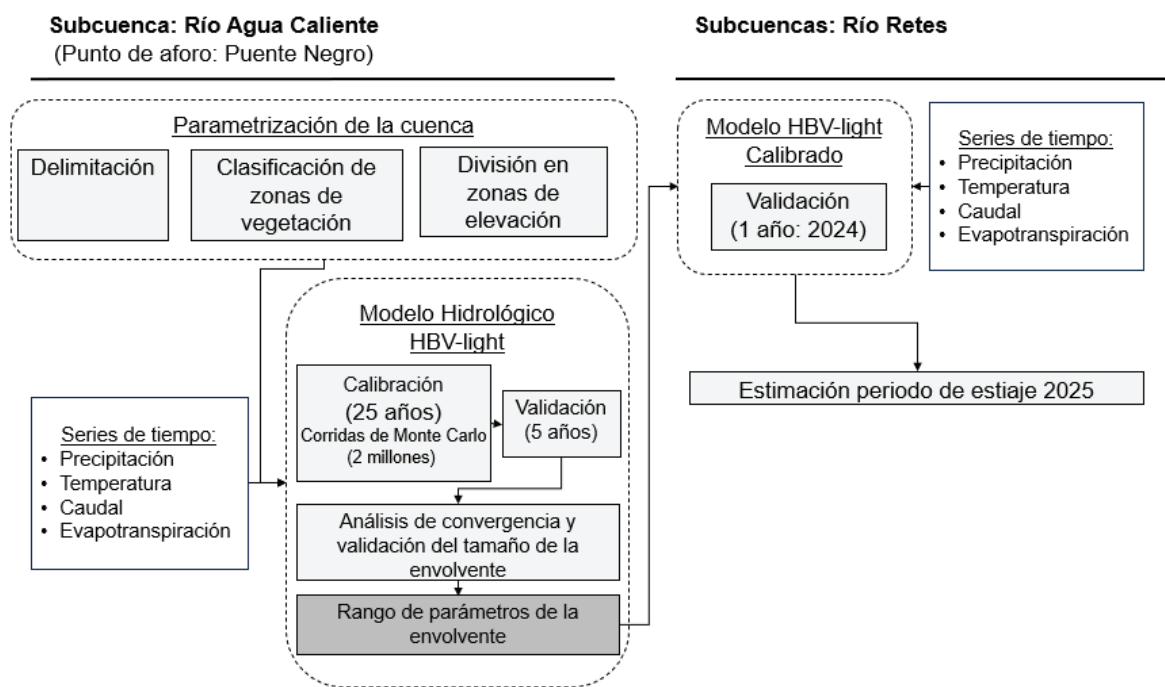
**Cuadro 2.** Funciones objetivo utilizados para la calibración del modelo hidrológico.

Función objetivo	Ecuación	Valor por "ajuste perfecto"
Eficiencia (NSE - Nash-Sutcliffe Efficiency) ( <i>Reff</i> )	$Reff = 1 - \frac{\sum(Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$	1
Porcentaje de sesgo ( <i>PBIAS</i> )	$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum(Q_{s_i} - Q_{o_i})}{\sum Q_{o_i}} \quad (3)$	0%
Raíz del error cuadrático medio ( <i>RMSE</i> )	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2} \quad (4)$	0
Error absoluto medio ( <i>MAE</i> )	$MAE = \frac{1}{n} \sum  Q_{s_i} - Q_{o_i}  \quad (5)$	0
Coefficiente de determinación ( $R^2$ )	$R^2 = \left( \frac{\sum(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)(Q_{s_i} - \bar{Q}_s)}{\sum(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2 \sum(Q_{s_i} - \bar{Q}_s)^2} \right)^2 \quad (6)$	1
Error cuadrático medio ( <i>MSE</i> )	$MSE = \frac{1}{n} \sum (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2 \quad (7)$	0

Nota. Donde:  $Q_{o_i}$  son los caudales observados;  $Q_{s_i}$  son los caudales simulados;  $\bar{Q}_o$  es el valor promedio de los caudales observados;  $\bar{Q}_s$  es el caudal promedio de los caudales simulados;  $n$  es el número total de observaciones.

Para la subcuenca del río Retes, se transfirieron los 300 conjuntos de parámetros de mejor desempeño identificados en la cuenca donante, conservando la estructura de zonas de elevación y las reglas de parametrización física. El modelo fue alimentado con la serie meteorológica local disponible (1,5 años), estableciendo un período de calentamiento (warm-up) de seis meses para estabilizar las condiciones iniciales de almacenamiento. Finalmente, la idoneidad del modelo se evaluó contrastando el registro de caudales observados frente a la envolvente de incertidumbre generada por las 300 simulaciones.

Después de desarrollar el componente de investigación aplicada para resolver un problema específico de la gestión del recurso hídrico en la zona norte de Cartago (Figura 1), se incorporó el componente participativo mediante la devolución de resultados y la capacitación de los actores locales.



