

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA VIRTUAL EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TEMPISQUE CON HBV
LIGHT Y SU APLICABILIDAD EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SARDINAL, COSTA RICA

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA DIVISIÓN DE
EDUCACIÓN Y LA ESCUELA DE POSGRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
GRADO DE

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

ALINA TRABADO SAGOT

TURRIALBA, COSTA RICA

Este trabajo de final de graduación ha sido aceptado en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobado por el Comité Examinador de la estudiante, como requisito para optar por el grado de

División de Educación

MÁSTER EN MANEJO Y GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

FIRMANTES:



William Jefferson Watler Reyes

William Watler Reyes, M.Sc.

Codirector Principal del Trabajo de Graduación

Jorge Hidalgo Madriz, M.Sc.

Codirector Principal del Trabajo de Graduación

Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.

Decana, a.i., de la Escuela de Posgrado

Alina Trabado Sagot

Candidata

Escuela de Posgrado

DEDICATORIA

*Para los que no me dejaron rendirme mientras
atravesaba tiempos difíciles.*

AGRADECIMIENTOS

Al comité asesor William Watler y Christian Birkel por su guía durante la elaboración de este proyecto, especialmente a Jorge Hidalgo que estuvo a la par mía durante todo el proceso. Gracias Jorge por tu paciencia, atención y amistad; por compartir los días de oficina y luchar conmigo todo el camino. Agradezco particularmente a Alex Moya, que a pesar de que no sacamos (aún) el modelo SPHY, fue creador de muchísimas rutinas para el procesamiento de datos del modelo. A Derek Rodríguez por enseñarme los caminos de Python. A José Pablo Cantillano por recomendarme el modelo HBV-Light. A Angie Araya y Guillermo Cornejo por empujarme a seguir adelante y dar el último esfuerzo para terminar este trabajo. Gracias Guillermo por escucharme todos los días y atender todas mis consultas. Te agradezco infinitamente tu preocupación y apoyo hasta el final. A mis amigos, Karina Picado, Helena Oses, Jorge Carranza, Alberto Montalvo, Isabel Calvo por siempre estar pendientes. A mi familia, por alimentarme bien. A Daniel Mora, por darme la mano y sacarme del abismo. Gracias Dani por regresar la música a mi vida.

CONTENIDO

RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 IMPORTANCIA.....	3
2 OBJETIVOS	4
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	4
3 MARCO REFERENCIAL	4
3.1 MODELO HIDROLÓGICO	4
3.2 MODELO HIDROLÓGICO HYPE	5
3.3 MODELO HIDROLÓGICO HBV-LIGHT	6
3.4 EVALUACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS.....	10
3.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	11
4 METODOLOGÍA.....	11
4.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
4.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	13
4.2.1 Características biofísicas	13
4.2.2 Características socioeconómicas.....	24
4.3 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	24
4.3.1 Descripción estadística de datos	24
4.3.2 Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Tempisque	25
4.3.3 Evaluación del modelo hidrológico.....	25
4.3.4 Aplicación del modelo en una subcuenca con características similares.....	26
5 RESULTADOS	27
5.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	27
5.1.1. Variables de entrada.....	27
5.1.1.1. Precipitación	27
5.1.1.2. Temperatura	28

5.1.1.3.	Evapotranspiración potencial	28
5.1.1.4.	Caudal.....	28
5.1.2.	Características estadísticas de los datos	34
5.1.3.	Procesamiento de información.....	38
5.1.4.	Configuración del modelo	38
5.1.4.1.	Parámetros del modelo.....	41
5.1.5.	Simulación del modelo.....	42
6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	48
7	CALIBRACIÓN DEL MODELO	51
8	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	53
9	SIMULACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SARDINAL	57
9.1	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	57
9.1.1	Parámetros del modelo.....	57
9.1.2	Simulación de la cuenca.....	58
10	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
11	CONCLUSIONES.....	65
12	RECOMENDACIONES.....	66
13	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
14	ANEXOS.....	72
14.1	RESULTADOS POR AÑO PARA LA SIMULACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SARDINAL. 72	
14.2	PERFIL DE INSTRUMENTOS: FICHA TÉCNICA DE MODELO HIDROLÓGICO HBV-LIGHT 81	

