



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelado hidrológico asistido por trazadores
para el análisis de eventos extremos en los
trópicos estacionalmente secos**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Jacqueline Garduño Ramírez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Saúl Arciniega Esparza



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado MODELADO HIDROLOGICO ASISTIDO POR TRAZADORES PARA EL ANALISIS DE EVENTOS EXTREMOS EN LOS TROPICOS ESTACIONALMENTE SECOS que presenté para obtener el título de INGENIERA GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

JACQUELINE GARDUÑO RAMIREZ
Número de cuenta: 317173996

Dedicatoria

A mis amados padres, Belem y Aarón.

A mis abuelos, Alberto Ramírez y Gilberto Garduño y a mi nano José A. Briseño, quienes me acompañan en el alma y me guían desde el cielo.

Agradecimientos

A mi director de tesis, el Dr. Saúl Arciniega Esparza, por su guía, paciencia y acompañamiento a lo largo de este proceso académico y profesional. Sus valiosas enseñanzas me brindaron claridad necesaria para tomar decisiones sobre mi futuro. Mi gratitud eterna por motivarme a trascender mis propios límites.

Al Dr. Christian Birkel por recibirme en la Universidad de Costa Rica (UCR) y por su apoyo y enseñanzas, así como al Dr. Ricardo Sánchez Murillo por sus valiosas aportaciones a este trabajo.

A mis sinodales – Dra. Iza Canales García, Dr. Jorge López Alvis, Dr. José Agustín Breña Naranjo e Ing. Gabriel Salinas Calleros – por sus comentarios, sugerencias y por el tiempo dedicado a revisar esta investigación. Su acompañamiento en distintas etapas de la carrera fue fundamental para comprender que la geofísica es una disciplina vasta y diversa; gracias por ampliar mi perspectiva.

Al Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería, por brindarme un espacio donde el aprendizaje y el intercambio de experiencias con personas extraordinarias hicieron de este trayecto una etapa memorable.

A mis padres, Belem y Aarón. A mi mamá por ser mi motor y el ejemplo vivo de que la determinación no tiene límites, por motivarme a entregar lo mejor de mí y por su amor incondicional. A mi papá, por su guía, por haberme brindado más de lo que estuvo en sus manos y por tanto amor. Todo lo que soy es reflejo de su esfuerzo.

A Liz por ayudarme a encontrar equilibrio y sanar el alma. A Jair por su paciencia y consejos siempre oportunos. A mis amadas hermanas, Vale y Regi, por ser mi luz y mi motivación, por su amor tan puro y por ser las mejores compañeras de vida que el universo me pudo otorgar.

A mi familia y abuelos, con especial cariño a Nedy, Yaz y Pancho, quienes han sido un apoyo constante en cada etapa de mi vida.

A mis mejores amigos, Helena, Juan, Adri, Jess, Uriel, Emiliano J., Emiliano C., Yam, Pavel, Julio y Paula. Gracias por las aventuras, risas y desvelos, que alegraría coincidir.

A Edgar Orozco, por ser la luz que necesité cuando el camino parecía incierto. Gracias motivarme a creer en mí en los momentos de duda y por estar presente siempre.

A Cami, mi fiel compañera, por estar presente siempre incluso en cada desvelo.

Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	3
I. Introducción	5
I.1 Objetivos	7
II. Marco teórico.....	7
II.1 Sequías e inundaciones.....	7
II.2 Modelación hidrológica para el análisis de eventos extremos	10
II.3 Percepción remota aplicada a la hidrología	11
II.4 Acoplamiento de isótopos estables en modelos hidrológicos	12
III. Descripción de la zona de estudio.....	13
III.1 Descripción general	13
III.2 Características geológicas regionales	14
III.3 Fenómenos hidrometeorológicos asociados a eventos extremos.....	17
III.4 Características hidrográficas y climatológicas	18
III.5 Uso de suelo	19
IV. Bases de datos y metodología	21
IV.1 Delimitación de cuencas	21
IV.2 Bases de datos	22
IV.3 Modelo hidrológico.....	25
IV.4 Calibración y validación del modelo.....	27
IV.5 Análisis de sequías	32
IV.6 Análisis de inundaciones	36
V. Resultados y discusión	38
V.1 Calibración del modelo	38
V.2 Simulación continua de caudal	43
V.3 Análisis de eventos extremos: sequías.....	44
V.4 Análisis de eventos extremos: inundaciones	50
VI. Conclusiones	54
VII. Referencias	56

Resumen

La evaluación y gestión de los riesgos asociados a fenómenos hidroclicmáticos extremos, como las inundaciones y las sequías, constituyen una prioridad para la planificación territorial, la seguridad hídrica y la protección de las poblaciones. La capacidad de estimar y anticipar estos eventos permite mitigar sus impactos ambientales, reducir pérdidas económicas y salvar vidas humanas. Sin embargo, la evaluación de eventos extremos se ve afectada en las regiones con poca o nula información hidrológica, una situación común en zonas con clima tropical y de Latinoamérica, como es el caso específico de la provincia de Guanacaste, en Costa Rica.

Para abordar este desafío, este estudio se centró en el análisis de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos (sequías e inundaciones) en la cuenca del río Tempisque, la más extensa de la vertiente del Pacífico Norte costarricense, una región caracterizada por una marcada estacionalidad climática. En este trabajo se implementó un modelo hidrológico alimentado con datos satelitales e isótopos estables de agua (δ^2H , $\delta^{18}O$) como trazadores para refinar la representación interna de los procesos hidrológicos y mejorar la evaluación de los eventos extremos.

Se utilizó el Modelo HYPE (Hydrological Predictions for the Environment), un modelo semidistribuido conceptual que permite la integración de trazadores no reactivos, como los isótopos, y cuenta con capacidades de calibración multi-objetivo para aprovechar la información existente de diferentes fuentes. Para reforzar el modelo, se utilizaron los datos climáticos de libre acceso derivados de percepción remota y productos globales a escala diaria de CHIRPS V2.0, ERA5 y MOD16; cobertura vegetal y propiedades edáficas de CCI Land Cover y Soil Grids, cubriendo el periodo de 1990 a 2023, así como registros isotópicos de lluvia recolectadas en la ciudad de Liberia entre 2014 y 2021. Para la calibración del modelo, se incorporaron datos de caudal de dos estaciones hidrométricas y mediciones esporádicas de isótopos en el caudal de los ríos Tempisque y Colorado obtenidas entre 2018 y 2021.

Se observó que el modelo calibrado únicamente con caudal alcanza un ajuste aceptable de la métrica de error de Kling-Gupta ($KGE = 0.61$), sin embargo, la calibración conjunta con isótopos mejoró sustancialmente la simulación del caudal base, demostrando la capacidad de los isótopos para mejorar la representación de procesos en el subsuelo. Sin embargo, esta mejora no se extendió a la representación de los caudales pico durante las tormentas más severas. El modelo logró capturar con mayor fidelidad la dinámica isotópica y el comportamiento del caudal base del río Tempisque, lo que sugiere una fuerte influencia del agua subterránea en su flujo base.

El análisis de eventos hidrológicos extremos derivado de la modelación indicó que, en el periodo estudiado, la cuenca del río Tempisque ha experimentado sequías más severas que inundaciones. Geográficamente, las zonas norte y centro de la cuenca resultaron ser las más afectadas en ambos casos. El evento de sequía más extremo, asociado al fenómeno El Niño 2015-2016, se extendió por 18 meses y generó un déficit de caudal acumulado de aproximadamente 600 milímetros. En cuanto a las inundaciones, el caudal pico asociado a un evento de periodo de retorno de 50 años fue superado una vez en 2017, asociado al fenómeno La Niña y a la tormenta tropical Nate.

En conclusión, este trabajo destaca el valor de integrar isótopos estables y datos de percepción remota en la modelación hidrológica. Este enfoque híbrido mejora la simulación del flujo base para el análisis de sequías hidrológicas, y representa una herramienta sólida para la evaluación de sequías e inundaciones en regiones tropicales secas con datos limitados, apoyando la gestión sostenible del recurso hídrico y la planificación ante escenarios de cambio climático y eventos extremos.

Abstract

The assessment and management of risks associated with extreme hydroclimatic phenomena, such as floods and droughts, are a priority for territorial planning, water security, and public safety. The ability to estimate and anticipate these events allows for the mitigation of environmental impacts, reduction of economic losses, and saving of lives. However, extreme event assessment is often hindered in regions with sparse or non-existent hydrological data—a common situation in tropical regions and Latin America, specifically in the province of Guanacaste, Costa Rica.

To address this challenge, this study focuses on analyzing the frequency and intensity of extreme events (droughts and floods) in the Tempisque River basin, the largest in Costa Rica's North Pacific slope, a region characterized by marked climate seasonality. This work implemented a hydrological model forced with satellite data and stable water isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) as tracers to refine the internal representation of hydrological processes and enhance the assessment of extreme events.

The HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model was utilized—a semi-distributed conceptual model that allows the integration of non-reactive tracers, such as isotopes, and features multi-objective calibration capabilities to leverage existing information from diverse sources. To strengthen the model, free-access daily remote sensing and global climate products were used, including CHIRPS V2.0, ERA5, and MOD16; land cover and soil properties were derived from CCI Land Cover and SoilGrids, covering the period from 1990 to 2023. Additionally, rainfall isotopic records collected in the city of Liberia between 2014 and 2021 were incorporated. For model calibration, streamflow data from two hydrometric stations and sporadic isotope measurements in the flow of the Tempisque and Colorado rivers (obtained between 2018 and 2021) were included.

Observations showed that the model calibrated solely with streamflow achieved an acceptable fit based on the Kling-Gupta Efficiency ($\text{KGE} = 0.61$); however, joint calibration with isotopes substantially improved the simulation of baseflow, demonstrating the

capacity of isotopes to enhance the representation of subsurface processes. Nevertheless, this improvement did not extend to the representation of peak flows during the most severe storms. The model successfully captured the isotopic dynamics and baseflow behavior of the Tempisque River with greater fidelity, suggesting a strong influence of groundwater on its baseflow.

The analysis of extreme hydrological events derived from the modeling indicated that, during the study period, the Tempisque River basin has experienced more severe droughts than floods. Geographically, the northern and central areas of the basin were the most affected in both cases. The most extreme drought event, associated with the 2015-2016 El Niño, lasted 18 months and generated an accumulated streamflow deficit of approximately 600 mm. Regarding floods, the peak flow associated with a 50-year return period was exceeded once in 2017, linked to La Niña and Tropical Storm Nate.

In conclusion, this work highlights the value of integrating stable isotopes and remote sensing data into hydrological modeling. This hybrid approach improves baseflow simulation for hydrological drought analysis and represents a robust tool for assessing droughts and floods in dry tropical regions with limited data, supporting sustainable water resource management and planning for climate change scenarios and extreme events.

I. Introducción

Costa Rica es reconocido por su alta diversidad biológica y climática, en la que una gestión sostenible de sus recursos hídricos es clave para salvaguardar sus ecosistemas y servicios ambientales. En particular, la cuenca del río Tempisque, localizada en la pendiente del Pacífico Norte, representa uno de los sistemas hidrológicos más relevantes del país por su extensión, productividad agrícola y valor ecológico (Solís, 2023). Esta región forma parte de los trópicos secos de Costa Rica, caracterizados por una marcada estacionalidad y una fuerte dependencia de la precipitación como fuente de recarga hídrica subterránea. Sin embargo, en las últimas décadas se ha observado una disminución en las lluvias y un aumento sostenido en la temperatura media, condiciones que intensifican las sequías y a los eventos de inundación (MINAE, 2020; PNUD, 2019).

Los fenómenos hidrometeorológicos extremos como las sequías y las inundaciones constituyen una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible y el bienestar social de las poblaciones. Aunque estos eventos son parte natural de la variabilidad climática, su frecuencia e intensidad se han visto amplificadas por el cambio climático y por la influencia de fenómenos globales como el de El Niño – Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), el cual altera significativamente la distribución temporal y espacial de la precipitación (McPhanden et al., 2006). Esta vulnerabilidad es particularmente evidente en la cuenca del río Tempisque, donde los periodos de sequía extrema suelen ser seguidos por lluvias torrenciales que ocasionan inundaciones repentinas, afectando a comunidades agrícolas.

No obstante, la caracterización de estos fenómenos se ve obstaculizada por varios factores: las diferencias en temporalidad y tipo de análisis, ya que las inundaciones ocurren en periodos de unos pocos minutos u horas y sus efectos son inmediatos, mientras que las sequías se perciben a escalas mensuales y sus efectos son más bien acumulativos; y, por otro lado, la escasez de registros hidroclimatológicos continuos, un problema común en muchas zonas tropicales y particularmente en Latinoamérica.

Frente a esta limitación, la hidrología de las últimas décadas ha incorporado herramientas de percepción remota y modelado numérico para suplir la falta de observaciones *in situ*. Productos satelitales como Climate Hazards Center Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) (Funk et al., 2015) y el reanálisis de quinta generación del ECMWF para el clima y el tiempo global (ERA5) (Boogaard et al., 2020) permiten obtener estimaciones consistentes de la precipitación y temperatura, las cuales son fundamentales para alimentar modelos hidrológicos.

Sin embargo, incluso los modelos más avanzados suelen presentar dificultades para representar simultáneamente la dinámica de las sequías e inundaciones, ya que una calibración basada únicamente en el caudal (práctica común en la mayoría de los estudios) tiende a reproducir los volúmenes totales de esorrentía, pero no necesariamente los procesos internos que regulan el almacenamiento y la descarga subterránea, necesarios para el análisis de sequías hidrológicas. En este contexto, el uso de trazadores isotópicos estables ($\delta^2H, \delta^{18}O$) ha emergido como una herramienta innovadora para mejorar la representación de los procesos hidrológicos en modelos predictivos.

La integración de isótopos estables y datos de percepción remota en la modelación hidrológica constituye, por lo tanto, una estrategia para el análisis de eventos extremos en regiones con información limitada (Wohl et al. 2012; Arciniega-Esparza et al. 2022; Birkel et al. 2025). Esta metodología no solo mejora la representación de los procesos de recarga y descarga, sino que también permite evaluar con mayor precisión la duración, magnitud y frecuencia de las sequías e inundaciones (Luo et al. 2025).

En la cuenca del río Tempisque, esta aproximación adquiere especial relevancia debido a su importancia socioeconómica y su alta vulnerabilidad de sus sistemas agrícolas frente a la variabilidad climática. Este trabajo busca demostrar que la calibración multi-objetivo combinando datos de caudal con isótopos permite refinar la simulación hidrológica para fortalecer el análisis y la interpretación de fenómenos extremos. El enfoque propuesto, que combina la percepción remota y trazadores isotópicos, no solo pretende llenar un vacío de información crítica, sino también fundamentar un precedente

metodológico para la evaluación robusta de riesgos hídricos y el diseño de estrategias de adaptación en regiones tropicales estacionalmente secas bajo un clima cambiante.

I.1 Objetivos

Objetivo general

Acoplar datos de isótopos estables ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) de agua de lluvia y de caudal a un modelo hidrológico semidistribuido para mejorar la representación de los procesos hidrológicos en la cuenca del río Tempisque, ubicada en los trópicos secos de Costa Rica, y usar los resultados de este modelo para caracterizar los eventos extremos de sequías e inundaciones para un periodo de 1990 al 2023.

Objetivos específicos

- Delimitar y caracterizar la cuenca y las subcuencas del río Tempisque.
- Construir un modelo hidrológico semidistribuido de la cuenca con el código HYPE.
- Incorporar datos de percepción remota y productos globales para correr el modelo.
- Comparar la calibración del modelo implementando únicamente datos de caudal contra datos de caudal y de su composición isotópica.
- Caracterizar la duración, magnitud e intensidad de los eventos de sequía meteorológica e hidrológica a la escala mensual.
- Caracterizar y evaluar la ocurrencia de eventos máximos de caudal diario.
- Evaluar los beneficios de la implementación de isótopos estables de agua para el análisis de eventos extremos.

II. Marco teórico

II.1 Sequías e inundaciones

La sequía es un fenómeno climático complejo y difícil de predecir, caracterizado por una reducción sostenida de la precipitación respecto a los valores históricos (Sutanto et al., 2021). Este déficit hídrico afecta negativamente tanto a los ecosistemas como a las

actividades humanas, impactando de manera significativa en las sociedades y las economías.

La sequía puede manifestarse de distintas formas y con diferentes grados de intensidad (Van Loon et al., 2016):

- Meteorológica, la cual se refiere a la falta de precipitación. Está asociada al aumento de temperatura y a una mayor evapotranspiración en relación con la cantidad de lluvia.
- Agrícola, que se refiere al estrés hídrico en los cultivos, por lo que, el déficit en la humedad del suelo impacta negativamente en el rendimiento del cultivo, y en algunos casos, no es suficiente para producir una cosecha.
- Hidrológica, que hace referencia a la disminución respecto al promedio mensual o anual de los escurrimientos superficiales, los niveles de agua en lagos, así como en los niveles piezométricos. (CONAGUA, 2014).
- Socioeconómica se presenta cuando la disponibilidad de agua no es suficiente para satisfacer las actividades humanas y los requerimientos del ecosistema. Su manifestación varía según su tipo de uso, así como la densidad y distribución de los usuarios del territorio (Meng et al., 2025).

Debido a su progresión lenta y su complejidad, la sequía resulta difícil de detectar, monitorear y delimitar temporalmente, lo que representa un verdadero reto para su gestión (Van Loon et al., 2024).

Pese a su carácter natural, la sequía adquiere mayor relevancia en territorios donde la presión sobre los recursos hídricos es alta, ya sea por el crecimiento poblacional, por la demanda agrícola y ganadera o por la producción energética. Las sequías están asociadas a variaciones en la circulación general de la atmósfera, aumentos en la temperatura oceánica, cambios en la radiación solar reflejada en la superficie terrestre, las cuales son amplificadas por las altas concentraciones de gases de efecto invernadero (OMS, 2023). La influencia de fenómenos climáticos globales, como lo es ENSO, que se manifiesta mediante un calentamiento anómalo de la superficie del mar en el Pacífico

ecuatorial, puede intensificar los eventos de sequía al modificar el régimen de lluvias, alterar la circulación atmosférica y reducir el transporte de humedad (García-Jiménez et al., 2014).