**Figura 2.** Esquema metodológico del estudio.

## Resultados

### Análisis de variables hidrometeorológicas

El régimen de lluvias de la subcuenca del río Agua Caliente presenta una precipitación promedio anual de 4,98 mm/día durante el periodo de tiempo analizado, con una diaria máxima de 91,75 mm el 3 de noviembre del 2010. La temperatura media anual es de 18,25°C, en un rango de 12,74°C y 28,0°C.

En el periodo de estudio del proyecto, el pluviómetro presentó la mayor concentración de sus registros de precipitación en los meses de septiembre y octubre, con valores máximos diarios que alcanzaron los 55 mm (29/10/2024), mientras que se observan períodos de déficit hídrico notables, particularmente en enero de 2024, esto demuestra una clara diferenciación entre las épocas lluviosa y seca. La temperatura media es de aproximadamente 15°C, con un registro máximo de 18,95°C (11/02/2024) y mínimo de 11,91°C (13/02/2024). Y la evapotranspiración

diaria se observa que a escala de la subcuenca del río Agua Caliente se presentan consistentemente valores más elevados a lo largo del año, en un rango de 1,87 mm/día (enero) y 2,52 mm/día (mayo), mientras que las mediciones del pluviómetro en la zona norte muestran un rango más estrecho entre 1,72 mm/día (enero) y 2,17 mm/día (mayo). Ambas variables presentan un comportamiento similar, con máximos durante el período mayo-junio y mínimos en diciembre-enero.

### Caracterización morfológica de la cuenca

La cobertura del suelo en la subcuenca del río Agua Caliente se distribuye en: forestal, vegetación no forestal, y áreas sin vegetación. La cobertura forestal es la predominante, con altitudes medias – altas. Las áreas sin vegetación se distribuyen principalmente en la ciudad del centro de Cartago, en los distritos Oriental y Occidental del cantón. Cabe agregar que la clasificación semisupervisada en GEE presentó un coeficiente kappa de 0,869, la cual indica una clasificación muy buena.

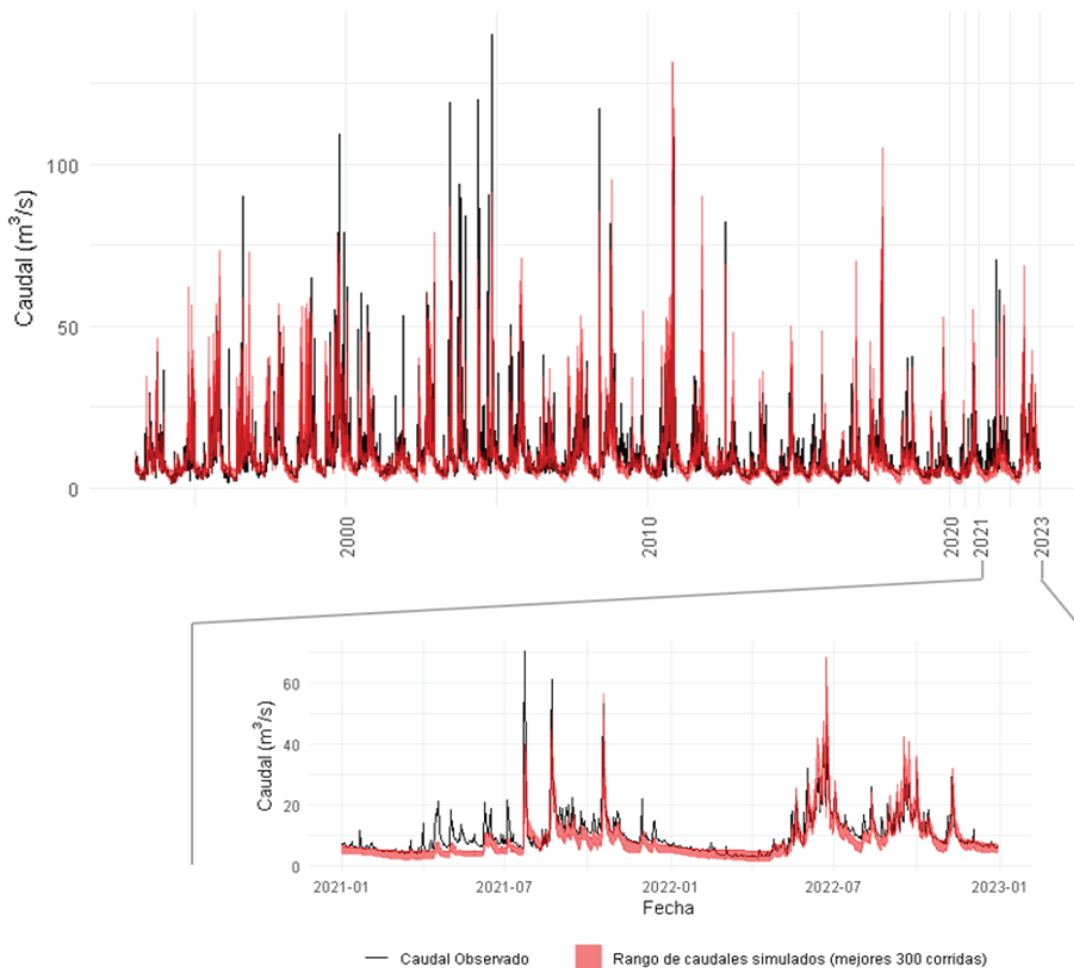
La topografía de la subcuenca presenta una distribución gradual y variada a lo largo del territorio. La mayor parte de la subcuenca se encuentra entre los 1250 y 1900 m.s.n.m. y en las partes más altas (1900-3425 m.s.n.m.), la topografía es mucho más pronunciada. La subcuenca del río Retes se localiza en las zonas de mayor elevación y presentan una cobertura predominantemente forestal y vegetal, con aproximadamente un 99,93% de su área total cubierta por estas dos categorías.