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características morfológicas de la cuenca alta del río Tempisque en Guardia	13
Cuadro 2. Porcentajes de uso del suelo en la cuenca alta del río Tempisque.	19
Cuadro 3. Uso del suelo en la subcuenca del río Sardinal.	20
Cuadro 4. Características estadísticas de las series de tiempo de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal para las cuencas del río Tempisque y río Sardinal	34
Cuadro 5. Distribución de zonas de elevación-vegetación en la configuración del modelo para la cuenca alta del río Tempisque.....	38
Cuadro 6. Rango de parámetros para el modelo HBV-Light	41
Cuadro 7. Rango de parámetros para el modelo HBV-Light, sugeridos por Beck et al. (2016)	41
Cuadro 8. Características estadísticas de los periodos de calibración y validación para la serie de tiempo de caudal observado.....	42
Cuadro 9. Parámetros resultantes para la mejor simulación con el método de Monte Carlo y métricas de desempeño asociadas.	43
Cuadro 10. Resumen de resultados del modelo HBV_Light para la primera simulación con Monte Carlo.	44
Cuadro 11. Vector de parámetros que producen la mejor función objetivo ponderada para cada uno de los procesos de calibración realizados.....	52
Cuadro 12. Valores de las métricas de desempeño para cada uno de los procesos de calibración realizados.	52
Cuadro 13. Resumen de resultados del modelo HBV_Light para la simulación de validación.....	53
Cuadro 14. Distribución de zonas de elevación-vegetación en la configuración del modelo para la subcuenca del río Sardinal.....	57
Cuadro 15. Vector de parámetros para la implementación del modelo HBV-Light en la subcuenca del río Sardinal.	57
Cuadro 16. Resumen de resultados del modelo HBV_Light para la simulación de la subcuenca del río Sardinal.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del modelo HBV-Light. Fuente: adaptado de Seibert (2005).	7
Figura 2. Contribución de la precipitación al almacenamiento de agua subterránea (izquierda) y reducción de la ETP según el almacenamiento de la humedad del suelo (derecha). Fuente: adaptado de Seibert (2005).	8
Figura 3. Función de respuesta. Fuente: adaptado de Seibert (2005).	9
Figura 4. Ubicación de la cuenca alta del río Tempisque y subcuenca del río Sardinal.	12
Figura 5. Curva hipsométrica de la cuenca alta del río Tempisque en Guardia y la subcuenca del río Sardinal.	14
Figura 6. Frecuencia de altitudes de la cuenca alta del río Tempisque en Guardia y la subcuenca del río Sardinal	15
Figura 7. Red hídrica en la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal.	16
Figura 8. Precipitación media anual en la cuenca alta del río Tempisque en Guardia y la subcuenca del río Sardinal. Fuente: Ortiz-Malavasi, E. (2014).	18
Figura 9. Mapa de uso del suelo en la cuenca alta del río Tempisque en Guardia. Fuente: Fernández, 2010.	20
Figura 10. Mapa de uso del suelo en la subcuenca del río Sardinal. Fuente: AyA, 2023.	21
Figura 11. Zonas de vida en la cuenca alta del río Tempisque y subcuenca del río Sardinal. Fuente: Ortiz, 2014.	23
Figura 12. Diagrama del proceso metodológico	26
Figura 13. Gráfico de las series de tiempo de precipitación de la subcuenca del río Sardinal y cuenca alta del río Tempisque.	29
Figura 14. Gráfico de las series de tiempo de temperatura de la subcuenca del río Sardinal y cuenca alta del río Tempisque.	30
Figura 15. Gráfico de las series de tiempo de evapotranspiración potencial de la subcuenca del río Sardinal y cuenca alta del río Tempisque.	31
Figura 16. Gráfico de las series de tiempo de caudal de la subcuenca del río Sardinal, simulado por el modelo HYPE y la serie de caudal de la cuenca alta del río Tempisque.	32
Figura 17. Curva de probabilidad de excedencia de las series de tiempo de caudal de la subcuenca del río Sardinal, simulado por el modelo HYPE y la serie de caudal de la cuenca alta del río Tempisque.	33
Figura 18. Histogramas y gráficos de cajas de las series de datos de entrada Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración y Caudal para la cuenca alta del río Tempisque.	36
Figura 19. Histogramas y gráficos de cajas de las series de datos de entrada Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración y Caudal para la subcuenca del río Sardinal.	37