En comparación con otros fenómenos meteorológicos de aparición repentina, como tormentas, tornados, granizadas, entre otros, la sequía se desarrolla lentamente, logrando extenderse durante semanas, meses e incluso años y causando un gran impacto en las regiones. Aunque tradicionalmente se ha considerado un evento cíclico, en la actualidad se percibe un aumento en su frecuencia e intensidad, posiblemente asociado al cambio climático (Zaveri et al. 2023). Dada esta situación, el análisis de sequías requiere de enfoques metodológicos adecuados al objetivo de estudio. En los últimos años se ha avanzado notablemente en su evaluación mediante herramientas tecnológicas como el aprendizaje automático, el cual permite una mejor caracterización y previsión de estos fenómenos naturales complejos (Nandgude et al., 2023), así como el uso de datos satelitales para su monitoreo en grandes regiones (Real-Rangel et al., 2020).

De acuerdo con Hao & AghaKouchak (2013) y con Brunner (2023), la evaluación de eventos extremos hidrológicos requiere ir más allá de los análisis univariados para capturar su naturaleza multivariada y compuesta. No obstante, los índices estandarizados univariados, como el SPI (Standardized Precipitation Index) y el SRI (Standardized Runoff Index), constituyen la base fundamental para la identificación y monitoreo inicial de los periodos de sequía.

Por otro lado, la inundación se define como un evento natural que ocurre cuando el caudal de un cauce excede la capacidad hidráulica de este, provocando un desbordamiento y la ocupación temporal de áreas cercanas normalmente secas (Luino, 2016). Este fenómeno depende de factores como el volumen y la velocidad del flujo, la duración del evento, la capacidad de retención de la cuenca y la morfología del terreno. Las inundaciones constituyen uno de los riesgos hidrometeorológicos más relevantes con gran impacto a nivel mundial (Balasubramanian, 2005), siendo en México uno de los

fenómenos que causan más daños económicos y afectaciones a personas (según datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2016)).

Pese a tratarse de eventos extremos opuestos (déficit y exceso hídrico en las sequías y en las inundaciones, respectivamente), se ha observado que estos pueden ocurrir de manera sucesiva, o incluso de manera simultánea, es decir, que durante un periodo de sequía se presente una inundación que por sí sola no sea suficiente para terminar con el déficit hídrico. Por otro lado, el análisis de estos eventos se realiza, en la mayoría de los casos, de forma separada, debido principalmente a las diferencias en la escala espacial y temporal de ocurrencia. Trabajos recientes resaltan la importancia y los retos de analizar estos eventos de forma conjunta (Brunner, 2023).

II.2 Modelación hidrológica para el análisis de eventos extremos

La modelación hidrológica ha sido fundamental para el análisis de eventos extremos, ya que mediante estas herramientas se pueden reproducir los impactos de los fenómenos hidrometeorológicos que no fueron observados; también permite generar escenarios futuros y evaluar la influencia de varios procesos hidrológicos en la magnitud de los eventos extremos (Van Kempen et al., 2021; Peredo et al., 2022).

Existe una gran diversidad de modelos hidrológicos para reproducir las principales componentes del ciclo hidrológico, clasificados en función de su aleatoriedad (deterministas, estocásticos), su discretización espacial (agregados, semidistribuidos y distribuidos) y su representación matemática (empíricos, conceptuales y físicos) (Birkel y Correa-Barahona, 2019). De este conjunto, los modelos conceptuales o semidistribuidos conceptuales basados en procesos han tenido gran aplicación debido a su flexibilidad para adaptarse a distintas condiciones hidrológicas (Koben et al., 2019).

No obstante, los modelos hidrológicos requieren de una gran cantidad de información climatológica, topográfica, de uso de suelo, registros hidrométricos, entre otros. La tendencia en muchas partes del mundo es que la operación de las estaciones de monitoreo climatológico e hidrológico va en descenso, principalmente en zonas tropicales

de Latinoamérica (Wohl et al., 2012), lo cual dificulta la aplicación de este tipo de modelos.

En Costa Rica se han aplicado diferentes modelos hidrológicos para la evaluación de recursos hídricos a escala de cuenca hidrográfica (Westenberg y Birkel, 2015; Birkel et al., 2012; Gómez-Delgado et al., 2011) y a escala regional (Arciniega-Esparza et al., 2022), así como para el análisis de eventos extremos (Hidalgo et al., 2024; Venegas-Cordero et al., 2021).

II.3 Percepción remota aplicada a la hidrología

La percepción remota, también conocida como teledetección, es una herramienta fundamental en el estudio de procesos hidrológicos y eventos extremos como sequías e inundaciones, particularmente en regiones tropicales con alta variabilidad climática y limitada cobertura de datos in situ (McCabe et al., 2017). Esta técnica se basa en la recopilación e interpretación de información sobre la superficie terrestre a partir de sensores montados en plataformas aéreas o satelitales (Chen y Wang, 2018). Dichos sensores registran datos en distintas regiones del espectro electromagnético, incluyendo el visible, infrarrojo cercano, infrarrojo térmico y microondas, generando productos multiespectrales o hiperespectrales con diferentes resoluciones espaciales, temporales, espectrales y radiométricas, dependiendo del satélite y del objetivo del estudio (Sanderson, 1982). Estos productos pueden abarcar escalas locales, regionales e incluso globales, además, de que pueden encontrarse a diferentes escalas temporales: diaria, semanal, mensual o anual.

En el ámbito hidrológico, la percepción remota permite monitorear o estimar variables clave como la precipitación, temperatura, humedad del suelo, evapotranspiración, cobertura vegetal y cambios en el uso del suelo (Pan et al., 2019; McCabe et al., 2017). Estos parámetros son fundamentales para alimentar y calibrar modelos hidrológicos, especialmente en cuencas donde la instrumentación es escasa o inexistente. Asimismo, los datos satelitales permiten analizar el comportamiento hidrológico a distintas escalas

espaciales y temporales, facilitando la identificación de tendencias, anomalías y respuestas del sistema hidrológico ante eventos extremos.

Una de las principales ventajas de la percepción remota es su capacidad para proporcionar información continua, sistemática y de cobertura global, incluso en regiones remotas donde no existen estaciones de medición (Ndehedehe, 2022). Esta capacidad la convierte en una herramienta indispensable para la gestión de los recursos hídricos, el análisis de riesgo y la evaluación del impacto del cambio climático. Además, al integrar información satelital con otras fuentes de datos, como trazadores isotópicos o series hidrometeorológicas, se fortalece la comprensión de los procesos que gobiernan el ciclo hidrológico y se mejora la precisión de las simulaciones en entornos complejos y vulnerables.

II.4 Acoplamiento de isótopos estables en modelos hidrológicos

Los isótopos estables de agua corresponden a moléculas de agua en las que alguno de sus átomos tiene una variación en el número de neutrones de sus núcleos, siendo las variantes más utilizadas en hidrología e hidrogeología el átomo de hidrógeno con dos neutrones (deuterio, δ^2H) y el átomo de oxígeno con 18 neutrones ($\delta^{18}O$). Una molécula de agua compuesta por estos isótopos mantiene básicamente las mismas propiedades físicas y químicas del agua común, pero al ser átomos más escasos que los convencionales, permiten utilizarlos como trazadores ambientales no reactivos en estudios climáticos, paleoclimáticos, así como en el análisis del origen, flujo y residencia del agua en sistemas terrestres (Birkel et al., 2025).

La incorporación de isótopos estables de agua ($\delta^2H, \delta^{18}O$) en modelos hidrológicos ha sido una tendencia de la última década gracias a las mejoras tecnológicas para el análisis de isótopos y al desarrollo de modelos que permiten incorporar esta información como trazadores no reactivos (Birkel et al., 2025; Birkel y Soulsby, 2015). Diversas investigaciones han resaltado que el acoplamiento de isótopos estables en el modelado hidrológico mejora la representación del almacenamiento del agua en el subsuelo y acuíferos, fuentes y rutas de agua, procesos de mezcla y edades del agua, entre otras

(Jung et al., 2025; Arciniega-Esparza et al., 2023; Dehaspe et al., 2018; Birkel y Soulsby, 2015).

Pese a las ventajas que ofrece este tipo de metodologías, existen retos y limitaciones en la incorporación de isótopos en el modelado: el costo del monitoreo, la cobertura espacial y temporal, la capacidad de los modelos para simular procesos de mezcla, entre otros (Jung et al., 2025). Por otro lado, las ventajas del uso de trazadores en el análisis de eventos extremos no han sido abordadas a profundidad, por lo que representa un área de investigación y aplicación que se encuentra en crecimiento.

III. Descripción de la zona de estudio

III.1 Descripción general

La cuenca del Río Tempisque se localiza al noroeste de Costa Rica (Figura 1). Este país presenta una extensión territorial de 51,100 km² ubicado en Centroamérica entre las latitudes 8° 13' 43" N 11° 14' 2" N y las longitudes 82° 28' 34" W y 85° 57' 30" W, además de estar situado entre el océano Pacífico y el mar Caribe, compartiendo frontera al norte con Nicaragua y al sur con Panamá. Costa Rica se encuentra en una zona de convergencia tectónica activa, influenciada principalmente por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe. Esta dinámica ha moldeado el relieve costarricense, dando lugar a diversas unidades morfotectónicas que incluyen cadenas montañosas, depresiones tectónicas y planicies costeras (Mora, 1981; Quesada-Román, 2021).

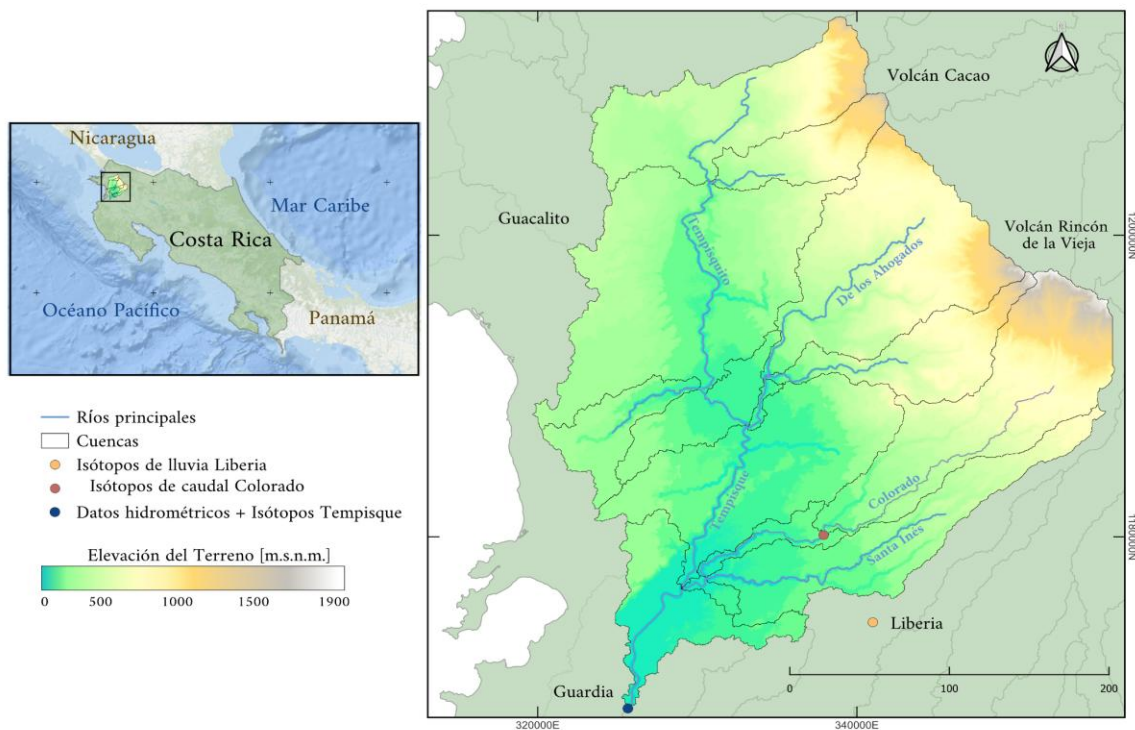


Figura 1. Ubicación de la cuenca Tempisque, al noroeste de Costa Rica.

La cuenca del río Tempisque se encuentra entre las latitudes $10^{\circ} 34' 2''$ N a $10^{\circ} 59' 25''$ N, y longitudes: $85^{\circ} 38' 6''$ W a $85^{\circ} 18' 25''$ W (Figura 1) y cuenta con una extensión territorial de aproximadamente 937.6 km². La cuenca forma parte de la Depresión de Guanacaste, delimitada por el Complejo de Nicoya al oeste y la Cordillera Volcánica de Guanacaste al norte. Su elevación de terreno varía en un rango de 0 a 1,900 m s.n.m., en la que los valores más bajos corresponden al encauce de los ríos secundarios hacia el río Tempisque, el cual atraviesa la localidad de Guardia, y los valores más altos coinciden con los volcanes Cacao y Rincón de la Vieja.

III.2 Características geológicas regionales

Dada su ubicación geográfica, el territorio de Costa Rica sobreyace tres placas tectónicas y una microplaca, como son la placa del Caribe, la placa de Cocos, la placa de Nazca y la microplaca de Panamá; debido a esto, en su geología predominan los procesos tectónicos y volcánicos, dando como resultado que su territorio esté compuesto en un 50% por rocas volcánicas (derrames de lava subalcalinas a alcalinas y rocas

piroclásticas), un 45% por rocas sedimentarias y sedimentos (derrames de lava subalcalinas a alcalinas y rocas piroclásticas), un 3% por rocas metamórficas (principalmente serpentinita y hornfels), y un 2% de rocas ígneas intrusivas (granitos a gabros) (Alvarado, 2021).

La evolución geológica de Costa Rica ha sido moldeada por eventos tectónicos y volcánicos a lo largo de millones de años (Figura 2). En el Jurásico Inferior (201-174 Ma), se inició la sedimentación pelágica en el paleo-Pacífico, estableciendo la base geológica de la región. Posteriormente, en el Jurásico Superior (163.5-145.3 Ma), se registraron eventos de vulcanismo submarino, lo que indicó una intensa actividad geodinámica.

Durante el Cretácico Inferior (145 - 100.5 Ma), se formó la Provincia ígnea del Caribe (CLIP) debido al intenso vulcanismo submarino. En el Paleoceno (66 - 56 Ma), el levantamiento tectónico y el descenso del nivel del mar permitieron el desarrollo de plataformas carbonatadas y arcos insulares. El Eoceno (56-33.9 Ma) marcó una transición con sedimentación pelágica retrabajada.

Durante el Oligoceno (33.9 - 23 Ma), el norte de Costa Rica se elevó y fue erosionando mientras el sur continuó sedimentándose. En el Mioceno (23-5.3 Ma), emergió la Cordillera Central por actividad tectónica y volcánica. El cierre del Istmo de Panamá en el Plioceno (5.3-2.58 Ma) alteró las corrientes oceánicas, el clima y activó el vulcanismo en Talamanca.

En el Pleistoceno (2.58 - 0.01 Ma), ocurrió el levantamiento y exhumación de la Cordillera de Talamanca, acompañados por la acumulación de nieve y la formación glacial en esta cordillera. Además, el *Cocos Ridge* llegó a la trinchera de Costa Rica, influenciando la actividad tectónica. Finalmente, en el Holoceno (0.0117-0 Ma), se produjo la llegada de los primeros amerindios (~16 Ma) y se configuró el paisaje costarricense actual (Alvarado et al., 2024).

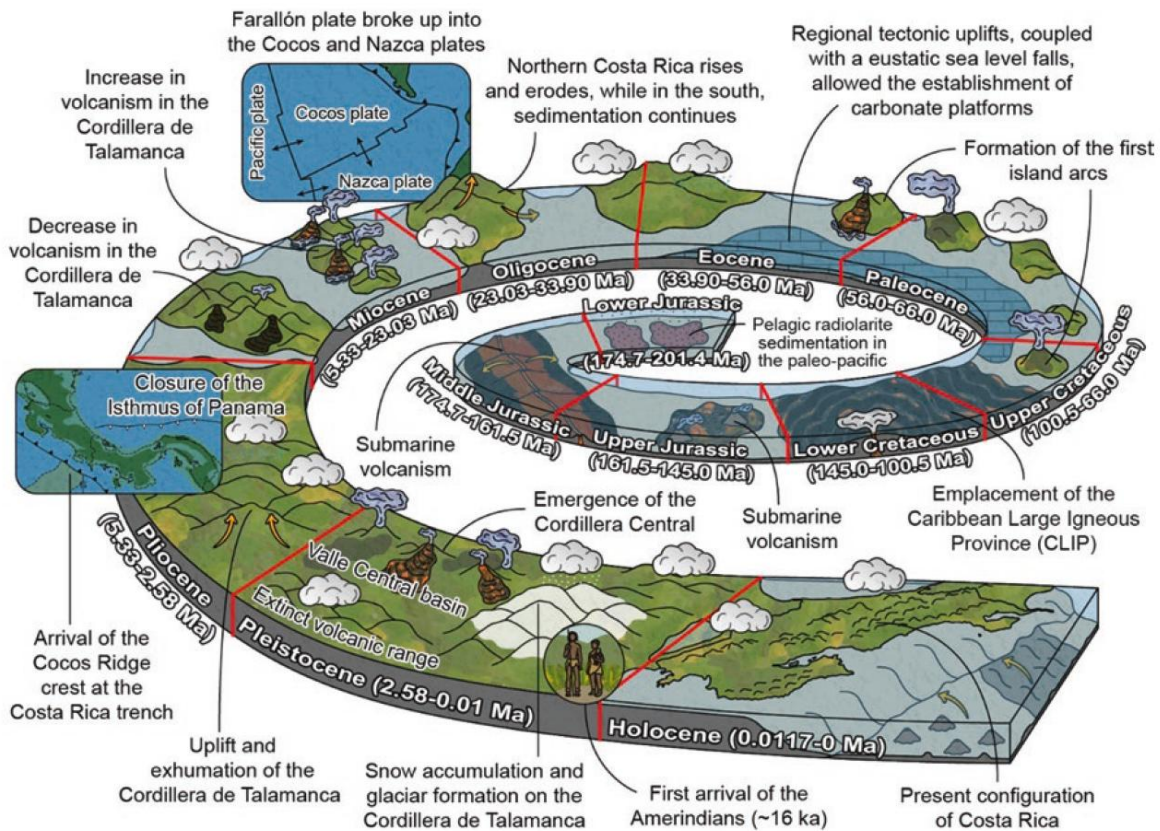


Figura 2. El tiempo geológico y algunos acontecimientos relevantes en la historia geológica de Costa Rica. Fuente: Alvarado et al. (2024).

El complejo Nicoya contiene las rocas más antiguas formadas por subducción. Las cordilleras de Guanacaste, Tilarán, Central y Talamanca conforman las principales unidades montañosas, con actividad volcánica actual en el noroeste y suroeste del país.