Las partes de menor elevación (1076 - 1100 m.s.n.m.) tienen una proporción baja de cobertura forestal (0,07%) y vegetación (0,05%), mientras que en las elevaciones medias y altas (entre 1250 y 1670 m.s.n.m.) se observan incrementos en las coberturas forestales y, en áreas más elevadas (por encima de 2700 m.s.n.m.), la cobertura forestal disminuye significativamente a la vez que, las zonas sin vegetación incrementan.

En cuanto al análisis morfológico de la subcuenca del río Agua Caliente (Cuadro 4), esta se caracteriza por ser una cuenca relativamente alargada y de una forma moderadamente elíptica de la cuenca, con un coeficiente de compacidad ( $K_c = 2,02$ ).

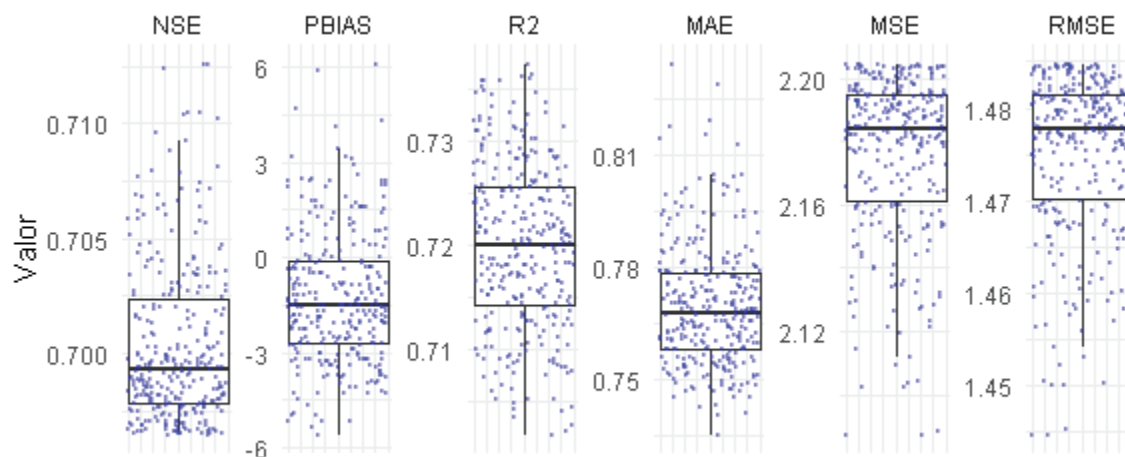
### Modelación hidrológica

Los resultados de la calibración del modelo HBV light, obtenidos a partir de las 300 mejores simulaciones de un total de 2,000,000, evidencian un buen desempeño, con errores controlados y una capacidad adecuada para reproducir los caudales observados (Figura 3).



**Figura 3:** Caudal observado y rango de caudales simulados para la cuenca del río Agua Caliente.

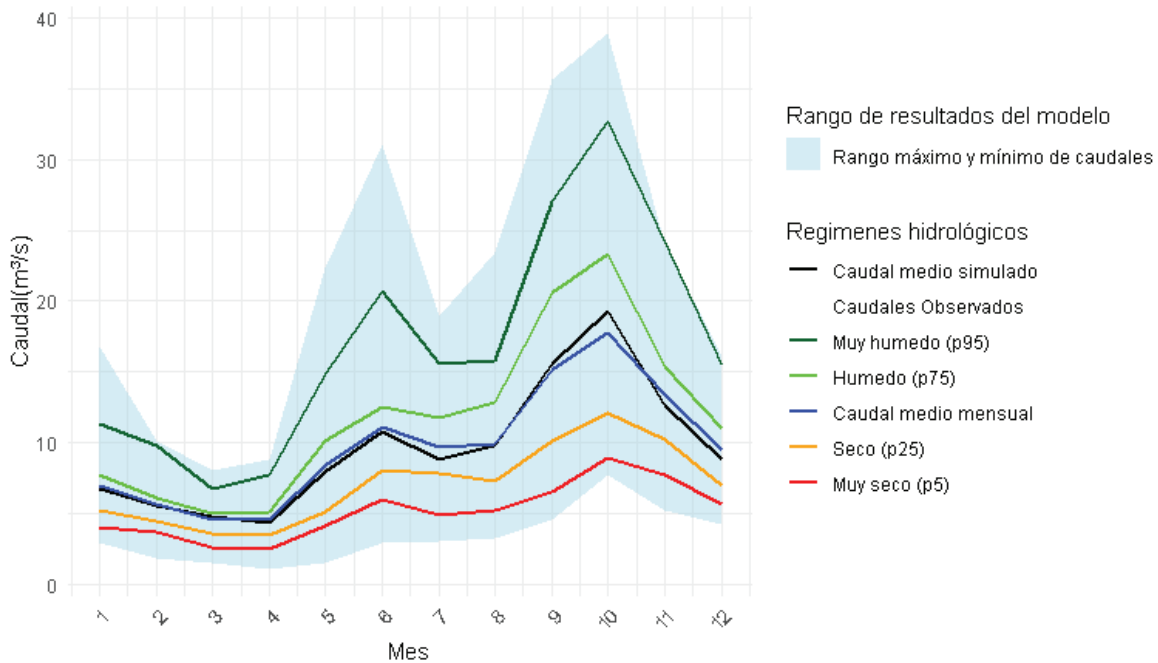
El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) presenta un rango de 0,6965 a 0,7126, con una media de 0,7004, lo que indica que el modelo explica entre el 69,65% y el 71,26% de la variabilidad observada en los caudales. El porcentaje de sesgo (PBIAS) oscila entre -5,6% y 6,1%, con una media de -1,271%, reflejando una ligera tendencia a subestimar los caudales, aunque dentro de un margen aceptable. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) muestra valores entre 0,7018 y 0,7374, con una media de 0,7199, confirmando que el modelo explica una proporción significativa de la variabilidad observada en los caudales (Figura 4).



**Figura 4.** Distribución de los coeficientes de evaluación y error de las mejores 300 simulaciones.

En cuanto a las métricas de error, el MSE oscila entre 2,087 (m<sup>3</sup>/s)<sup>2</sup> y 2,204 (m<sup>3</sup>/s)<sup>2</sup>, con una media de 2,176 (m<sup>3</sup>/s)<sup>2</sup>. Esta métrica penaliza más los errores grandes al elevar al cuadrado las diferencias, lo que permite identificar simulaciones con desviaciones significativas. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) varía entre 1,445 m<sup>3</sup>/s y 1,485 m<sup>3</sup>/s, también conlleva una penalización más alta de los errores grandes al elevar al cuadrado las diferencias, pero permite una mejor interpretación debido a que el RMSE mantiene las mismas unidades que los datos observados. El error absoluto medio (MAE) se sitúa entre 0,7352 m<sup>3</sup>/s y 0,8342 m<sup>3</sup>/s. A diferencia del RMSE y el MSE, el MAE es menos sensible a valores atípicos al considerar únicamente el valor absoluto de los errores. La envolvente generada a partir de las simulaciones realizadas muestra que el rango de caudales máximos y mínimos observados queda dentro de los rangos de capacidad del modelo calibrado, lo que indica una adecuada representación de la variabilidad hidrológica.

Además, el caudal medio simulado sigue de cerca la tendencia de los caudales observados, lo que sugiere una buena calibración del modelo hidrológico a escala de caudales medios mensual (Figura 5).



**Figura 5.** Régimen hidrológico observado y rango de caudales máximo mínimo y medio de las simulaciones realizadas en la cuenca del río Agua Caliente.

Se evidencia una clara estacionalidad en los caudales, con un incremento a partir del mes 5 y un pico máximo entre los meses 9 y 10, lo que refleja la influencia del régimen de lluvias en la cuenca. Los percentiles de caudal (p95, p75, p25 y p5) muestran que el modelo es capaz de capturar los extremos hidrológicos, brindando una representación confiable de los eventos húmedos y secos. El modelo hidrológico HBV Light fue parametrizado para tres tipos de cobertura del suelo: forestal, agrícola y sin cobertura vegetal, considerando tres parámetros clave: FC (capacidad de campo), LP (fracción del almacenamiento máximo de agua en el suelo a partir de la cual la evapotranspiración potencial es máxima) y BETA (control de la distribución del agua entre percolación y escorrentía).

El FC mostró los valores más altos en suelos con cobertura forestal, entre 850,0 y 949,9 mm, lo que indica una mayor capacidad de retención de agua en comparación con los suelos agrícolas (550,0 – 650,0 mm) y los suelos sin cobertura vegetal (140,0 – 180,0 mm). El LP, presentó un rango similar entre los tres tipos de cobertura, con valores entre 0,1000 y 0,9999, lo que sugiere una distribución homogénea en la fracción del almacenamiento de agua en el suelo. El parámetro BETA, que regula la distribución del agua entre percolación y escorrentía, mostró los valores más altos en los suelos con cobertura forestal (2,000 – 3,999), indicando una mayor tendencia a la infiltración del agua. Los suelos agrícolas presentaron valores intermedios (1,000 – 3,000), mientras que los suelos sin cobertura vegetal dieron los valores más bajos (0,2501 – 1,9998), lo que sugiere una mayor escorrentía superficial y menor capacidad de infiltración en ausencia de vegetación.