La cordillera de Guanacaste es una zona estructuralmente controlada por fallas tectónicas. Sus rocas volcánicas más antiguas consisten en un apilamiento de depósitos de flujos piroclásticos (ignimbritas) con flujos de lava menores intercalados y sedimentos terrígenos y parálcos de edad comprendida entre el Mioceno superior (8 Ma) y el Pleistoceno medio, unos 0.6 Ma (Alvarado et al., 1992; Carr et al., 2007; Alvarado y Gans, 2012).

Los ríos que drenan la cordillera volcánica han excavado profundos valles y cañones (por ejemplo, el río Liberia) en la meseta. Debido al levantamiento tectónico desde el

Plioceno, varios ríos cerca de la costa del Pacífico drenaron hacia el río Tempisque en lugar de tomar un camino más recto hacia el océano (Madrigal y Rojas, 1980).

La evolución geológica de esta cuenca está ligada a la actividad tectónica regional y a procesos de sedimentación fluvial y marina. Esta cuenca ha sido moldeada por la acumulación de sedimentos provenientes de las montañas circundantes y por la influencia de eventos tectónicos que han generado cambios en su morfología.

En términos geomorfológicos, la cuenca del río Tempisque presenta un gradiente desde áreas montañosas en la parte alta, asociadas a actividad volcánica reciente, hasta zonas de acumulación de sedimentos en la llanura aluvial y taurina del sector inferior. Esta configuración refleja la interacción entre procesos volcánicos, tectónicos y fluviales que han actuado durante el Cuaternario, conformando una unidad geológica diversa y dinámica.

III.3 Fenómenos hidrometeorológicos asociados a eventos extremos

El fenómeno “El Niño-Oscilación del Sur” (ENSO) es un patrón climático natural y recurrente del Pacífico tropical, que ocurre de manera irregular cada 2 a 7 años. Este fenómeno altera la temperatura del océano, los patrones de viento y las precipitaciones en los trópicos, generando impactos climáticos a escala global.

ENSO presenta dos fases principales: El Niño, caracterizado por un calentamiento anómalo de la temperatura superficial del mar (TSM) en el centro y este del Océano Pacífico tropical, y La Niña, asociada a un enfriamiento anómalo en la misma región. Estas variaciones están vinculadas a cambios en la intensidad de los vientos alisios, corrientes de aire más cercanos a la superficie terrestre que soplan de este a oeste del Ecuador, en el Pacífico. Debido a su influencia sobre el clima estacional del mayor océano del planeta, ENSO actúa como una teleconexión atmosférica que afecta de manera diversa a distintas regiones del mundo (McPhaden et al., 2006).

En Costa Rica, el fenómeno ENSO actúa como modulador crítico del clima, cuyos impactos varían según su intensidad y fase. La red de monitoreo hidrológico nacional ha

registrado eventos extremos, como los episodios de El Niño (2014-2016 y 2018-2020) y La Niña (2016-2028 y 2020-2022), los cuales han definido patrones geográficos específicos de escasez hídrica en el país (Morataya-Montenegro y Bautista-Solís, 2020; Sánchez-Murillo et al., 2017). Esta influencia es particularmente crítica en la cuenca del río Tempisque, donde la fase cálida (El Niño) intensifica las sequías, agravando la vulnerabilidad de una región con alta demanda hídrica agropecuaria. Por otra parte, la fase fría (La Niña) se asocia con un incremento de las precipitaciones en el Pacífico costarricense, alterando las crecidas e inundaciones en la zona (Guzmán et al., 2024).

III.4 Características hidrográficas y climatológicas

La hidrografía de Costa Rica es compleja, en donde de acuerdo con Rojas et al. (2011) se ha delimitado en 34 cuencas hidrográficas, distribuidas en dos vertientes principales: Caribe, Pacífico Norte. En la vertiente del Pacífico Norte, destaca la cuenca del Río Tempisque, considerada la más importante de esta región por su extensión, funcionalidad ecológica y relevancia en actividades económicas como la agricultura y la ganadería. En el río Tempisque desembocan ríos significativos como el Tempisquito, Ahogados, Colorado y Quebrada Honda.

El régimen de precipitaciones se caracteriza por una estación seca que va de enero a abril. El periodo de precipitaciones se extiende de mayo a diciembre (Chavarría-Pizarra et al., 2024). Las precipitaciones anuales oscilan entre 1,080 y 2,402 mm y la temperatura del aire promedio varía entre 22 °C y 28 °C. El clima en esta región del Pacífico Norte se clasifica como tropical seco (Aw), según la clasificación de Köppen, influenciado por la interacción de los vientos alisios y fenómenos globales como El Niño y La Niña, los cuales alteran los patrones estacionales de precipitación y temperatura (McPhaden et al., 2006).

En las últimas décadas, Costa Rica ha experimentado un aumento en la temperatura media, así como cambios en la distribución y cantidad de precipitaciones, lo cual ha incrementado la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como sequías e inundaciones (PNUD, 2019; MINAE, 2020). La cuenca del río Tempisque es particularmente vulnerable a estos cambios, registrando una reducción en las lluvias y

mayor estrés hídrico, lo que afecta directamente la disponibilidad de agua, los ecosistemas locales y la producción agrícola.

El régimen climático en la cuenca del río Tempisque está marcado por la entrada de vientos del océano Pacífico y del mar Caribe, no obstante, en las partes altas de la cuenca dominan los vientos provenientes del mar Caribe, los cuales, al ascender por los volcanes Rincón de la Vieja y Volcán Cacao, generan precipitación y recarga en las zonas altas. Este efecto orográfico crea un intenso gradiente isotópico, el cual provoca que zonas más cercanas al Caribe tengan concentraciones isotópicas más enriquecidas que las zonas bajas, incluso en eventos de lluvia simultáneos (Sánchez-Murillo y Birkel, 2016).

III.5 Uso de suelo

La Figura 3 muestra la evolución del uso de suelo de la cuenca del río Tempisque durante los años 1989, 1999, 2009 y 2020, presentando cambios significativos principalmente en la cobertura vegetal y los cultivos agrícolas. Las imágenes de uso de suelo fueron derivadas de imágenes satelitales multiespectrales de Landsat, proporcionadas por el Dr. Ricardo Sánchez-Murillo (comunicación personal, 2025), investigador asociado en la Universidad de Texas en Arlington.

En 1989, la cuenca estaba dominada por pastizales (63.6%), seguido de bosques (35.2%), mientras que los cultivos agrícolas y las áreas urbanas no tenían un porcentaje representativo. En 1999 los pastizales disminuyeron casi un 10% respecto al primer año de medición y los cultivos se expandieron considerablemente, pasando de menos de 1 a 11%. Debido a las estrategias de preservación de bosques y áreas naturales en Costa Rica (MINAE-SINAC, 2010), para el 2009 se observa un aumento considerable en los bosques con un porcentaje medio de 55.7%, mientras que los cultivos y pastizales descendieron en su cobertura. Finalmente, en 2020, los pastizales tuvieron una cobertura del 51.8% con las áreas de cultivos abarcando menos del 3% de la superficie total de la cuenca.

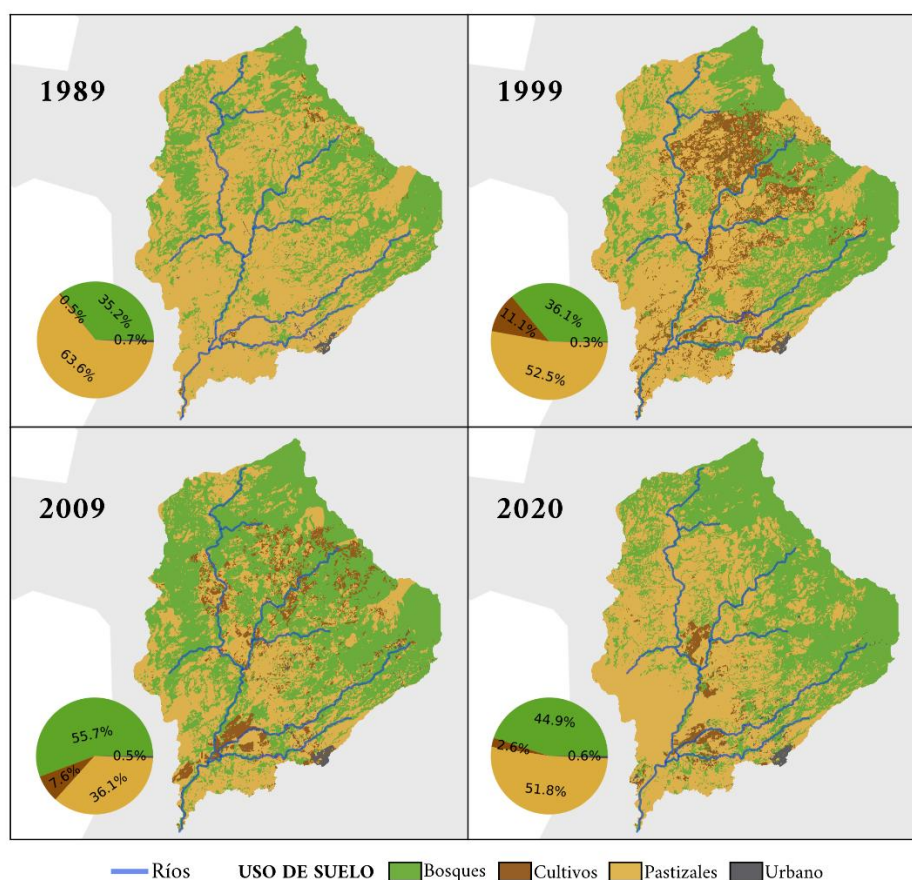


Figura 3. Evolución del uso de suelo en la cuenca del río Tempisque derivada de imágenes satelitales.

El análisis completo del uso de suelo muestra que la cuenca del río Tempisque ha experimentado distintas variaciones marcadas entre la expansión de pastizales y la recuperación de bosques, con una actividad agrícola variable y una urbanización limitada a lo largo de 3 décadas. Estos cambios en el uso de suelo se relacionan directamente con las dinámicas productivas de la cuenca, especialmente al sur y centro. En esta zona, cerca de Liberia, se cultivan principalmente arroz y caña de azúcar; dichas actividades alteran el balance hídrico e isotópico por las actividades de riego y los flujos de retorno de agua al subsuelo, modificando así la composición isotópica del agua que descarga en el río (R. Sánchez, comunicación personal, 30 de junio de 2025).

IV. Bases de datos y metodología

En este apartado se describen las bases de datos utilizadas, el procesamiento aplicado a los datos y la metodología empleada para generar los resultados analizados en este estudio (véase la Figura 4).

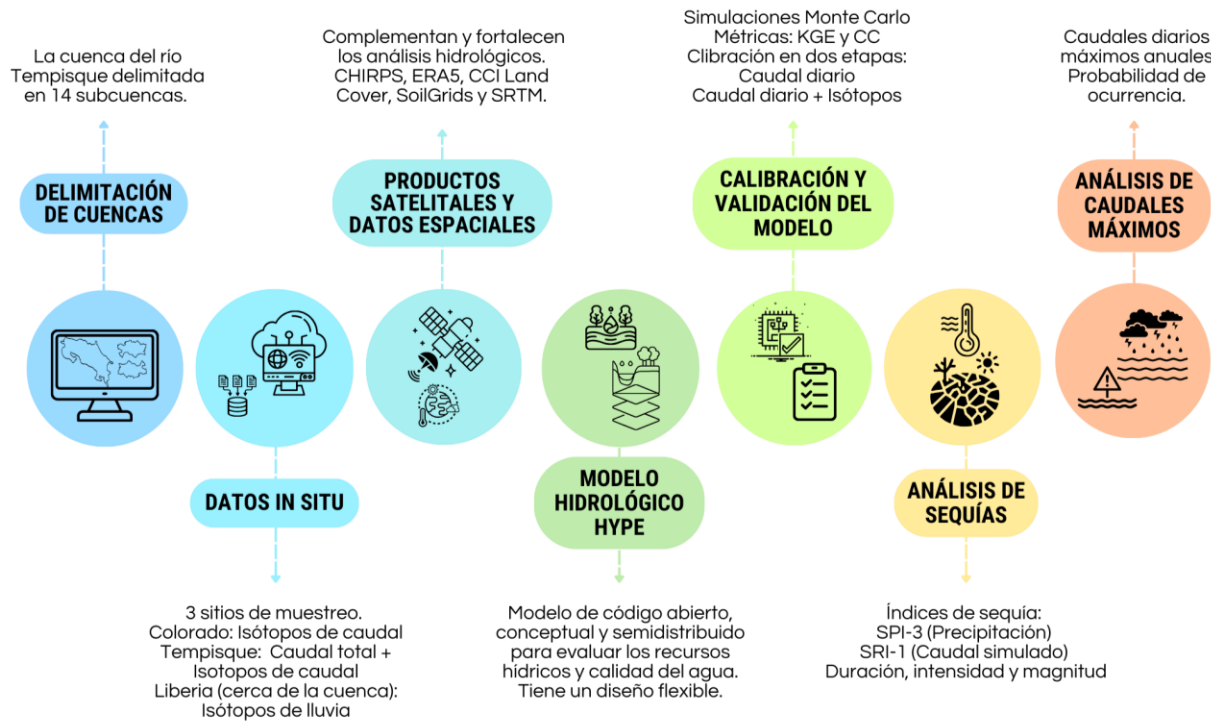


Figura 4. Diagrama general de la metodología aplicada.

IV.1 Delimitación de cuencas

El área total de la cuenca del río Tempisque fue dividida en subcuencas para propósitos del modelo hidrológico. Para esto, se implementó el producto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Balmer, 1999), un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) a escala global con 90 m de resolución espacial. Este DEM, fue procesado en el programa System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) GIS V9.1, un sistema de información geográfica para propósitos de análisis científico con un amplio catálogo de algoritmos de análisis espacial (Conrad et al., 2015). A partir de SAGA GIS se

realizaron correcciones al DEM para remover sumideros, determinar la dirección de flujo y obtener la acumulación de flujo y la red hídrica de la cuenca del río Tempisque. Las subcuencas fueron finalmente delimitadas a partir de la ubicación de puntos de muestreo y de la bifurcación de dos o más ríos.

De este proceso se delimitaron 14 subcuencas, tal y como se muestran en la Figura 1, cuyas principales propiedades geomorfológicas e indicadores (ID) se muestran en la Tabla 1, incluyendo las propiedades de la cuenca total del río Tempisque. De este conjunto de subcuencas, la del ID 14 corresponde a la subcuenca más baja de descarga final de la cuenca del río Tempisque.

Tabla 1. Propiedades de las subcuencas y de la cuenca total.

ID	ÁREA [km ²]	PERÍMETRO [km]	Yc [°]	Xc [°]	ELEVACIÓN [m s.n.m.]
1	92.0	75.4	-85.492	10.899	431.2
2	34.8	41.9	-85.386	10.748	581.5
3	118.4	82.5	-85.445	10.834	634.2
4	133.4	79.9	-85.424	10.778	542.8
5	50.4	63.8	-85.448	10.668	536.6
6	30.1	47.2	-85.537	10.923	153.8
7	180.2	109.7	-85.603	10.731	196.4
8	2.4	14.0	-85.562	10.82	64.9
9	32.7	50.5	-85.516	10.748	107.0
10	12.1	38.4	-85.553	10.741	75.3
11	80.7	93.4	-85.507	10.667	196.8
12	4.0	15.5	-85.542	10.633	54.2
13	116.0	87.5	-85.515	10.71	127.9
14	50.7	76.3	-85.566	10.627	76.5
Total	937.6	221.6	-85.495	10.778	334.6

IV.2 Bases de datos

Para el entrenamiento del modelo hidrológico se utilizaron datos de dos sitios de muestreo (Figura 1), uno de ellos sobre el río Tempisque a la salida de la subcuenca con

ID 14 con mediciones de caudal y de isótopos de caudal. El segundo punto de muestreo se ubicó sobre el río Colorado, a la salida de la subcuenca con ID 3, la cual contó con mediciones de isótopos de caudal. Adicionalmente, se recopilaron isótopos estables de agua de lluvia a las afueras de la cuenca, cerca de la ciudad de Liberia (Figura 1), cuyo registro sirvió de entrada para correr el modelo. En la Tabla 2 se presenta la ubicación geográfica de cada sitio, junto con las variables registradas y el periodo de observación correspondiente.

Los sitios de muestreo se encuentran ubicados en zonas representativas del régimen hídrico de la cuenca del río Tempisque y cuentan con una cobertura temporal lo suficientemente amplia como para analizar las tendencias y la variabilidad de los fenómenos climáticos e hidrológicos. La información del sitio identificado con el ID 3 es útil para evaluar procesos como la recarga y el flujo subsuperficial del agua, mientras que el sitio con ID 14 proporciona datos de caudal que fueron empleados para el análisis de series hidrológicas. Por otra parte, la estación de Liberia (en una cuenca adyacente a la del Río Tempisque) aporta datos fundamentales para simular los procesos de almacenamiento y descarga de agua de la cuenca.

Las muestras fueron recolectadas de manera semanal en las estaciones Liberia y Colorado mediante colectores *Palmex RS1*, con apoyo de instituciones como el Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC) y parques nacionales en Costa Rica. Las mediciones isotópicas permiten estudiar la recarga, evaporación y mezcla de diferentes fuentes de agua dentro de la cuenca.

Tabla 2. Sitios de muestreo. En donde Q_t es el caudal total, $Q_t [\delta^2H, \delta^{18}O]$ son los isótopos estables de agua en caudal, $P [\delta^2H, \delta^{18}O]$ son los isótopos estables de agua de lluvia.

ID	ESTACIÓN	X	Y	VARIABLE	PERIODO
3	Colorado	-85.481372	10.668992	$Q_t[\delta^2H, \delta^{18}O]$	2018 - 2021
14	Tempisque	-85.592882	10.564515	$Q_t,$ $Q_t[\delta^2H, \delta^{18}O]$	1990 - 2003, 2018 - 2021
-	Liberia	-85.453036	10.616686	$P [\delta^2H, \delta^{18}O]$	2014 - 2021

Además de los datos *in situ*, se incorpora una variedad de conjuntos de datos satelitales y productos derivados de modelos globales con el objetivo de complementar y fortalecer los análisis hidrológicos y climáticos. Estos conjuntos de datos se consideraron en función de su cobertura temporal, las resoluciones espacial y temporal, así como su disponibilidad para descarga.