El Cuadro 3 muestra los parámetros de calibración obtenidos para generar las series de caudales simulados en la subcuenca del río Agua Caliente utilizados para el modelo de la subcuenca del río Retes. Los valores resultantes de la calibración son consistentes con las características esperadas de cada uso de suelo.

**Cuadro 3.** Parámetros del modelo hidrológico calibrado de la subcuenca Río Agua Caliente.

Rutina	Parámetro	Descripción	Valor			Unidades
			Cobertura			
			Forestal (1)	Vegetación baja (2)	Sin cobertura (3)	
Humedad del suelo	FC	Cantidad máxima de agua que el suelo puede retener antes de que ocurra percolación.	850.0 - 949.9	550.0 - 650.0	140.0 - 180.0	mm
	LP	Fracción del almacenamiento máximo de agua en el suelo a partir de la cual la evapotranspiración potencial es máxima.	0.8000 - 0.9998	0.6000 - 0.9997	0.5000 - 0.9999	
	BETA	Controla la distribución del agua entre la percolación y la escorrentía en función del contenido de humedad del suelo.	2.000 - 3.999	1.000 - 3.000	0.2501 - 1.9998	
Respuesta	K0	Coefficiente de recesión para el flujo de respuesta rápida.	0.3000 - 0.5827			día <sup>-1</sup>
	K1	Coefficiente de recesión para el flujo intermedio, relacionado con el almacenamiento en el suelo y el flujo subsuperficial.	0.05000 - 0.08999			día <sup>-1</sup>
	K2	Coefficiente de recesión para el flujo base, que representa la descarga de los acuíferos.	0.001004 - 0.039929			día <sup>-1</sup>
	UZL	Umbral de almacenamiento en la zona superior, a partir del cual se activa el flujo de recarga rápida.	30.00 - 59.88			mm
	PERC	Tasa máxima de percolación desde el almacenamiento intermedio hacia el almacenamiento base	1.067 - 3.000			mm/día
Enrutamiento	MAXBAS	Parámetro que suaviza el hidrograma mediante una función de distribución triangular, representando el retardo en la escorrentía	1.300 - 1.700			días
Otros	Cet	Factor de reducción de la evapotranspiración en función de la disponibilidad de agua en el suelo	0.02000 - 0.08999			

El K0 presentó un rango entre 0,3000 y 0,5827 día<sup>-1</sup>, que define la rapidez con que se produce la disminución del flujo inicial y la transferencia de agua desde la superficie hacia los cauces. El K1 mostró valores entre 0,05000 y 0,08999 día<sup>-1</sup>, lo que indica una recesión más lenta del flujo intermedio, relacionado con el movimiento del agua a través de las capas más profundas del suelo hacia los acuíferos. El K2 presentó valores entre 0,001004 y 0,039929 día<sup>-1</sup>, reflejando una disminución más gradual del flujo base, lo que implica una liberación sostenida de agua

almacenada en los acuíferos. El UZL tuvo un rango entre 30,00 y 59,88 mm, que define el punto a partir del cual se activa el flujo de recarga rápida, influyendo directamente en la generación de escorrentía superficial. El PERC osciló entre 1,067 y 3,000 mm/día, indicando una tasa moderada de percolación desde el almacenamiento intermedio hacia el base, clave para la recarga de los acuíferos y la distribución del agua en el sistema. El MAXBAS presentó valores entre 1,300 y 1,700 días, sugiriendo un retardo en la escorrentía, lo cual es esencial para representar la dispersión temporal del flujo en la cuenca. El Cet tuvo un rango de 0,02000 a 0,08999, ajustando la evapotranspiración según la disponibilidad de agua en el suelo, lo que es particularmente relevante en áreas con limitaciones hídricas.