Se utilizaron productos gratuitos de diversas fuentes de información para correr y evaluar el modelo (Tabla 3). Los datos climáticos de precipitación de entrada al modelo provienen del conjunto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) versión 2, el cual proporciona series de precipitación de resolución temporal diaria para un periodo que cubre de 1981 al presente (Funk et al., 2015), mientras que los producto de 5ª generación de reanálisis atmosférico del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (ERA5) Ag complementan la información de temperatura diaria del aire. Además, se utilizó el ráster del producto CCI Land Cover de 300 m de resolución espacial para evaluar el uso del suelo (Bontemps et al., 2013) y las propiedades edáficas como contenido de arena y arcilla se obtuvieron del producto SoilGrids a 250 m de resolución (Hengl et al., 2017). Esta integración de productos siguió, en general, la metodología implementada por Arciniega-Esparza et al. (2022) para la simulación hidrológica a la escala de Costa Rica.

Tabla 3. Descripción de las bases de datos de percepción remota y productos globales.

DATASET	VARIABLE	PERIODO	RESOLUCIÓN TEMPORAL	COBERTURA Y RESOLUCIÓN ESPACIAL	FUENTE
CHIRPSv2.0	Precipitación	1981 - Presente	Diaria	Global, 4.8 [km]	Funk et al. (2015)
ERA5Ag	Temperatura	1979 - Presente	Diaria	Global, 9.6 [km]	Nobakht et al. (2019)
CCI Land Cover	Cobertura vegetal (Uso de suelo)	1993 - 2015	Anual	Global, 0.3 [km]	Bontemps et al. (2013)
Soil Grids	Contenido de arena y arcilla	-	-	Global, 0.25 [km]	Hengl et al. (2017)
SRTM	Elevación de terreno	-	-	0.03 [km]	Bamler (1999)

Todos los datos fueron descargados en sus formatos originales, (la mayoría en formato netCDF), procesados en *Python* y manipulados principalmente con las bibliotecas *xarray*, *numpy*, *pandas* y *matplotlib* para la generación de figuras y análisis de tendencias.

IV.3 Modelo hidrológico

El modelo Hydrological Predictions for the Environment (HYPE) es un modelo de código abierto, conceptual y semidistribuido para evaluar los recursos hídricos y la calidad del agua a pequeña y gran escala (Lindström et al., 2010), desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (SMHI) como modelo operativo para pronosticar flujos hidrológicos en Suecia (Pechlivanidis et al., 2014).

Su estructura espacial se basa en la división del territorio en subcuencas hidrológicamente interconectadas, las cuales se subdividen en clases homogéneas de suelo y uso de suelo denominadas Soil and Land use Classes (SLCs). Estas combinaciones se definen según la clasificación de tipo de suelo, cobertura vegetal, clima y elevación (Arciniega-Esparza et al., 2022). En la Figura 5.a, se presenta el esquema de una cuenca dividida en subcuencas (Basin 1, 2 y 3), cada una con distintas combinaciones de tipo de suelo, uso de suelo, cuerpos de agua y red de drenaje. En la Figura 5.b, se detalla la estructura interna de una subcuenca, ilustrando los procesos que ocurren dentro de una unidad SLC, como son: precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración, flujo subsuperficial, flujo base, percolación, caudal de salida en lagos, vasos de almacenamiento, etc. El modelo funciona para escalas diarias o subdiarias y permite además la simulación del balance hídrico y del transporte de nutrientes entre subcuencas (Arciniega-Esparza et al., 2022; Lindström et al., 2010).

Una característica especial de HYPE es su diseño flexible, esto permite la calibración automática de parámetros y su transferencia a cuencas no aforadas, lo hace especialmente útil en regiones con escasa información hidrometeorológica. Gracias a esta arquitectura, HYPE se consolida como una herramienta eficaz para la gestión integrada del recurso hídrico, el análisis de eventos extremos y la evaluación de escenarios de cambio climático. Su desarrollo activo y constante actualización lo

posicionan como un modelo robusto para aplicaciones científicas y de planificación en diferentes ambientes (Lindström et al., 2010; Arheimer et al., 2020).

Otra característica relevante del modelo HYPE es su capacidad para la simulación de trazadores (Tracer T1) para el seguimiento de masas de agua, lo cual permite reducir la incertidumbre en la identificación de procesos y representar de una manera más efectiva los tiempos de tránsito (Birkel & Soulsby, 2015). En la estructura del modelo, los isótopos se consideran una concentración que sigue el flujo de agua, partiendo de la firma isotópica de la precipitación como la entrada principal.

En cuanto a su evolución temporal, el modelo permite simular el decaimiento de la fracción isotópica mediante un proceso de decaimiento exponencial, controlado por parámetros de la vida media. Respecto a la evaporación, HYPE no incorpora de forma inherente un fraccionamiento físico complejo, sino que lo modela como una simplificación paramétrica que permite definir si el trazador permanece en la base líquida o se pierde parcialmente con el flujo de vapor, facilitando así una representación clara del balance isotópico en los diferentes comportamientos hidrológicos de la subcuenca.

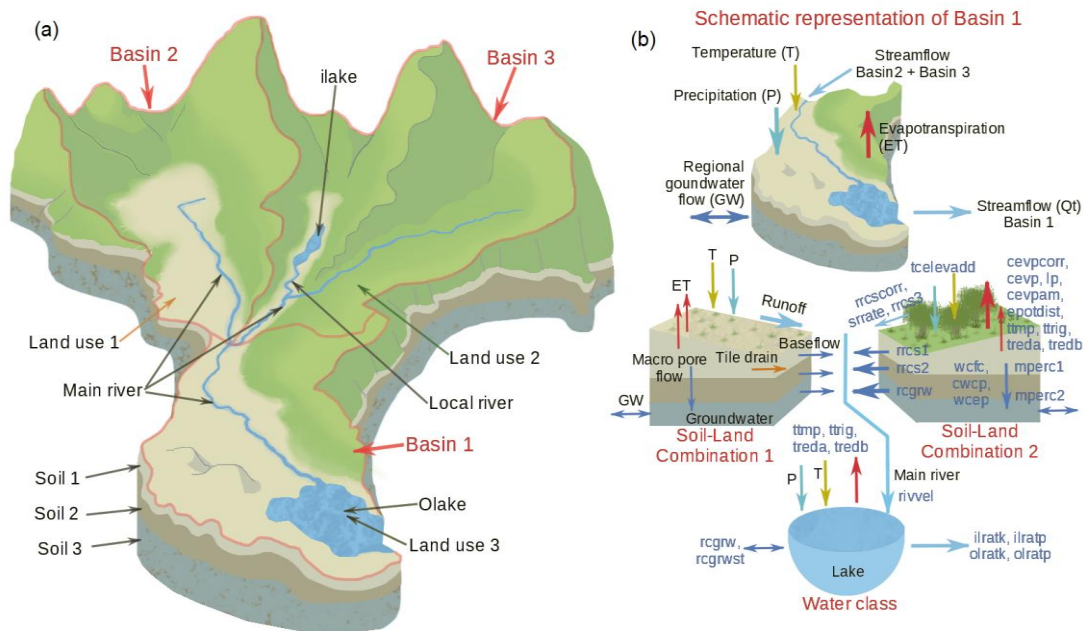


Figura 5. Esquema de la representación de subcuencas y procesos simulados con el modelo HYPE. Fuente: Arciniega-Esparza et al. (2022).

IV.4 Calibración y validación del modelo

La calibración del modelo consistió en identificar aquellos parámetros que redujeran el error entre los datos observados y simulados. Este proceso de calibración se realizó mediante simulaciones Monte Carlo, las cuales generan múltiples combinaciones aleatorias de parámetros para posteriormente simular con el modelo HYPE y evaluar su error correspondiente (Khu y Warner, 2003).

El error fue determinado a partir de dos métricas, el criterio de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) para evaluar el error en el caudal simulado y el coeficiente de correlación (CC) para evaluar el error en la concentración isotópica de caudal. Estas dos métricas de error están dadas por:

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$CC = \frac{Cov(X_o, X_s)}{\sigma_o \sigma_s}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o}$$

En donde X es la variable de interés; los subíndices o y s corresponden a los datos observados y simulados, respectivamente; μ y σ son la media y desviación estándar, respectivamente; Cov es la covarianza; β y α son los coeficientes de sesgo respecto a la media y desviación estándar, respectivamente. KGE varía de $-\infty$ a 1, siendo 1 el ajuste perfecto, y CC varía de -1 a 1, siendo 1 el ajuste perfecto.

Previo al proceso de calibración, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo, en el cual se analizaron los siguientes parámetros detallados en la Tabla 4 (descritos ampliamente en el *HYPE File Reference*): srrate, rrcs1, rrcs2, srrcs, wcfc, wcwp, wcep, mperc1, mperc2, rivvel, rrcs3, lp y cevpm. Este análisis consistió en generar 10,000

simulaciones con parámetros aleatorios con el fin de evaluar qué parámetros son más sensibles (parámetros que tienen mayor influencia en la reducción e incremento del error, respectivamente) y determinar rangos (valores mínimo y máximo posibles) más realistas para su calibración. Los parámetros sensibles fueron ajustados en el proceso de calibración, mientras que los que no fueron sensibles fueron establecidos según lo indicado por Arciniega-Esparza et al. (2022).

Tabla 4. Descripción de los parámetros utilizados y sus valores.

PARÁMETRO		DESCRIPCIÓN	ESTATUS	VALOR				
SUELO	srrate	Fracción para la escorrentía superficial.	Calibrado	0.2967	0.1578	0.0512	0.3104	-
	rrcs1	Coeficiente de recesión para la capa superior del suelo.	-	0.2635	0.1765	0.0640	0.3378	-
	rrcs2	Coeficiente de recesión para la capa más baja del suelo.	-	0.1747	0.0112	0.0037	0.0560	-
	trrcs	Coeficiente de recesión para desagües de baldosas.	-	0.4159	0.8910	0.2409	0.7350	-
	mperc1	Capacidad máxima de percolación desde la capa de suelo 1 a la capa de suelo 2.	Calibrado	25.7728	1.7905	18.0948	80.9752	-
	mperc2	Capacidad máxima de percolación de la capa de suelo 2 a la capa de suelo 3.	Calibrado	18.2574	69.9531	93.5730	82.2036	-
	wcfc	Fracción del suelo disponible para la evapotranspiración pero no para la escorrentía.	Calibrado	0.7004	0.7151	0.3712	0.2037	-
	wcwp	Punto de marchitez expresado como una fracción.	Calibrado	0.6144	0.6866	0.9977	0.3048	-
	wcep	Porosidad efectiva como fracción.	Calibrado	0.2252	0.4815	0.6048	0.9527	-
TIERRA	ttmp	Temperatura umbral para el deshielo, densidad de la nieve y evapotranspiración.	-	11.5460	2.5187	9.6104	12.9744	10.5433

	cevp	Parámetro de evapotranspiración.	-	0.2840	0.3198	0.2856	0.2207	0.0981
	ttrig	Umbral de temperatura para el control de la temperatura del suelo en la evapotranspiración del suelo.	-	1.5118	4.0276	4.7385	14.8764	13.8273
	treda	Control de la temperatura del suelo sobre la evapotranspiración del suelo.	-	1.1145	1.2183	0.6644	0.3423	0.3705
	tredb	Control de la temperatura del suelo sobre la evapotranspiración del suelo.	-	2.8805	1.4153	7.4781	8.2564	11.5992
	srrcs	El coeficiente de recesión para la escorrentía superficial (fracción) debe establecerse en 1 para las clases de lagos y ríos con llanuras aluviales.	-	0.3867	0.3220	0.4882	1.0000	1.0000
GENERAL	lp	Factor para calcular el límite de agua del suelo para la evapotranspiración potencial.	-	0.6272	-	-	-	-
	cevpam	Amplitud de la función sinusoidal (aproximadamente 1) que corrige la evapotranspiración potencial.	-	0.2773	-	-	-	-
	cevpph	Fase de la función sinusal que corrige la evapotranspiración potencial.	-	0.0000	-	-	-	-
	tceleavdd	Parámetro para la dependencia de la elevación de la temperatura, utiliza la altura media de la subcuena.	-	-0.3033	-	-	-	-

	tcobselev	Parámetro para la corrección de la temperatura debido a la desviación de la elevación de observación con respecto a la elevación de la subcuenca.	-	0.0000	-	-	-	-
	tcalt	Parámetro para la dependencia de la elevación de la temperatura, utiliza la desviación de SLC con respecto a la altura media de la subcuenca ($=0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$).	-	0.0000	-	-	-	-
	epotdist	Coefficiente en la función exponencial para la dependencia de la profundidad de la evapotranspiración potencial.	-	1.5785	-	-	-	-
	rivvel	Parámetro para el cálculo de la velocidad del agua en el curso de agua.	-	0.7100	-	-	-	-
	rrcs3	Coefficiente de recesión para la dependencia de la pendiente (capa superior).	-	0.0038	-	-	-	-
	damp	Fracción de retraso en el curso de agua que también provoca amortiguación.	-	0.5000	-	-	-	-
	gicatch	Fracción de la escorrentía local que pasa a través del lago local (ilake); el resto fluye directamente hacia el cauce principal. Sustituye a icatch en GeoData cuando este es negativo o la columna no está presente y ilicatch no está definido.	-	0.1000	-	-	-	-
	ilratk	Parámetro de la curva de clasificación para el caudal de salida del lago (tasa), sustituye a gratk si es superior a cero.	-	1.6482	-	-	-	-

	ilratp	Parámetro de la curva de clasificación para el caudal de salida del lago (exponente), sustituye a gratp si es superior a cero.	-	1.0836	-	-	-	-
	illdepth	Profundidad para lagos.	-	0.5000	-	-	-	-
	ilicatch	Fracción de la escorrentía local que pasa por el lago local (ilake), el resto fluye directamente hacia el curso de agua principal. Reemplaza icatch en GeoData si es negativo o si falta la columna.	-	0.2000	-	-	-	-
	gldepi	Profundidad para todos los lagos.	-	2.0000	-	-	-	-
	olratk	Parámetro de la curva de clasificación para el caudal de salida del lago (tasa), sustituye a gratk si es superior a cero.	-	1.6482	-	-	-	-
	olratp	Parámetro de la curva de clasificación para el caudal de salida del lago (exponente), sustituye a gratp si es superior a cero.	-	1.0836	-	-	-	-
	iniT1	Valor inicial en el suelo, concentración T1.	Calibrado	- 11.0995	-	-	-	-
	iniT1sw	Valor inicial en aguas superficiales, concentración T1.	Calibrado	- 13.5177	-	-	-	-
	T1release	Liberación de T1 del depósito superficial del suelo. Normalmente, el depósito está compuesto por estiércol.	Calibrado	2.1133	-	-	-	-
	t1evap	Factor de evaporación para la sustancia T1 (0-1), el valor predeterminado es 0; si es 1, la sustancia se evapora con el agua.	-	1.0000	-	-	-	-

La calibración del modelo se realizó en dos pasos:

1. Calibración utilizando los datos de caudal diario de la estación Tempisque para el periodo de 1992 a 1999 y validación considerando el periodo de 2000 a 2003. Para este caso se realizaron 20,000 simulaciones Monte Carlo variando los parámetros *srrate*, *mperc* y *wcep*, asociados principalmente a la generación de caudal y almacenamiento de agua en las subcuencas.
2. Calibración utilizando los datos de isótopos de caudal de los puntos de muestreo Tempisque y Colorado para el periodo 2018-2021. Para este caso se realizaron 10,000 simulaciones Monte Carlo. En este caso no se dividieron los datos en periodo de calibración y de validación debido a la reducida cantidad de datos. Los parámetros generados de forma aleatoria en este caso fueron *wcfc*, *wcwp*, *wcep*, *iniT1*, *iniT1sw*, *T1release*, asociados al almacenamiento de agua, descarga del subsuelo, y a trazadores no reactivos.

Adicionalmente, para cada etapa de la calibración se utilizaron las 100 simulaciones con el mejor ajuste para evaluar la incertidumbre del modelo.

IV.5 Análisis de sequías

Para la caracterización de las sequías se analiza un conjunto de parámetros que describen la duración y magnitud de los déficits, los cuales son: duración, intensidad y magnitud, como se muestra en la Figura 6.

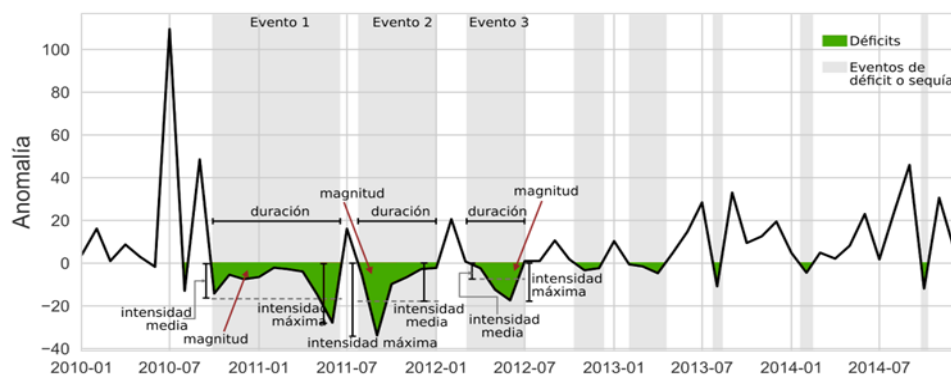


Figura 6. Análisis de las características de los déficits de una variable hidroclimatológica a partir de anomalías. Fuente: Salinas Calleros y Arciniega-Esparza (n. p.).

La anomalía es una medida que describe la desviación de una variable hidroclimatológica respecto a un valor de referencia. En el contexto de análisis de sequías, una anomalía negativa indica que la variable se encuentra por debajo de su media hidroclimatológica (se genera un déficit), siendo este uno de los indicadores de condiciones secas. Como se observa en la Figura 6, la anomalía permite delimitar el inicio y fin de una sequía cuando la curva de valores observados cruza el eje cero.

La duración se refiere al tiempo durante el cual una variable hidroclimatológica permanece por debajo de un umbral crítico, es decir, presenta una anomalía negativa. De forma gráfica, el cruce con el eje x indica tanto el inicio como el final de un evento de sequía. Esta duración puede variar según la severidad de las condiciones secas y puede extenderse desde semanas hasta varios años (Raposo et al., 2023).

La intensidad promedio se entiende como la relación entre el déficit acumulado y la duración de la sequía. Una sequía de corta duración puede ser altamente intensa si genera grandes pérdidas hídricas en un lapso corto (Zargar et al., 2011).

La magnitud de una sequía es el déficit acumulado de una variable hidroclimatológica respecto a su valor de referencia durante el periodo seco, es decir, corresponde al área bajo la curva de anomalía negativa (Raposo et al., 2023).