### Modelación cuenca río Retes

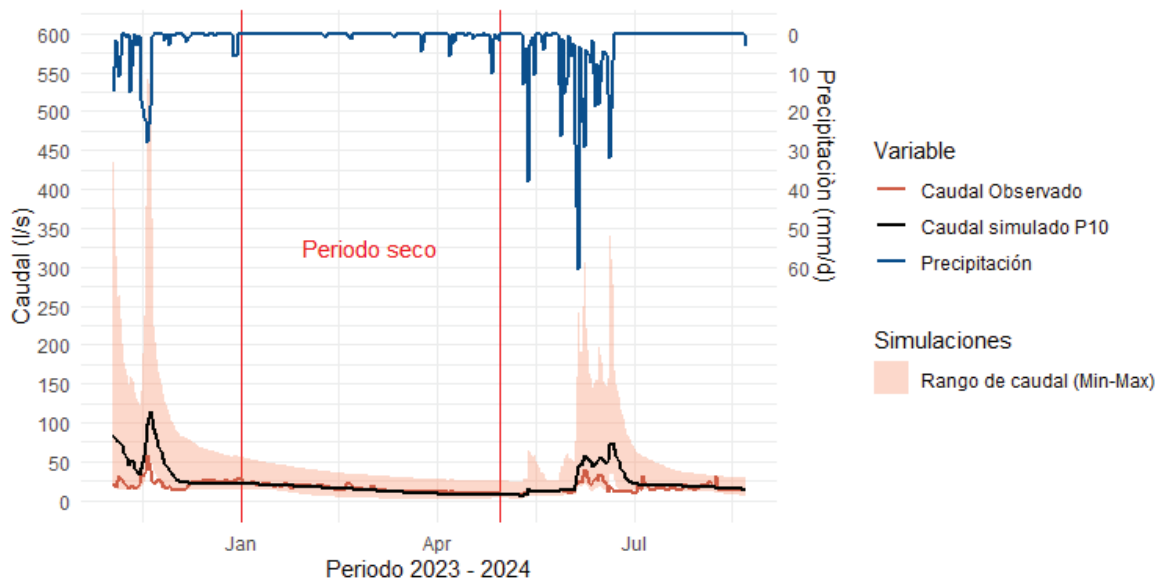
La cuenca del río Retes tiene un área de 280,4 ha y se ubica sobre la elevación de 2470 msnm hasta los 3425 msnm, cuyo principal uso del suelo es la vegetación densa y baja (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Distribución del tipo de cobertura en función de la elevación para la cuenca del río Retes.

Intervalo (msnm)	Elevación media (m)	Cobertura			Total
		Forestal (1)	Vegetación baja (2)	Sin cobertura vegetal (3)	
2470 - 2700	2585	9,04%	1,81%	0,00%	10,86%
2700 - 3000	2850	71,98%	6,64%	0,07%	78,69%
3000 - 3425	3212,5	10,45%	0,00%	0,00%	10,45%
Total		91,48%	8,45%	0,07%	100,00%

Nota. Basado en la división de zonas de elevación de la cuenca del río Agua Caliente, con el fin de poder utilizar la calibración de parámetros realizada en esta cuenca.

La aplicación del modelo HBV calibrado sobre la cuenca del río Retes utilizando la parametrización obtenida para las mejores 300 corridas proyecta resultados conservadores que mejoran cuando la comparación de las simulaciones con el caudal observado se realiza para el periodo de seco. Para este periodo de tiempo de enero a abril, se obtuvo que, de la envolvente resultante, el percentil 10 es el que mayor acercamiento tuvo respecto al caudal observado (Figura 6).



**Figura 6.** Caudales observados y simulados obtenidos al aplicar el modelo calibrado a la cuenca del río Retes.

La comparación presenta un buen ajuste con los datos reales como lo indican los coeficientes obtenidos. El coeficiente de determinación  $R^2=0,865$  sugiere que el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados puede ser explicada por el modelo simulado, lo que indica una alta correlación entre ambos conjuntos de datos. El índice de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) de 0,76 sugiere que el modelo es capaz de capturar adecuadamente la dinámica del sistema hidrológico en estudio. Además, el error cuadrático medio (RMSE) de 2,32 y el error absoluto medio (MAE) de 1,7 proporcionan una medida de la magnitud de los errores entre los caudales simulados y observados relativamente aceptables.

## Discusión

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, representada por el parámetro FC (Capacidad de Campo), mostró en este estudio valores de 850,0–949,9 mm para cobertura forestal, 550,0–650,0 mm para vegetación baja y 140,0–180,0 mm para áreas sin cobertura. Estos resultados son consistentes con valores reportados en la literatura para coberturas forestales. Por ejemplo, Huang et al. [8] reportaron un valor de FC de 915 mm para zonas forestales en China, mientras que Méndez y Calvo-Valverde [11] encontraron valores de 900 mm en subcuencas del río Agua Caliente en Costa Rica que es una subcuenca de la cuenca en estudio.

La fracción del almacenamiento máximo de agua (LP) presentó rangos de calibración de 0,8000–0,9998 para áreas forestales, 0,1000–0,9997 para vegetación baja y 0,1000–0,9999 para áreas sin cobertura. Estos rangos abarcan valores reportados en estudios previos, como 0,90 según Seibert y Vis [19]. Huang et al. [8] también encontraron un valor de LP de 0,88 para cobertura forestal, mientras que Méndez y Calvo-Valverde [11] reportaron un valor de 0,87.