Para analizar la intensidad de las sequías se implementó el índice de sequía estandarizado (Standardized Drought Index (SDI)). Este índice permite comparar la intensidad de las sequías entre diferentes sitios, épocas del año y variables, al generar series estandarizadas asociadas a una distribución normal estándar. Los pasos para el cálculo del SDI se muestran en la Figura 7, utilizando una serie mensual de precipitación (Standardized Precipitation Index (SPI)) como ejemplo:

1. Serie de precipitación mensual: muestra la variación de la precipitación observada a lo largo del tiempo.
2. Distribución acumulada: para cada año y cada mes, los valores de precipitación se ajustan a una distribución de probabilidad, lo que permite calcular su probabilidad acumulada. Para series temporales hidrológicas, comúnmente se

utiliza una distribución Gamma, aunque también pueden emplearse aproximaciones basadas en distribuciones empíricas según el enfoque del análisis.

3. Estandarización: las probabilidades acumuladas se transforman en una distribución normal estándar, permitiendo expresar cada valor como un Z-score o valor estandarizado (véase la línea punteada de la Figura 7).
4. El Z-score obtenido representa el grado de desviación respecto a la media histórica, por lo que los valores negativos corresponden a déficits estandarizados y los valores positivos a periodos húmedos. Estos datos se reorganizan en su fecha original para construir una serie temporal estandarizada.
5. El proceso se repite para los datos de cada uno de los meses hasta completar la serie estandarizada.

Al utilizar series de datos normalizados, se facilita la clasificación de la severidad de las sequías, ya que permite establecer rangos comparables entre escalas espaciales y temporales, siendo las más comunes las variables acumuladas o promediadas para escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses. Para este trabajo se implementó la clasificación de sequías propuesta por Svododa et al. (2002), quienes definieron cuatro categorías de severidad, como se representa en la Tabla 5.

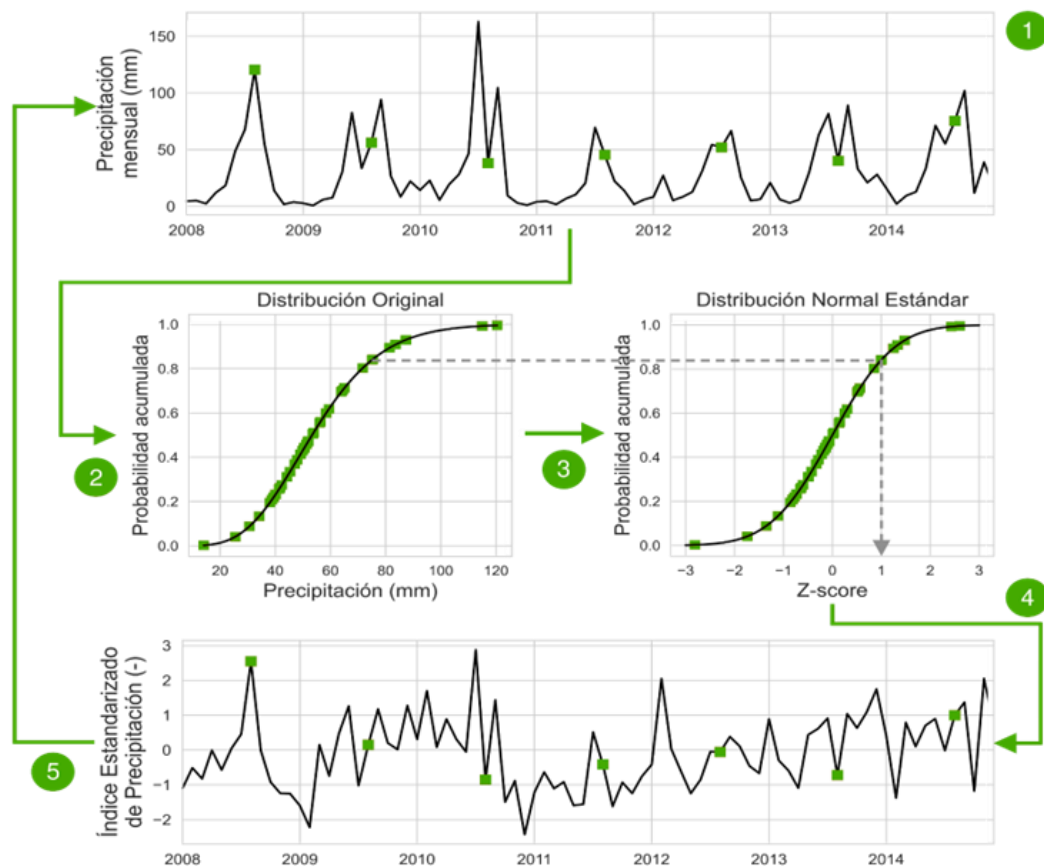


Figura 7. Cálculo del índice estandarizado para el análisis de sequías. Fuente: Salinas Calleros y Arciniega-Esparza (s.p.).

Este sistema de clasificación ha sido ampliamente utilizado en el monitoreo y gestión del recurso hídrico, permitiendo la comparación espacial y temporal de eventos de sequía en distintas regiones (López-Moreno et al., 2013; Spinoni et al., 2014). Además, su aplicación en estudios hidrológicos facilita la integración de datos observacionales y modelados para evaluar la severidad de las sequías y su impacto en ecosistemas y actividades productivas (Vicente-Serrano et al., 2010).

En este trabajo, se calcularon los índices estandarizados de precipitación acumulada de tres meses (SPI-3) y de caudal simulado de un mes (SRI-1) para evaluar las intensidades de las sequías en la cuenca del río Tempisque.

Tabla 5. Categorías de sequías a partir del índice estandarizado de sequía (SDI). Fuente: Svoboda et al. (2002).

CATEGORÍA	RANGO SDI
Sequía excepcional (D4)	$SDI \leq -2.0$
Sequía extrema (D3)	$-2.0 < SDI \leq -1.6$
Sequía severa (D2)	$-1.6 < SDI \leq -1.3$
Sequía moderada (D1)	$-1.3 < SDI \leq -0.8$
Anormalmente seco (D0)	$-0.8 < SDI \leq -0.5$

IV.6 Análisis de caudales máximos

El análisis de caudales máximos consistió en evaluar la probabilidad de ocurrencia de los caudales diarios máximos anuales. Para esto, primero se determinó la probabilidad empírica de los caudales diarios máximos anuales para posteriormente realizar el ajuste de funciones de probabilidad.

La probabilidad empírica de los caudales diarios máximos anuales fue determinada a partir de la Ley de Weibull, la cual define que el periodo de retorno (Tr) está dado por:

$$Tr = \frac{(n + 1)}{m}$$

en donde Tr es el periodo de retorno en años y está asociado al tiempo promedio estimado que transcurre entre dos eventos con una magnitud similar o superior; n es el tamaño de la muestra; m es el número en el orden del registro ordenado de mayor a menor. Mientras que la probabilidad de que un evento no sea excedido en promedio en un tiempo determinado está dada por:

$$F(x) = 1 - \frac{1}{Tr}$$

en donde $F(x)$ es la probabilidad acumulada de no excedencia ($P(X < x)$).

A partir de la probabilidad empírica se ajustaron diferentes funciones de probabilidad teórica para estimar eventos a diferentes probabilidades y periodos de retorno. Se evaluaron cerca de ocho funciones de probabilidad típicamente utilizadas para el análisis de eventos extremos (Exponencial, LogNormal, Gamma, LogPearson, Gumbel, GVE, entre otras), pero al final se optó por el uso de la función Gamma de dos y tres parámetros (Tabla 6), ampliamente utilizadas en hidrología por su capacidad para modelar variables positivas y asimétricas, características comunes en registros de caudales extremos (Basak et al., 2012). La función Gamma de dos parámetros se define por un parámetro de escala (α) y uno de forma (β), que controlan la dispersión y asimetría de la curva. Por otra parte, la Gamma de tres parámetros incluye un parámetro de ubicación (x_0), el cual desplaza la distribución y permite establecer un umbral mínimo de caudal a partir del cual se calcula la probabilidad de ocurrencia; esta variable es particularmente útil cuando hay un caudal base o umbral natural.

Tabla 6. Ecuaciones de funciones de distribución de probabilidad

Distribución	Función de probabilidad acumulada	Función de densidad de probabilidad
Gamma de 2 parámetros	$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)} dx$	$f(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^{\beta} \Gamma(\beta)}$
Gamma de 3 parámetros	$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} (t - \theta)^{\alpha-1} e^{-\frac{(t-\theta)}{\beta}} dt, \quad x > \theta$	$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)}$

La distribución gamma está asociada a procesos donde los tiempos de espera entre eventos distribuidos según Poisson son relevantes, lo que la vincula de forma natural con la ocurrencia de crecidas e inundaciones (Ikwuochi et al., 2022). Su flexibilidad y capacidad para describir la asimetría y dispersión de los datos la hacen especialmente adecuada para el análisis de máximos anuales.

El caudal asociado a distintos periodos de retorno (T_r) se calculó aplicando la función inversa de la distribución ajustada ($\text{inv}(F(x))$), lo que permitió identificar umbrales críticos de caudal que podrían generar inundaciones.

V. Resultados y discusión

V.1 Calibración del modelo

La Figura 8 presenta la calibración del modelo hidrológico utilizando datos de caudal y precipitación del río Tempisque correspondientes al periodo de 1992 a 1999. La Figura 8a muestra la precipitación diaria, evidenciando una marcada estacionalidad climática, con los valores máximos concentrados durante épocas lluviosas y periodos prolongados de baja o nula precipitación en la estación de estiaje. En la Figura 8b se compara el caudal observado y simulado, en donde el modelo reproduce adecuadamente los caudales máximos, aunque presenta desfases temporales y tiende a subestimar los caudales mínimos en periodos de estiaje, es decir, cuando se llega al caudal base mínimo debido a la exfiltración de agua del acuífero al río.

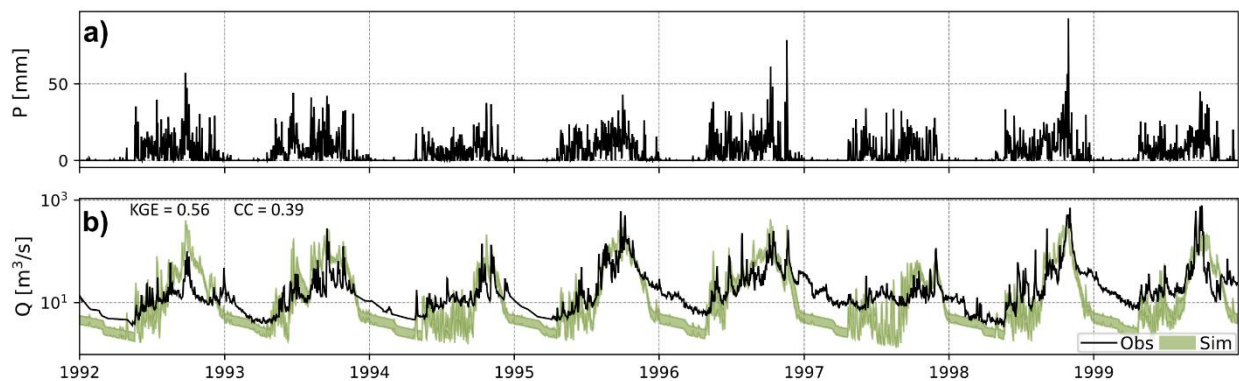


Figura 8. Calibración del modelo utilizando datos de caudal a la salida de la cuenca.

Los rangos de los parámetros optimizados asociados al escurrimiento superficial (srrate) y a la percolación (mperc) para las mejores 100 simulaciones se muestran en la Tabla 7. Los parámetros asociados al suelo son consistentes con publicaciones previas (Arciniega-Esparza et al., 2022). La métrica utilizada para evaluar el desempeño del modelo respecto al caudal simulado fue el Kling-Gupta Efficiency (KGE), la cual alcanzó un valor medio de 0.61, lo cual indica un ajuste aceptable entre el caudal observado y simulado. El valor obtenido es comparable con los reportados en otros estudios hidrológicos realizados en Costa Rica, donde los rangos de KGE para modelos de

simulación acoplando datos isotópicos suelen encontrarse entre 0.40 y 0.70 (Watson et al., 2023; Dehaspe et al., 2018; van Huijgevoort et al., 2016). De forma complementaria, resultados similares se han documentado en otras regiones del mundo, por ejemplo, Birkel et al. (2025) reportan un desempeño equivalente en estudios realizados en Alemania utilizando trazadores isotópicos, mientras que Pesántez et al. (2023) presentan rendimientos similares en modelos implementados en Ecuador.

Tabla 7. Parámetros y métricas de ajuste derivadas de la simulación Monte Carlo para la calibración con datos de caudal y con datos isotópicos de caudal

VARIABLE			Q_t			δ^2H		
ITERACIONES			20 000			10 000		
TIPO	PROCESO	PARÁMETRO	5to	Media	95vo	5to	Media	95vo
Suelo	Escurrecimiento	srrate	0.0391	0.2604	0.4672	-	-	-
	Percolación	mperc	3.8715	56.5492	95.6326	-	-	-
	Contenido de agua	wcfc	-	-	-	0.2516	0.5779	0.9419
	Contenido de agua	wcwp	-	-	-	0.0788	0.5039	0.9579
	Contenido de agua	wcep	0.2318	0.6041	0.9903	0.2194	0.5841	0.9619
General	Trazador T1	iniT1	-	-	-	20.777	14.2638	10.7344
	Trazador T1	iniT1sw	-	-	-	48.9200	30.4111	12.4836
	Trazador T1	T1release	-	-	-	0.7237	5.2383	9.6367
Criterio de evaluación		KGE Q_t	0.6069	0.6083	0.6105	0.35	0.50	0.60
		CC $\delta^2H, \delta^{18}O$	-	-	-	0.2949	0.3214	0.3482

La Figura 9 presenta un análisis comparativo entre la precipitación promedio en toda la cuenca, los isótopos de precipitación en la estación Liberia e isótopos de caudal en las estaciones Colorado y Tempisque para el periodo de 2018-2021. En la Figura 9a se muestra la precipitación diaria acumulada en milímetros, en donde se identifican dos eventos de lluvia característicos de la estacionalidad de Costa Rica, esto es relevante dados sus periodos húmedos intensos seguidos de una marcada reducción de lluvia

durante el periodo seco. Estos pulsos de precipitación constituyen la base para la infiltración y recarga de agua subterránea. La Figura 9b corresponde a la composición isotópica del agua de lluvia, en la cual se aprecia que las precipitaciones más fuertes están, en general, asociadas a aportaciones de humedad con composición química más empobrecida, características del Pacífico.

Respecto a las Figuras 9c y 9d, se representan los isótopos de caudal en las estaciones de Colorado y Tempisque, comparando los datos observados (puntos negros) con la banda de incertidumbre de las mejores 100 simulaciones de Monte Carlo (banda verde). Para la calibración con isótopos de caudal se obtuvo un valor medio del coeficiente de correlación (CC) de 0.32. Este resultado se considera bajo, pero se encuentra en el rango de otros trabajos que implementan calibración con isótopos (Arciniega-Esparza et al., 2023; Correa et al., 2020; Dehaspe et al., 2018). La limitación de contar con una sola estación de monitoreo de isótopos de lluvia influyó en el error, ya que, como se observa en la Figura 9c, los valores de isótopos de caudal de la estación Colorado muestran baja correlación con los valores simulados debido a la falta de registros de isótopos de lluvia en la parte alta de la cuenca. Los datos utilizados en la estación Colorado no reflejan adecuadamente la señal isotópica dominante en esta zona, debido a la influencia de masas de aire provenientes del Caribe que ingresan a través de los volcanes Rincón de la Vieja y Volcán Cacao (Sánchez-Murillo y Birkel, 2016).

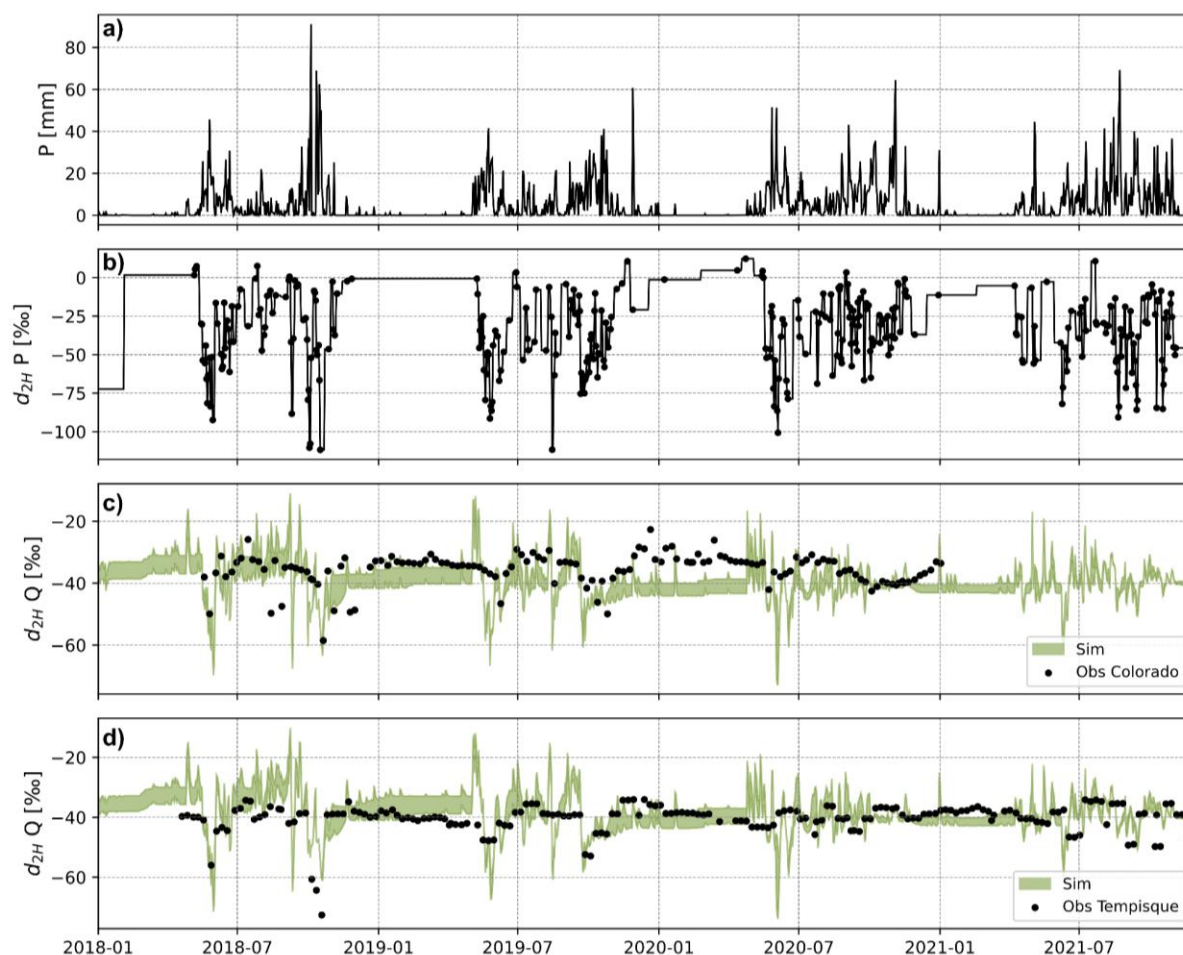


Figura 9. a) Valores de precipitación diaria (P), b) Composición isotópica de P, c) y d) Simulación y calibración de isótopos estables en caudales diarios para la cuenca del río Colorado y Tempisque, respectivamente.