El parámetro BETA, que controla la distribución del agua entre percolación y escorrentía, presentó en este estudio un rango de 2,000–3,999 para cobertura forestal, 1,000–3,000 para vegetación baja y 0,250–1,999 para áreas sin cobertura, valores coherentes con los reportados por con un valor de BETA de 2,9 para cobertura forestal, mientras que Méndez y Calvo-Valverde [11] reportaron un valor de 3,1 en Costa Rica, lo que refuerza que la vegetación forestal favorece la infiltración y reduce la escorrentía superficial.

La aplicación del modelo HBV Light en la cuenca Retes ha mostrado un desempeño satisfactorio, especialmente durante el período seco (enero a abril), con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,865. Este valor indica que el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados puede ser explicada por el modelo. El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) fue de 0,76, sugiriendo que el modelo captura adecuadamente la dinámica hidrológica. Además, el error cuadrático medio (RMSE) de 2,32 y el error absoluto medio (MAE) de 1,7 reflejan una magnitud de error relativamente baja. Estos resultados son consistentes con estudios previos que han empleado el modelo HBV Light en diferentes regiones y contextos climáticos, donde se ha destacado la sensibilidad del modelo a la calibración y su capacidad de reproducir caudales de forma eficiente una vez ajustado.

En contextos tropicales, la aplicación del modelo HBV Light en la cuenca del río Sardinal en Costa Rica reportó un NSE de 0,78 y un RMSE de 2,1, mientras que en la cuenca del río Jequetepeque en Perú se obtuvo un NSE de 0,72 y un  $R^2$  de 0,85, valores que son consistentes con los alcanzados en este estudio. Estos resultados evidencian la adaptabilidad del modelo HBV Light a condiciones de alta precipitación y cobertura forestal, así como a ambientes semiáridos, siempre que se realicen calibraciones y validaciones adecuadas.

La flexibilidad del modelo HBV para ajustarse a diversas condiciones hidrológicas ha sido ampliamente documentada, lo que justifica su aplicación en estudios de regionalización. En este análisis, la regionalización de parámetros por medio de la generación de envolventes permitió obtener una parametrización conservadora que mejoró la simulación durante el periodo de estiaje. Esta metodología es similar a la utilizada en estudios que emplearon técnicas de aprendizaje automático para regionalizar parámetros hidrológicos, alcanzando valores de NSE entre 0,70 y 0,80. Además, estrategias basadas en la identificación de similitudes físicas y climáticas entre cuencas han mostrado eficacia para alcanzar NSE superiores a 0,70 en cuencas tropicales y semiáridas.

La necesidad de utilizar enfoques de regionalización robustos para mejorar la transferibilidad de parámetros entre cuencas no aforadas también ha sido señalada, coincidiendo con la metodología empleada en el presente estudio [8]. Los coeficientes de evaluación obtenidos en la cuenca Retes, con parámetros calibrados en la cuenca Agua Caliente, mostraron que la simulación explica el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados durante el estiaje, valor comparable con rangos reportados en cuencas de distintas condiciones climáticas.

El índice de eficiencia NSE obtenido (0,76) confirma que el modelo logró capturar adecuadamente la dinámica hidrológica del sistema en época de estiaje. Este desempeño es similar al reportado en estudios que aplicaron regionalización de parámetros en cuencas de clima templado y semiárido, con valores de NSE entre 0,68 y 0,82, y en cuencas de clima oceánico y continental con valores entre 0,55 y 0,85. Incluso en regiones de clima subártico, donde se reportan valores de NSE ligeramente más bajos (alrededor de 0,65), los resultados son consistentes considerando la variabilidad entre periodos húmedos y secos.

## Conclusiones

La aplicación del modelo HBV calibrado en la cuenca del río Agua Caliente y su transferencia a la subcuenca del río Retes demostró ser una metodología efectiva para estimar caudales en cuencas anidadas utilizando métodos de regionalización. Los resultados mostraron un buen ajuste entre los caudales simulados y observados, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,865 y un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,76. Esto indica que el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados puede ser explicada por el modelo, validando la utilidad de la regionalización hidrológica para la estimación de caudales en cuencas con datos limitados.

Aunque el modelo mostró un desempeño aceptable, se identificó que la transferencia de parámetros introduce cierto grado de incertidumbre, especialmente en períodos de estiaje. El error cuadrático medio (RMSE) de 2,32 y el error absoluto medio (MAE) de 1,7 sugieren que, aunque el modelo es preciso, existen márgenes de mejora, particularmente en la calibración local y en la recopilación de datos hidrometeorológicos más detallados. Estos hallazgos resaltan la importancia de mejorar la representación de las características específicas de cada cuenca para reducir la incertidumbre y aumentar la precisión de las estimaciones.