Por otra parte, en la estación de Tempisque, ubicada a la salida de la cuenca, los resultados obtenidos (Figura 9d) indican que el modelo reproduce de manera adecuada la señal isotópica. Sin embargo, se observan algunas diferencias en donde la composición isotópica de los datos observados es menos sensible a los eventos de precipitación aislados, lo cual está asociado principalmente a la influencia del flujo base y a la mezcla de agua subsuperficial (R. Sánchez, comunicación personal, 30 de junio de 2025), características que se encuentran simplificadas en el modelo HYPE.

La Figura 10 muestra la comparación de caudal simulado contra el observado, en donde el caudal simulado ha sido generado posterior a la calibración de isótopos de caudal. Se aprecia una mejora sustancial en la calibración del caudal al incorporar los datos isotópicos de la salida de la cuenca, en particular, se observa una reducción en el sesgo respecto a los caudales mínimos. Aunque persisten ciertas discrepancias en la parte inicial del modelo en ambas figuras, posiblemente asociadas a la alta actividad ciclónica de 1992, y en la etapa final del periodo, la correlación general es claramente superior. Esta mejoría evidencia la utilidad de integrar información isotópica junto con los caudales observados en los procesos de calibración, permitiendo una representación más precisa de la dinámica hidrológica de la cuenca.

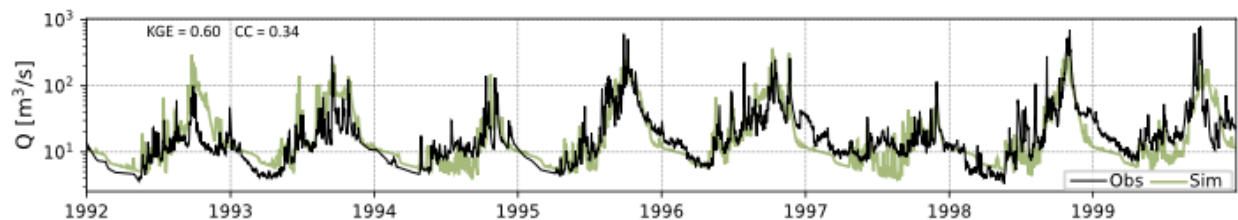


Figura 10. Periodo de calibración del modelo utilizando datos de isótopos y de caudal simulado a la salida de la cuenca.

Los resultados anteriores reflejan la capacidad del modelado hidrológico asistido por isótopos para representar los caudales y la composición isotópica del caudal. Esto constituye una herramienta útil para el entendimiento integral de la dinámica de la cuenca, principalmente en el análisis de eventos extremos, ya que permite evaluar la respuesta del sistema en periodos de lluvias intensas y en intervalos prolongados de sequía. Finalmente, es importante resaltar el papel de la contribución subterránea en el mantenimiento del caudal base del río Tempisque, la cual mantiene un flujo continuo durante todo el año; sin embargo, esta contribución no es representada de manera adecuada en el modelo cuando se considera el caudal como única fuente de calibración del modelo.

V.2 Simulación continua de caudal

En la Figura 11 se presenta la simulación del caudal del río Tempisque para el periodo 1992-2023, calibrada a partir de los datos de caudal e isótopos de caudal. Los registros muestran que los caudales máximos alcanzaron valores entre los 700 y 800 m³/s, destacando eventos extremos entre los años 1998 y 2003 durante su estación lluviosa. Si bien el modelo no logra reproducir con precisión los picos de mayor magnitud, sí representa de manera más adecuada los caudales mínimos y el caudal base, lo que resalta su capacidad para capturar la dinámica hidrológica general de la cuenca. La incapacidad del modelo para reproducir los caudales máximos puede estar atribuida a los registros de precipitación del producto CHIRPS, ya que Arciniega-Esparza et al. (2022) reportan que CHIRPS subestima la precipitación en esta región, además, existen discrepancias entre los días con lluvia y sin lluvia detectados con este producto satelital cuando se comparan con los registros de las estaciones climatológicas.

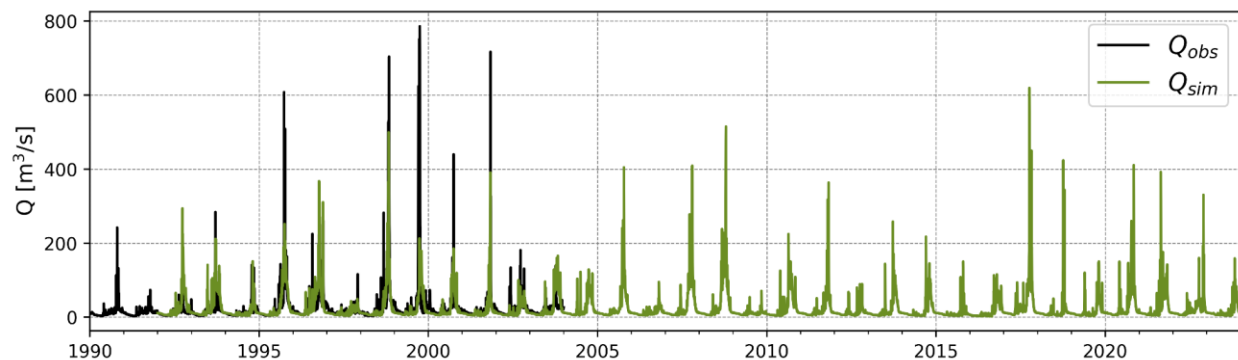


Figura 11. Simulación continua de caudal diario para el periodo de 1990 a 2023 en la cuenca del río Tempisque.

La serie temporal refleja una marcada estacionalidad propia del clima tropical estacionalmente seco, con máximos concentrados en la estación lluviosa, aproximadamente de mayo a noviembre, y mínimos persistentes durante la temporada seca, de diciembre a abril. Los picos de alta intensidad observados en los meses húmedos, junto con los periodos de sequía recurrentes, evidencian la fuerte variabilidad interanual e intraestacional de la cuenca, influenciada principalmente por la dinámica de fenómenos climáticos como el ENSO.

V.3 Análisis de eventos extremos: sequías

La Figura 12 presenta la evolución temporal conjunta entre los déficits de precipitación representados con el SPI-3 y la disminución del caudal a la salida de la cuenca representada con el SRI-1. La clasificación de la intensidad y severidad de los distintos grados de sequía se muestran en la Tabla 5.

En la Figura 12a se observan las estacionalidades típicas de Costa Rica, con las temporadas de lluvias y de estiaje bien definidas; sin embargo, a partir del 2010 los déficits se intensifican, y algunas de las anomalías negativas se asocian al ENSO. Entre los eventos extremos más destacables se encuentra la sequía prolongada de 2015-2016, con una magnitud acumulada de 776.6 mm en 16 meses (véase en las Tablas 8 y 9). Aunque hubo periodos de recuperación en los años 2017 y 2018, no se logra una compensación del déficit hídrico.

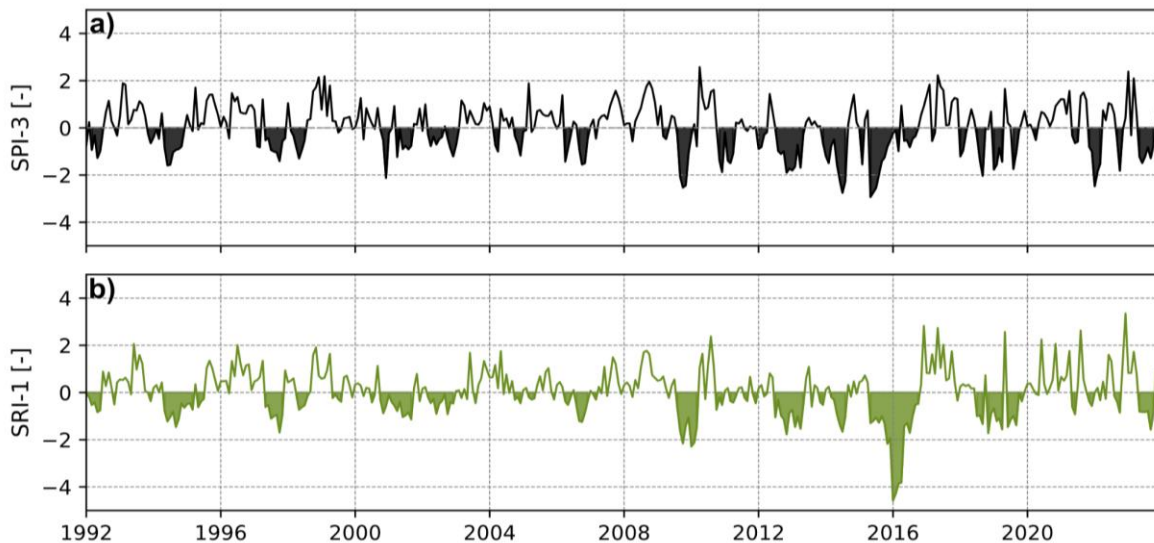


Figure 12. Índices estandarizados de precipitación de tres meses (SPI-3) y de caudal mensual (SRI-1) para la cuenca del río Tempisque.

En Figura 12b predominan las anomalías negativas moderadas (D1) hasta el 2009 y un evento severo (D2) acumulado en 2010 - 2011 de 162 mm en 14 meses, no obstante, a partir del 2012 comienza un deterioro progresivo que termina en 2016 con un valor extremo del SRI-1 superior a -4, el más severo de la serie y que representa la

acumulación del déficit de precipitación. La Tabla 8 muestra que la cuenca experimentó una secuencia de tres sequías de precipitación en un mismo periodo en el cual la precipitación acumuló déficits consecutivos, el primero con 498.8 mm (2012 - 2013), el segundo con 577.1 mm (2013 - 2014) y el tercero ya mencionado con 776.6 mm (2015 - 2016); lo anterior explica la falta de recuperación del caudal que se mantuvo en estado crítico durante al menos cuatro años (2012 - 2016).

La Figura 12 presenta cómo los déficits de precipitación afectan directamente al caudal. No obstante, existen diferencias en los procesos de recuperación de acuerdo con la magnitud e intensidad de los déficits de precipitación (junto con otros factores), de tal manera que se aprecia un retraso en la respuesta hidrológica ante la ocurrencia de sequías meteorológicas. Es importante destacar que, pese a las reducciones del caudal, el río nunca llegó a secarse.

Por otra parte, la Figura 13 presenta la información de las Tablas 8 y 9 de forma sintetizada en términos únicamente de magnitud y duración de los déficits. En ella se observa que, en tanto los déficits de lluvia más intensos se concentran en periodos de 12 a 16 meses, las sequías hidrológicas prolongadas tienden a extenderse hasta 18 meses en eventos extremos, como el registrado en 2016, evidenciando la respuesta hidrológica retardada de la cuenca frente a los déficits de precipitación.

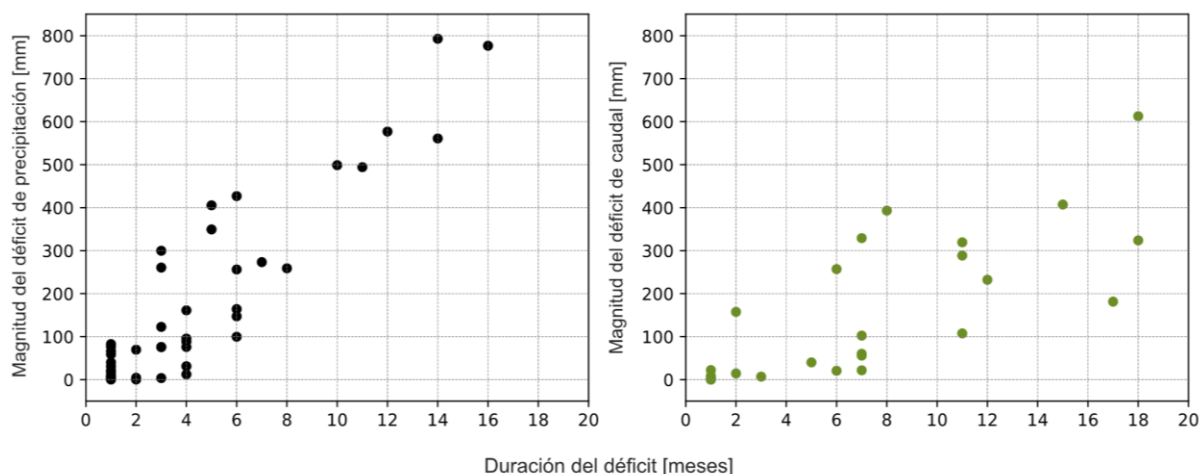


Figura 13. Correlación entre la duración y magnitud de los déficits de precipitación y de caudal mensuales en la cuenca del río Tempisque.

Asimismo, existe una relación entre las Figuras 12 y 13; esta permite integrar la dimensión temporal y la estadística de los déficits hídricos en la cuenca del Río Tempisque. Ambas representaciones evidencian la tendencia de las sequías hidrológicas a prolongarse más que las meteorológicas, lo que resalta la importancia de considerar la evolución temporal y la acumulación de los eventos para comprender la dinámica de la sequía en la región y poder extrapolarla a otras regiones.

Tabla 8. Caracterización de los déficits de precipitación mensual en la cuenca del río Tempisque.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACIÓN [meses]	MAGNITUD [mm]	INTENSIDAD MÁXIMA [mm]	INTENSIDAD [mm/mes]
1	1990-06-01	1990-06-01	1	40.08	40.08	40.08
2	1990-09-01	1990-09-01	1	77.10	77.10	77.10
3	1991-01-01	1991-06-01	4	12.34	7.02	3.08
4	1991-09-01	1992-06-01	8	258.97	100.85	32.37
5	1992-10-01	1992-10-01	1	82.68	82.68	82.68
6	1993-10-01	1994-01-01	4	88.56	63.01	22.14
7	1994-05-01	1994-10-01	6	426.92	115.74	71.15
8	1995-01-01	1995-02-01	2	0.91	0.62	0.46
9	1995-05-01	1995-05-01	1	66.18	66.18	66.18
10	1995-11-01	1995-11-01	1	0.78	0.78	0.78
11	1996-04-01	1996-04-01	1	4.09	4.09	4.09
12	1996-12-01	1998-06-01	14	560.96	163.08	40.07
13	1998-09-01	1998-09-01	1	7.99	7.99	7.99
14	1999-05-01	1999-07-01	2	69.67	36.30	34.84
15	1999-10-01	1999-11-01	2	4.31	2.53	2.16
16	2000-04-01	2000-04-01	1	5.39	5.39	5.39
17	2000-07-01	2000-07-01	1	58.91	58.91	58.91
18	2000-10-01	2000-12-01	3	260.66	244.73	86.89
19	2001-04-01	2002-01-01	7	273.37	92.55	39.05
20	2002-04-01	2002-07-01	4	95.56	43.25	23.89
21	2002-10-01	2003-02-01	4	161.24	113.20	40.31
22	2003-05-01	2003-08-01	3	76.11	43.17	25.37
23	2004-02-01	2004-06-01	4	31.22	21.76	7.81
24	2004-10-01	2005-05-01	6	164.08	148.25	27.35
25	2005-08-01	2005-08-01	1	10.11	10.11	10.11
26	2005-12-01	2005-12-01	1	3.25	3.25	3.25
27	2006-03-01	2006-05-01	3	75.48	60.66	25.16

28	2006-08-01	2006-10-01	3	299.79	162.60	99.93
29	2007-01-01	2007-02-01	2	0.54	0.28	0.27
30	2007-07-01	2007-07-01	1	17.41	17.41	17.41
31	2008-01-01	2008-01-01	1	0.26	0.26	0.26
32	2008-04-01	2008-04-01	1	6.35	6.35	6.35
33	2008-11-01	2008-11-01	1	3.66	3.66	3.66
34	2009-02-01	2010-03-01	11	494.22	206.99	44.93
35	2010-06-01	2010-06-01	1	4.30	4.30	4.30
36	2010-10-01	2011-04-01	6	256.20	227.01	42.70
37	2011-08-01	2012-03-01	6	99.75	42.89	16.62
38	2012-06-01	2013-05-01	10	498.76	122.32	49.88
39	2013-08-01	2014-08-01	12	577.08	149.17	48.09
40	2014-12-01	2014-12-01	1	21.45	21.45	21.45
41	2015-05-01	2016-09-01	16	776.58	204.43	48.54
42	2017-02-01	2017-03-01	2	0.68	0.41	0.34
43	2017-08-01	2017-08-01	1	30.99	30.99	30.99
44	2017-11-01	2018-03-01	4	75.98	60.66	18.99
45	2018-06-01	2019-09-01	14	792.84	141.21	56.63
46	2020-02-01	2020-04-01	3	3.68	2.75	1.23
47	2020-07-01	2020-07-01	1	4.81	4.81	4.81
48	2021-03-01	2021-06-01	3	122.68	81.86	40.89
49	2021-09-01	2022-03-01	6	147.22	99.50	24.54
50	2022-08-01	2023-01-01	5	349.40	203.90	69.88
51	2023-05-01	2023-09-01	5	405.49	159.97	81.10

Tabla 9. Caracterización de los déficits de caudal mensual en la cuenca del río Tempisque.

EVENTO	INICIO	FINAL	DURACIÓN [meses]	MAGNITUD [mm]	INTENSIDAD MÁXIMA [mm]	INTENSIDAD [mm/mes]
1	1992-01-01	1992-06-01	6	20.65	8.82	3.44
2	1992-11-01	1992-11-01	1	22.19	22.19	22.19
3	1993-12-01	1995-07-01	18	323.83	122.00	17.99
4	1996-04-01	1996-04-01	1	0.17	0.17	0.17
5	1997-05-01	1997-11-01	7	329.12	158.62	47.02
6	1998-04-01	1998-09-01	5	40.11	21.58	08.02
7	1999-06-01	1999-08-01	3	6.98	3.68	2.33
8	2000-04-01	2000-04-01	1	0.38	0.38	0.38
9	2000-07-01	2000-07-01	1	4.81	4.81	4.81
10	2000-10-01	2001-09-01	12	232.27	102.17	19.36
11	2001-12-01	2003-05-01	17	181.43	105.52	10.67

12	2003-08-01	2003-08-01	1	5.23	5.23	5.23
13	2004-10-01	2005-04-01	7	56.00	45.09	8.00
14	2006-04-01	2007-03-01	11	288.63	130.79	26.24
15	2007-07-01	2007-07-01	1	1.56	1.56	1.56
16	2008-04-01	2008-04-01	1	0.44	0.44	0.44
17	2009-08-01	2010-03-01	8	393.19	179.63	49.15
18	2010-06-01	2010-06-01	1	2.87	2.87	2.87
19	2010-10-01	2011-04-01	7	102.44	88.95	14.63
20	2011-09-01	2012-04-01	7	60.10	56.10	8.59
21	2012-07-01	2013-05-01	11	319.35	122.38	29.03
22	2013-08-01	2013-08-01	1	8.95	8.95	8.95
23	2013-11-01	2014-10-01	11	107.56	29.96	9.78
24	2015-05-01	2016-10-01	18	612.76	134.57	34.04
25	2017-12-01	2017-12-01	1	0.23	0.23	0.23
26	2018-07-01	2019-11-01	15	407.32	111.88	27.15
27	2020-04-01	2020-04-01	1	0.20	0.20	0.20
28	2020-09-01	2020-09-01	1	5.80	5.80	5.80
29	2021-05-01	2021-06-01	2	14.42	10.80	7.21
30	2021-10-01	2022-05-01	7	21.70	15.76	3.10
31	2022-09-01	2022-10-01	2	157.60	99.90	78.80
32	2023-05-01	2023-10-01	6	257.07	118.15	42.85

La Figura 14 expone una representación espacial del promedio de la duración y magnitud de las sequías en las subcuencas que conforman la cuenca del río Tempisque, diferenciando entre el escurrimiento y la precipitación. En las Figuras 14a y 14b se muestra la duración de las sequías (en meses), mientras que en las Figuras 14c y 14d se presenta su magnitud (en milímetros).

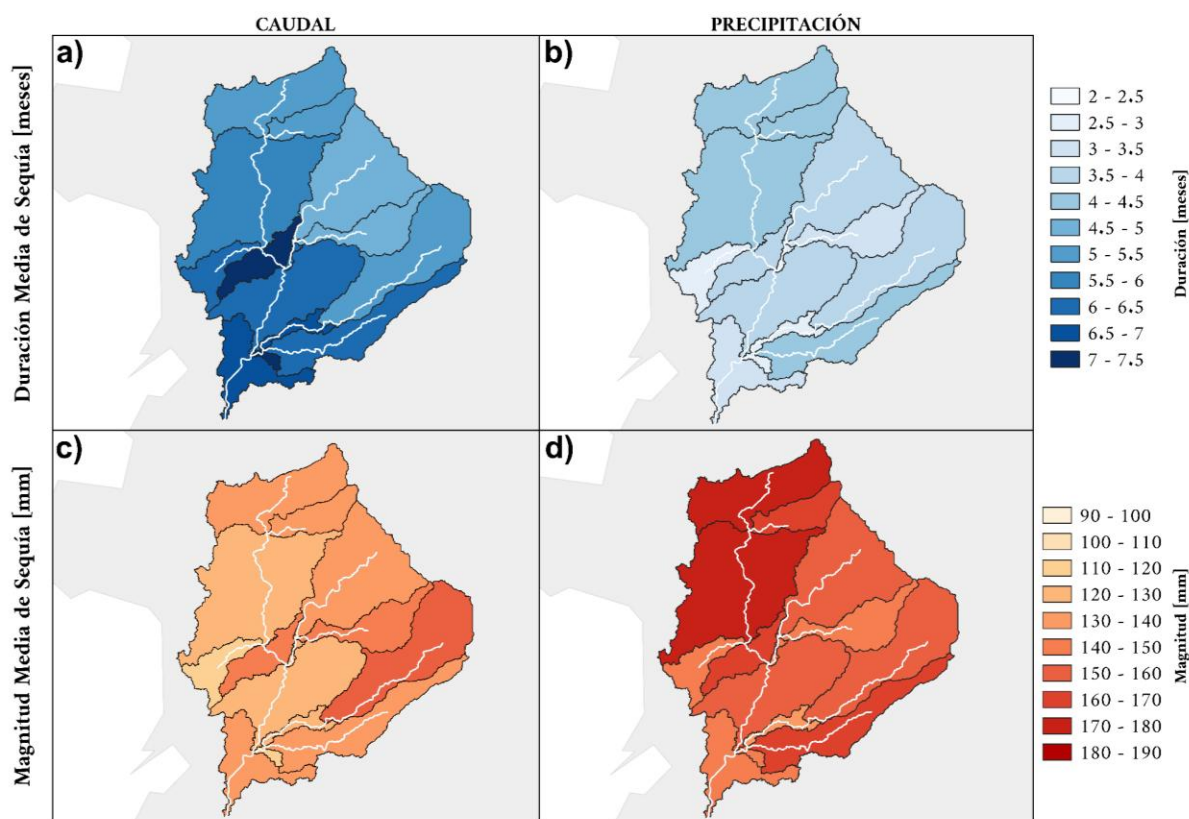


Figura 14. Duración y magnitud promedio de los déficits de caudal y precipitación en la cuenca del río Tempisque. El caudal corresponde al generado para cada subcuenca y no a la aportación acumulada aguas arriba.

En la Figura 14a, la mayor duración promedio de la sequía hidrológica se concentra en la zona occidental de la cuenca, principalmente a lo largo del río Tempisquito y hacia la zona baja donde convergen los ríos Tempisquito, Los Ahogados y Tempisque, así como en la desembocadura donde se juntan los ríos Tempisque, Colorado y Santa Inés. En estas áreas, las sequías alcanzan duraciones promedio de hasta 7.5 meses, mientras que, en la zona oriental de la cuenca, las duraciones promedio no superan los 5 meses. Por otra parte, en las Figuras 14c y 14d, los valores más grandes de la magnitud promedio de la sequía en el caudal se concentran en la zona oriental, alcanzando déficits cercanos a los 140 mm. Esto indica que la magnitud de la sequía de caudal no coincide con su duración.

Por otro lado, las mayores duraciones de sequía meteorológica se localizan en la parte alta de la cuenca (sobre la subcuenca del Río Tempisquito) y a lo largo del Río Santa

Inés, con duraciones promedio de alrededor de 5 meses. En cuanto a la magnitud, los déficits más severos se presentan a lo largo de los ríos Tempisquito y Santa Inés, en donde se registran valores de magnitud promedio de hasta 190 mm. Las aportaciones de precipitación del Caribe influyen a la reducción de la duración de la sequía (2 a 3 meses) en la zona noreste y que su magnitud no sea tan severa como el oriente y partes bajas de la cuenca. El análisis espacial muestra que la precipitación presenta una relación directa entre la duración y la magnitud de sequías.

V.4 Análisis de eventos extremos: inundaciones

En la Figura 15 se muestra el ajuste de la función de distribución Gamma de tres parámetros para el análisis de los caudales diarios máximos anuales. Este gráfico permite asociar el periodo de retorno teórico a los eventos extremos de caudal, en donde el caudal máximo simulado con el modelo hidrológico alcanza un periodo de retorno de ~50 años.

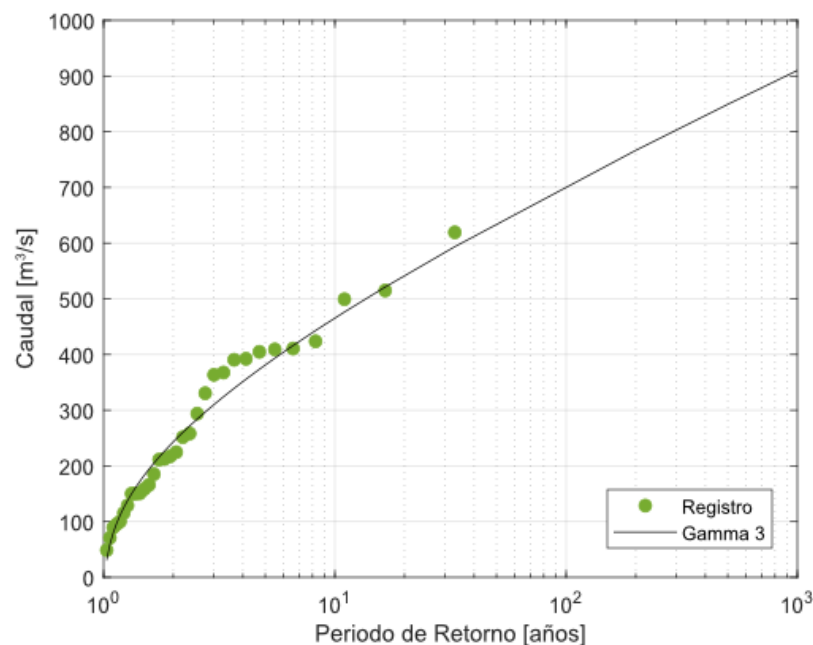


Figura 15. Análisis de caudales diarios máximos anuales en el río Tempisque a partir de una función Gamma de 3 parámetros.

La Figura 16 presenta la serie temporal de caudales extremos a la salida de la cuenca para el periodo comprendido entre 1992 y 2023, junto con los periodos de retorno teóricos en la escala del eje derecho, representados por las líneas horizontales ($Tr = 5, 10, 20, 50$ y 100 años).

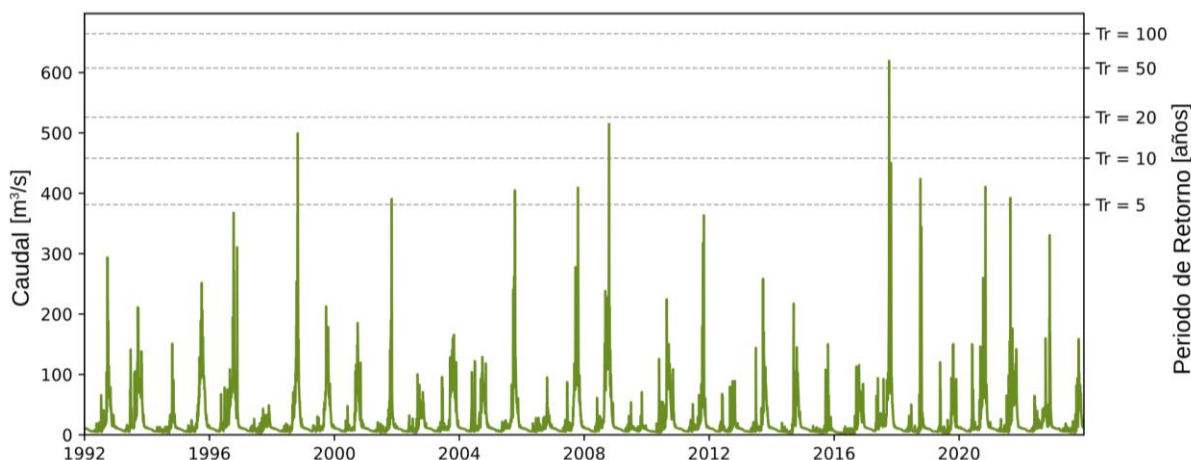


Figura 16. Eventos extremos de caudal en la descarga de la cuenca de río Tempisque.

El periodo de retorno de 5 años, con caudales que oscilan alrededor de los $400 \text{ m}^3/\text{s}$, ha sido superado en 6 ocasiones en los 32 años de la serie de caudal simulado. El caudal asociado a 10 años de periodo de retorno, con un valor de $450 \text{ m}^3/\text{s}$, ha sido superado en tres ocasiones. Sólo en una ocasión se ha superado el caudal con 50 años de periodo de retorno, con un valor de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, se resalta que los valores extremos de caudal utilizados para la calibración del modelo superaban el rango de los 50 años periodo de retorno en tres ocasiones para el periodo de 1990 a 2003.

El caudal extremo simulado asociado a un periodo de retorno de 50 años coincide con el fenómeno de La Niña de 2017 y, en particular, con la tormenta tropical Nate, ocurrida a finales de ese año. De igual forma, los picos que superan el periodo de retorno de 10 años coinciden con el fenómeno La Niña y con el huracán Mitch en 1998 y la tormenta tropical Alma en 2008, de acuerdo con lo reportado por NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), el Instituto Meteorológico Nacional (INM) de Costa Rica, y con la información disponible distintos medios de comunicación.

En conjunto, estos resultados reflejan la influencia directa de fenómenos climáticos observados en 1998, 2008 y finales de 2017, asociados con los caudales con periodos de retorno de 10 años o superiores. Este análisis es fundamental para la gestión del riesgo y podría ayudar directamente a la preparación de la población ante posibles periodos de retorno de eventos históricos de inundación en la cuenca.

Con el objetivo de identificar las zonas más propensas a la ocurrencia de eventos extremos de inundaciones, la Figura 17 presenta mapas espaciales que estiman los caudales máximos y el número de excedencias por subcuenca para los distintos periodos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 20 y 50 años.

A partir de este análisis se distingue una división entre las zonas norte y sur en el panel correspondiente a $Tr=2$ años, en donde los valores más altos de caudal se concentran en la zona norte. Para los periodos de retorno de 5 y 10 años, el comportamiento de la cuenca es similar, con un aumento notable de los caudales máximos principalmente en las zonas norte y central. Por último, los periodos de 20 y 50 años presentan los valores más altos en la parte occidental de la cuenca, seguidos por la zona oriental, lo que evidencia las áreas con mayor vulnerabilidad a inundaciones. En contraste, la zona central presenta los valores más bajos en todos los escenarios.

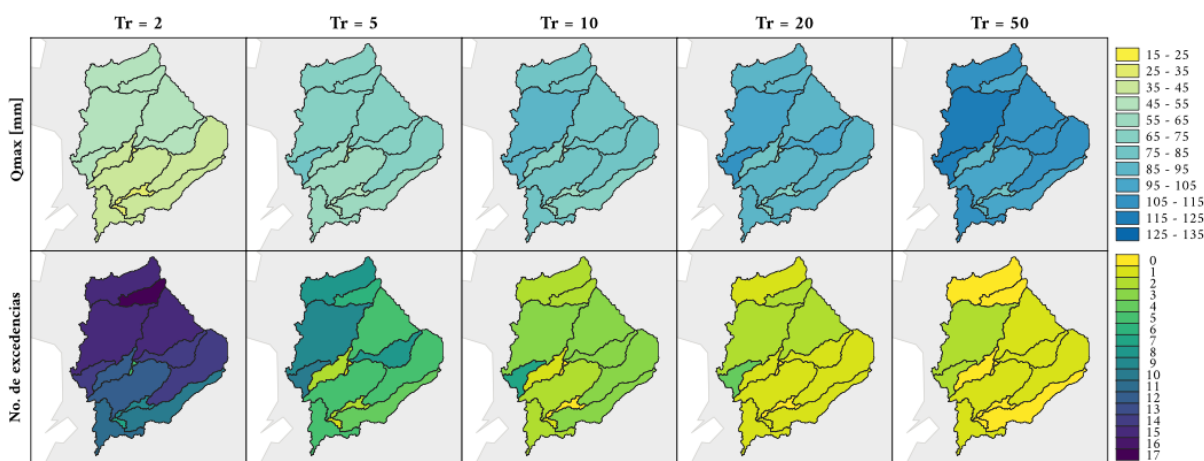


Figura 17. Caudal diario asociado a distintos periodos de retorno y número de veces que ese caudal es excedido. El caudal corresponde al generado para cada subcuenca y no a la aportación acumulada aguas arriba.

Los paneles inferiores muestran el número de excedencias asociadas a cada subcuenca, es decir, la cantidad de veces que se ha superado un umbral crítico en el periodo simulado. Existe una tendencia a que en la zona norte y oriente se superen con mayor frecuencia los eventos extremos asociados a diferentes periodos de retorno, mientras que, en la zona sur y sureste, los eventos extremos son menos frecuentes. Para el $T_r=50$, las zonas más afectadas son la oriente y principalmente la occidente, donde algunas subcuencas registran hasta 2 excedencias para el periodo de 1992 a 2023.

En conjunto, este análisis permite identificar las áreas críticas donde la recurrencia y magnitud de los eventos extremos podrían representar un riesgo para las actividades humanas, destacando que la zona norte y oriente contiene las subcuencas más vulnerables a eventos de inundación.

VI. Conclusiones

El análisis de eventos extremos de inundaciones y sequías resulta esencial para comprender los impactos ambientales y socioeconómicos en regiones vulnerables de la cuenca del río Tempisque. En este trabajo se integran datos satelitales y trazadores isotópicos ($\delta^2H, \delta^{18}O$) en el modelo hidrológico semidistribuido HYPE en la cuenca del río Tempisque, con el propósito de mejorar la representación de la respuesta hidrológica de la cuenca y caracterizar los eventos extremos entre 1990 y 2023 en los trópicos secos de Costa Rica.

La incorporación de isótopos estables y productos de percepción remota demostró ser una herramienta eficiente para analizar la variabilidad climática y alimentar al modelo con información continua, ayudando a la limitada disponibilidad de registros *in situ*. La delimitación y caracterización hidrológica de la cuenca permitieron identificar su marcada estacionalidad climática y la influencia orográfica de los vientos alisos del Caribe, los cuales ingresan gracias a la depresión topográfica en el flanco oriental y la configuración de la cordillera en el pacífico norte. Este fenómeno facilita el traspaso de humedad y precipitación hacia la zona de estudio, condicionando directamente su composición isotópica.

La calibración conjunta con caudal e isótopos mostró mejoras sustanciales en la representación de la señal isotópica y en el comportamiento del caudal base en comparación con la calibración del modelo únicamente con registros de caudal observado. El modelo hidrológico semidistribuido HYPE con las métricas específicas para Costa Rica reprodujo de forma eficaz la dinámica general del caudal, alcanzando valores medios de KGE de 0.61, el cual se encuentra dentro del rango reportado en estudios similares, confirmando la robustez del modelo.

Los resultados muestran que las sequías presentan mayor severidad y persistencia que las inundaciones, destacando la sequía del 2015, el evento más extremo del periodo analizado. Se identificó que la duración del déficit de caudal se amplifica en comparación con la precipitación, debido a la propagación de la sequía que genera reducción del

caudal base. Las zonas centro y sur de la cuenca resultaron ser más afectadas, incrementando la vulnerabilidad agrícola y socioeconómica. El evento más extremo corresponde a la sequía del 2015, coincidiendo con el fenómeno de El Niño, con una duración acumulada de 18 meses y un déficit de caudal de ~610 mm.