## Agradecimientos

- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)
- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)
- Sociedad de Usuarios de Agua: Río Reventado, Sanatorio 1 y 2, Hierbabuena, San Blas y El Rodeo de Tierra Blanca
- Dirección de Agua del MINAE

## Referencias

- [1] N. Addor, G. Nearing, C. Prieto, A. J. Newman, N. Le Vine y M. P. Clark, "A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space," *Water Resources Research*, vol. 54, no. 11, pp. 8792–8812, Nov. 2018, doi: 10.1029/2018WR022606.
- [2] M. Ballesteros Vargas y T. López Lee, *El nexo entre el agua, la energía y la alimentación en Costa Rica: El caso de la cuenca alta del río Reventazón*, Serie Recursos Naturales e Infraestructura, no. 182. Santiago, Chile: CEPAL, 2017. [En línea]. Disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42507/2/S1701032\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42507/2/S1701032_es.pdf)
- [3] H. E. Beck, M. Pan, P. Lin, J. Seibert, A. I. J. M. van Dijk y E. F. Wood, "Global fully distributed parameter regionalization based on observed streamflow from 4,229 headwater catchments," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 125, no. 17, Sep. 2020, doi: 10.1029/2019JD031485.
- [4] J. Carvajal, "Implementación de una metodología participativa de estrategias de adaptación al cambio climático en recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del río Reventado, Cartago, Costa Rica," Tesis de maestría, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2014. [En línea]. Disponible en: [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7081/Implementacion\\_de\\_una\\_metodologia\\_participativa.pdf](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7081/Implementacion_de_una_metodologia_participativa.pdf)
- [5] Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), *El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. Costa Rica, 2008.
- [6] W. Dou *et al.*, "Fuzzy kappa for the agreement measure of fuzzy classifications," *Neurocomputing*, vol. 70, nos. 4–6, pp. 726–734, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.neucom.2006.10.007.
- [7] E. V. García Medina, "Análisis comparativo de los modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV aplicados al pronóstico," Tesis de licenciatura, Univ. Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2024.
- [8] S. Huang, S. Eisner, J. O. Magnusson, C. Lussana, X. Yang y S. Beldring, "Improvements of the spatially distributed hydrological modelling using the HBV model at 1 km resolution for Norway," *J. Hydrol.*, vol. 577, p. 123585, 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.051.
- [9] Y. Hundecha y A. Bárdossy, "Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model," *J. Hydrol.*, vol. 292, nos. 1–4, pp. 281–295, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.01.002.
- [10] J. Jenness y J. J. Wynne, *Cohen's kappa and classification table metrics 2.0: An ArcView 3.x extension for accuracy assessment of spatially explicit models*. Flagstaff, AZ, USA: U.S. Geological Survey, Southwest Biological Science Center, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/25707>
- [11] M. Méndez y L. Calvo-Valverde, "Development of the HBV-TEC hydrological model," *Procedia Eng.*, vol. 154, pp. 1116–1123, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.521.
- [12] N. Mizukami *et al.*, "Towards seamless large-domain parameter estimation for hydrologic models," *Water Resources Research*, vol. 53, no. 9, pp. 8020–8040, Sep. 2017, doi: 10.1002/2017WR020401.

- [13] N. Mizukami *et al.*, "On the choice of calibration metrics for 'high-flow' estimation using hydrologic models," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 2601–2614, Jun. 2019, doi: 10.5194/hess-23-2601-2019.
- [14] I. Narváez, "Percepción sobre la tendencia de caudales, precipitación, temperatura y cambio de uso del suelo con relación al uso y manejo del agua en la zona norte de Cartago, Costa Rica," Tesis, Costa Rica, 2013.
- [15] H. Ouatiki, A. Boudhar, A. Ouhinou, A. Beljadid, M. Leblanc y A. Chehbouni, "Sensitivity and interdependency analysis of the HBV conceptual model parameters in a semi-arid mountainous watershed," *Water*, vol. 12, no. 9, p. 2440, Aug. 2020, doi: 10.3390/w12092440.
- [16] S. Pool, D. Viviroli y J. Seibert, "Value of a limited number of discharge observations for improving regionalization: A large-sample study across the United States," *Water Resources Research*, vol. 55, no. 1, pp. 363–377, Jan. 2019, doi: 10.1029/2018WR023855.
- [17] T. Razavi y P. Coulibaly, "An evaluation of regionalization and watershed classification schemes for continuous daily streamflow prediction in ungauged watersheds," *Can. Water Resour. J.*, vol. 42, no. 1, pp. 2–20, Jan. 2017, doi: 10.1080/07011784.2016.1184590.
- [18] T. Sassolas-Serrayet, R. Cattin y M. Ferry, "The shape of watersheds," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 3791, Sep. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06210-4.
- [19] J. Seibert y M. J. P. Vis, "Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 9, pp. 3315–3325, 2012, doi: 10.5194/hess-16-3315-2012.
- [20] Z. Song, J. Xia, G. Wang, D. She, C. Hu y S. Hong, "Regionalization of hydrological model parameters using gradient boosting machine," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 505–524, Jan. 2022, doi: 10.5194/hess-26-505-2022.
- [21] A. Trabado, "Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14075/BCO24017604e>

### Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *NotebookLM*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista. Además, utilizamos la herramienta de IA *Gemini* para traducir textos de este artículo. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.