Por su parte, los eventos de caudal extremo asociados a diferentes periodos de retorno se ajustaron a una distribución Gamma de 3 parámetros, la cual permitió identificar umbrales críticos asociados a inundaciones recurrentes. Los eventos extremos de caudal estuvieron asociados a años influenciados por fenómenos La Niña y huracanes como Mitch (1998) y la tormenta tropical Nate en 2017, la cual coincide con el periodo de retorno de 50 años, el más severo del registro del caudal simulado. El análisis espacial de los eventos de inundación sugiere que la zona norte y oriente son las más susceptibles a presentar caudales de mayor magnitud y en mayor frecuencia.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian la eficiencia de integrar trazadores isotópicos, modelación hidrológica y percepción remota para profundizar en la comprensión de la dinámica hídrica en regiones tropicales con variabilidad climática. Este enfoque no solo mejora la capacidad predictiva de los modelos, sino que además proporciona herramientas más precisas para la gestión del recurso hídrico y la evaluación del riesgo ante eventos extremos, facilitando una planificación más informada, orientada a disminuir impactos socioeconómicos graves y pérdidas humanas asociadas.

Finalmente, la metodología aplicada en la cuenca del río Tempisque, en Costa Rica, tiene un alto potencial de replicabilidad en México con el objetivo de fortalecer los sistemas de alerta temprana ante sequías e inundaciones. Dado que el modelo HYPE y el análisis de bases de datos son herramientas eficientes, la implementación en México es factible, siempre que se cuente con la inversión en redes de monitoreo, sensores y la colaboración con laboratorios isotópicos. El control sobre dichas variables permite generar mapas de riesgo y periodos de retorno, proporcionando una herramienta de prevención fundamental para mitigar impactos socioeconómicos y proteger la vida humana y de los ecosistemas.

VII. Referencias

Alvarado Induni, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. Editorial UCR.

Alvarado, G., & Cárdenes, G. (n.d.). Chapter 3 Geology, Tectonics, and Geomorphology of Costa Rica: A Natural History Approach. <https://www.researchgate.net/publication/307465350>

Arciniega-Esparza, S., & Birkel, C. (2022). *OACG - Hidrología de Costa Rica*. <https://Docs.Oacg-Hydrology.Site/>.

Arciniega-Esparza, S., Birkel, C., Chavarría-Palma, A., Arheimer, B., & Breña-Naranjo, J. A. (2022). Remote sensing-aided rainfall-runoff modeling in the tropics of Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(4), 975–999. <https://doi.org/10.5194/hess-26-975-2022>

Arciniega-Esparza, S., Birkel, C., Durán-Quesada, A. M., Sánchez-Murillo, R., Moore, G. W., Maneta, M. P., Boll, J., Negri, L. B., Tetzlaff, D., Yoshimura, K., & Soulsby, C. (2023). Tracer-aided ecohydrological modelling across climate, land cover, and topographical gradients in the tropics. *Hydrological Processes*, 37(5), 1–20. <https://doi.org/10.1002/hyp.14884>

Arciniega-Esparza, S., Hernández-Espriú, A., & Young, M. H. (2022). Implications of unconventional oil and gas development on groundwater resources. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 27). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100346>

Balasubramanian, A. (n.d.). *Floods as Natural Hazards*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18898.96962>

Bamler, R. (1999). The SRTM mission: A world-wide 30m resolution DEM from SAR interferometry in 11 days. *Photogrammetric Week*.

Basak, I., & Balakrishnan, N. (2012). Estimation for the three-parameter gamma distribution based on progressively censored data. *Statistical Methodology*, 9(3), 305–319. <https://doi.org/10.1016/j.stamet.2011.08.005>

Birkel, C., & Barahona, A. C. (2019). Rainfall-Runoff Modeling: A Brief Overview. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11595-7>

Birkel, C., & Soulsby, C. (2015). Advancing tracer-aided rainfall-runoff modelling: A review of progress, problems and unrealised potential. *Hydrological Processes*, 29(25), 5227–5240. <https://doi.org/10.1002/hyp.10594>

Birkel, C., Broder, T., & Biester, H. (2017). Nonlinear and threshold-dominated runoff generation controls DOC export in a small peat catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(3), 498–513. <https://doi.org/10.1002/2016JG003621>

Birkel, C., Miller, J., Watson, A., Anh Trinh, D., Durán-Quesada, A. M., Sánchez-Murillo, R., Soulsby, C., Terzer-Wassmuth, S., Tetzlaff, D., Uhlenbrook, S., Vystavna, Y., & Yoshimura, K. (2025). Demystifying the art of isotope-enabled hydrological and climate modelling. *Science of the Total Environment*, 959. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178242>

Birkel, C., Soulsby, C., & Tetzlaff, D. (2012). Modelling the impacts of land-cover change on streamflow dynamics of a tropical rainforest headwater catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 57(8), 1543–1561. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.728707>

Brunner, M. I. (2023). Floods and droughts: a multivariate perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(13), 2479–2497. <https://doi.org/10.5194/hess-27-2479-2023>

Brunner, M. I., Slater, L., Tallaksen, L. M., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* (Vol. 8, Issue 3). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/wat2.1520>

Camacho, J., Sanchez-Murillo, R., & Selker, J. (2025). *Evaluating precipitation amount and water isotope ratios in the OPEnS and Palmex RS1 passive collectors: implications for high-frequency precipitation sampling*. <https://doi.org/10.22541/au.174235525.57826877/v1>

Chavarría-Pizarro, L., Watson-Hernández, F., Quesada-Alvarado, F., Serrano-Núñez, V., Bustos-Vásquez, A. L., Fernández-Chávez, K., Chacón-Gutierrez, J., & Guzmán-Arias, I. (2024). Determination of Environmental Flow Using a Holistic Methodology in Three River Paths in the Tempisque River Basin, Costa Rica. *Hydrology*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/hydrology11100159>

Chen, L., & Wang, L. (2018). Recent advance in earth observation big data for hydrology. In *Big Earth Data* (Vol. 2, Issue 1, pp. 86–107). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1435072>

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses

(SAGA) v. 2.1.4. Geoscientific Model Development. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

Correa, A., Birkel, C., Gutierrez, J., Dehaspe, J., Durán-Quesada, A. M., Soulsby, C., & Sánchez-Murillo, R. (2020). Modelling non-stationary water ages in a tropical rainforest: A preliminary spatially distributed assessment. *Hydrological Processes*, 34(25), 4776–4793. <https://doi.org/10.1002/hyp.13925>

Dehaspe, J., Birkel, C., Tetzlaff, D., Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M., & Soulsby, C. (2018). Spatially distributed tracer-aided modelling to explore water and isotope transport, storage and mixing in a pristine, humid tropical catchment. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.13258>

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Gironás, J., & Núñez, M. (2025). Definition and Characterization of Drought. In *Global Issues in Water Policy* (Vol. 31, pp. 11–26). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85040-0_2

Gómez-Delgado, F., Roupsard, O., le Maire, G., Taugourdeau, S., Pérez, A., van Oijen, M., Vaast, P., Rapidel, B., Harmand, J. M., Voltz, M., Bonnefond, J. M., Imbach, P., & Moussa, R. (2011). Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 369–392. <https://doi.org/10.5194/hess-15-369-2011>

González-Ortigoza, S., Hernández-Espriú, A., & Arciniega-Esparza, S. (2023). Regional modeling of groundwater recharge in the Basin of Mexico: new insights from satellite observations and global data sources. *Hydrogeology Journal*, 31(7), 1971–1990. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02667-w>

Gu, L., Yin, J., Slater, L. J., Chen, J., Do, H. X., Wang, H. M., Chen, L., Jiang, Z., & Zhao, T. (2023). Intensification of Global Hydrological Droughts Under Anthropogenic Climate Warming. *Water Resources Research*, 59(1). <https://doi.org/10.1029/2022WR032997>

Gutiérrez Miranda, M., Fernández Saborío, M. C., & Valverde Barquero, M. J. (2021). Adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo en comunidades del río Tempisque, Costa Rica. *Estudios de La Gestión. Revista Internacional de Administración*, 75–95. <https://doi.org/10.32719/25506641.2021.10.4>

Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>

Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Pérez-Briceño, P. M. (2021). Projected Climate Changes of CMIP5 models in La Cruz, Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 69, S60–S73. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69is2.48307>

Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Quesada-Montano, B. (2017). Observed (1970–1999) climate variability in Central America using a high-resolution meteorological dataset with implication to climate change studies. *Climatic Change*, 141(1), 13–28. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1786-y>

Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., & Quesada-Román, A. (2024). Flood projections for selected Costa Rican main basins using CMIP6 climate models downscaled output in the HBV hydrological model for scenario SSP5-8.5. *Hydrological Research Letters*, 18(1), 35–42. <https://doi.org/10.3178/hrl.18.35>

Huguenin, C. N., Serafin, K. A., & Waylen, P. R. (2023). A spatio-temporal analysis of the role of climatic drivers influencing extreme precipitation events in a Costa Rican basin. *Weather and Climate Extremes*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100602>

HYPE File Reference

Jung, H., Tetzlaff, D., Birkel, C., & Soulsby, C. (2025). Recent Developments and Emerging Challenges in Tracer-Aided Modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 12(2). <https://doi.org/10.1002/wat2.70015>

Khu, S.T., Werner, M. G. F. (2003). Reduction of Monte-Carlo simulation runs for uncertainty estimation in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 7 (5), pp.680-692. hal-00304915. See Document

Knoben, W. J. M., Freer, J. E., Fowler, K. J. A., Peel, M. C., & Woods, R. A. (2019). Modular Assessment of Rainfall–Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v1.2: an open-source, extendable framework providing implementations of 46 conceptual hydrologic models as continuous state-space formulations. *Geoscientific Model Development*, 12(6), 2463–2480. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2463-2019>

Luino, F. (2016). *Floods* (pp. 1–6). https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_126-1

- Luo, J., Xia, C., Wang, G., Yu, R., Gao, R., Liu, X., Miao, P., Qiao, Q., & Lin, J. (2025). Stable isotopes reveal the evaporation effects during a drought–flood abrupt alternation period in a semiarid river basin in Inner Mongolia, Northwest China. *Journal of Hydrology*, 662, 134028. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134028>
- Mayer-Anhalt, L., Birkel, C., Sánchez-Murillo, R., & Schulz, S. (2022). Tracer-aided modelling reveals quick runoff generation and young streamflow ages in a tropical rainforest catchment. *Hydrological Processes*, 36(2). <https://doi.org/10.1002/hyp.14508>
- McCabe, M. F., Rodell, M., Alsdorf, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., Houborg, R., Verhoest, N. E. C., Franz, T. E., Shi, J., Gao, H., & Wood, E. F. (2017). The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3879–3914. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3879-2017>
- Meng, F., Liu, S., Han, Z., Wang, Y., Wu, R., & Shi, H. (2025). A new perspective on socioeconomic drought: a distributed and standardized index. *Environmental Research Letters*, 20(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adba00>
- Ndehedehe, C. (2022). Satellite Remote Sensing of Terrestrial Hydrology. In *Satellite Remote Sensing of Terrestrial Hydrology*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-99577-5>
- Nobakht, M., Beavis, P., O'Hara, S., Hutjes, R., Supit, I. (2019): Agroclimatic indicators from 1951 to 2099 derived from climate projections. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: [10.24381/cds.dad6e055](https://doi.org/10.24381/cds.dad6e055) (Accessed on 18-03-2025)
- Odongo, R. A., de Moel, H., & van Loon, A. F. (2023). Propagation from meteorological to hydrological drought in the Horn of Africa using both standardized and threshold-based indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(6), 2365–2386. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2365-2023>
- Ordóñez-Olivares, A., & Beita-Sandí, W. (2020). Caracterización fisicoquímica e isotópica (^{18}O y ^2H) de la región norte del acuífero Tempisque, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 12(1), e2588. <https://doi.org/10.22458/urj.v12i1.2588>
- Pan, S., Pan, N., Tian, H., Friedlingstein, P., Sitch, S., Shi, H., Arora, V. K., Haverd, V., Jain, A. K., Kato, E., Lienert, S., Lombardozzi, D., Otle, C., Poulter, B., & Zaehle, S. (2019). Evaluation of global terrestrial evapotranspiration by state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning, and land surface models. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–51. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-409>

Peredo, D., Ramos, M.-H., Andréassian, V., & Oudin, L. (2022). Investigating hydrological model versatility to simulate extreme flood events. *Hydrological Sciences Journal*, 67(4), 628–645. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2030864>

Pesántez, J., Birkel, C., Mosquera, G. M., Célleri, R., Contreras, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2023). Bridging the gap from hydrological to biogeochemical processes using tracer-aided hydrological models in a tropical montane ecosystem. *Journal of Hydrology*, 619, 129328. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129328>

Quesada-Román, A. (2021). Review of the geomorphological effects of the 1991 Limón earthquake. *Revista Geológica Dde América Central*. <https://www.researchgate.net/publication/351055242>

Quesada-Román, A. (n.d.). *Landscapes and Landforms of Costa Rica*.

Real-Rangel, R. A., Pedrozo-Acuña, A., Agustín Breña-Naranjo, J., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2020). A drought monitoring framework for data-scarce regions. *Journal of Hydroinformatics*, 22(1), 170–185. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.020>

Rojas Alvarado, C., Guzmán Vindas, G., & Méndez García, M. (2023). El fenómeno ENSO y la precipitación de la Zona Protectora Monte Alto, Costa Rica. *Ingeniería*, 34(1), 1–6. <https://doi.org/10.15517/ri.v34i1.54178>

Rojas, N., Alfaro, M., Solano, J., Araya Cristina, & Villalobos, R. (2011). *Estudio de las Cuencas Hidrográficas de Costa Rica. Análisis biofísico, climatológico y socioeconómico*.

Sánchez-Murillo, R., & Birkel, C. (2016). Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 5060–5069. <https://doi.org/10.1002/2016GL068888>

Sánchez-Murillo, R., Birkel, C., Boll, J., Esquivel-Hernández, G., Rojas-Jiménez, L. D., Castro-Chacón, L., Durán-Quesada, A. M., Voarintsoa, N. R. G., Dee, S. G., & Winguth, A. M. E. (2023). ENSO sentinels in the Americas' humid tropics: We need combined hydrometric and isotopic monitoring for improved El Niño and La Niña impact prediction. *Hydrological Processes*, 37(12). <https://doi.org/10.1002/hyp.15027>

Slater, L. J., Anderson, B., Buechel, M., Dadson, S., Han, S., Harrigan, S., Kelder, T., Kowal, K., Lees, T., Matthews, T., Murphy, C., & Wilby, R. L. (2021). Nonstationary weather and water extremes: A review of methods for their detection, attribution, and management. In *Hydrology and Earth System Sciences* (Vol. 25, Issue 7, pp. 3897–3935). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3897-2021>

Slater, L., Villarini, G., Archfield, S., Faulkner, D., Lamb, R., Khouakhi, A., & Yin, J. (2021). Global Changes in 20-Year, 50-Year, and 100-Year River Floods. *Geophysical Research Letters*, 48(6). <https://doi.org/10.1029/2020GL091824>

Solíís, Á., Kohlmann, B., & Alvarado, G. E. (2024). A Costa Rican Biological Puzzle—The Geological, Landscape, and Vicariance History as a Conditioning of the Past and Present Biogeography. In *World Geomorphological Landscapes: Vol. Part F3501* (pp. 189–220). Springer Science and Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64940-0_10

Solis, C. (2023). *MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TEMPISQUE (COSTA RICA) ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO HÍDRICOS*.

Stadnyk, T. A., & Holmes, T. L. (2023). Large scale hydrologic and tracer aided modelling: A review. In *Journal of Hydrology* (Vol. 618). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129177>

Sutanto, S. J., & van Lanen, H. A. J. (2021). Streamflow drought: Implication of drought definitions and its application for drought forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(7), 3991–4023. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3991-2021>

Van Kempen, G., van der Wiel, K., & Melsen, L. A. (2021). The impact of hydrological model structure on the simulation of extreme runoff events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(3), 961–976. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-961-2021>

Van Loon, A. F., Kchouk, S., Matanó, A., Tootoonchi, F., Alvarez-Garreton, C., Hassaballah, K. E. A., Wu, M., Wens, M. L. K., Shyrokaya, A., Ridolfi, E., Biella, R., Nagavciuc, V., Barendrecht, M. H., Bastos, A., Cavalcante, L., de Vries, F. T., Garcia, M., Mård, J., Streefkerk, I. N., ... Werner, M. (2024). Review article: Drought as a continuum – memory effects in interlinked hydrological, ecological, and social systems. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(9), 3173–3205. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-3173-2024>

Van Loon, A. F., Stahl, K., di Baldassarre, G., Clark, J., Rangecroft, S., Wanders, N., Gleeson, T., van Dijk, A. I. J. M., Tallaksen, L. M., Hannaford, J., Uijlenhoet, R., Teuling, A. J., Hannah, D. M., Sheffield, J., Svoboda, M., Verbeiren, B., Wagener, T., & van Lanen, H. A. J. (2016). Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9), 3631–3650. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3631-2016>

Venegas-Cordero, N., Birkel, C., Giraldo-Osorio, J. D., Correa-Barahona, A., Duran-Quesada, A. M., Arce-Mesen, R., & Nauditt, A. (2021). Can hydrological drought be efficiently predicted by conceptual rainfall-runoff models with global data products? *JNRD - Journal of Natural Resources and Development*, 11, 20–37. <https://doi.org/10.18716/ojs/jnrd/2021.11.01>

Watson, A., Kralisch, S., Miller, J., Vystavna, Y., Gokool, S., Künne, A., Helmschrot, J., Arciniega-Esparza, S., Sanchez-Murillo, R., & Birkel, C. (2024). Advancing isotope-enabled hydrological modelling for ungauged calibration of data-scarce humid tropical catchments. *Hydrological Processes*, 38(2). <https://doi.org/10.1002/hyp.15065>

Westerberg, I. K., & Birkel, C. (2015). Observational uncertainties in hypothesis testing: investigating the hydrological functioning of a tropical catchment. *Hydrological Processes*, 29(23), 4863–4879. <https://doi.org/10.1002/hyp.10533>

Wohl, E., Barros, A., Brunsell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., Goldsmith, S., Harmon, R., Hendrickx, J. M. H., Juvik, J., McDonnell, J., & Ogden, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. In *Nature Climate Change* (Vol. 2, Issue 9, pp. 655–662). <https://doi.org/10.1038/nclimate1556>

Zhang, B., Wang, S., & Slater, L. (2024). Anthropogenic climate change doubled the frequency of compound drought and heatwaves in low-income regions. *Communications Earth and Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01894-7>