Figura 20. Mapa de zonas de elevación-vegetación en la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal.....	40
Figura 21. Resultados obtenidos de la serie de caudal y precipitación para el primer ajuste del modelo con el método de Monte Carlo.	45
Figura 22. Resultados obtenidos para la evapotranspiración real y potencial para el primer ajuste del modelo con el método de Monte Carlo.....	46
Figura 23. Resultados obtenidos para el nivel de agua subterránea en cada subnivel para el primer ajuste del modelo con el método de Monte Carlo.....	47
Figura 24. Gráficos de distribución de probabilidad acumulada para el RSA de los parámetros del modelo: PERC, UZL, K0, K1, K2, CET, MAXBAS, FC1.	49
Figura 25. Gráficos de distribución de probabilidad acumulada para el RSA de los parámetros del modelo: LP1, β 1, FC2, LP2, β 2, FC3, LP3, β 3.	50
Figura 26. Resultados obtenidos de la serie de caudal y precipitación para la simulación de validación del modelo.	54
Figura 27. Resultados obtenidos para la evapotranspiración real y potencial para la simulación de validación del modelo.	55
Figura 28. Resultados obtenidos para el nivel de agua subterránea en cada subnivel para la simulación de validación del modelo.....	56
Figura 29. Resultados obtenidos de la serie de caudal y precipitación para la simulación en la subcuenca del río Sardinal.....	60
Figura 30. Resultados obtenidos para la evapotranspiración real y potencial para la simulación en la subcuenca del río Sardinal.....	61
Figura 31. Resultados obtenidos para el nivel de agua subterránea en cada subnivel para simulación en la subcuenca del río Sardinal.	62

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

ASADAS	Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
°C	Grados Celsius
CCI	Iniciativa de Cambio Climático
Cet	Factor de corrección de evaporación potencial
CHIRPS	Precipitación Infrarroja del Grupo de Peligros Climáticos con Datos Satelitales
CPC	Centro de Predicción Climática
CRTM05	Proyección Costa Rica Transversal Mercator 2005
ECMWF	Centro Europeo de Previsión Meteorológica a Medio Plazo
ERA5	5ª generación de Reanálisis Europeo
ESRL	Laboratorios de Investigación del Sistema Terrestre
ETP	Evapotranspiración Potencial
ETR	Evapotranspiración Real
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
FC	Almacenamiento máximo de humedad del suelo
FOP	Función Objetivo Ponderada
h	Elevación
HBV	Departamento de Balance Hídrico de la Agencia Hidrológica
HYPE	Predicciones hidrológicas para el medio ambiente
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
Int	Intercepción
Ki	Coeficiente de almacenamiento (o recesión)
KF	Factor de forma
KGE	Eficiencia de Kling-Gupta
LP	Valor de humedad del suelo por encima del cual la ETA alcanza la ETP
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
MAXBAS	Longitud de la función de ponderación triangular
MED	Modelo de Elevación Digital
mm	Milímetros
mm/día	Milímetros por día
MOD16	Proyecto Modis Global de Evapotranspiración
MODIS	Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
NSE	Valor de eficiencia de Nash-Sutcliffe
OAR	Investigación oceánica y atmosférica
P	Precipitación
PCALT	Aumento de la precipitación con la elevación
Pelev	Elevación de datos de precipitación en el archivo PTQ
PERC	Percolación desde el almacenamiento superior al inferior
PSL	Laboratorio de Ciencias Físicas
Q	Escorrentía superficial
RSA	Análisis de Sensibilidad Regionalizado

S	Almacenamiento de agua
SA	Análisis de Sensibilidad
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SLZ	Caja de agua subterránea inferior
SM	Contenido de agua en la caja del suelo
SMHI	Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco
SRTM	Misión de Topografía de Radar de Transbordador
SUZ	Caja de agua subterránea superior
T	Temperatura
t	Tiempo
TCALT	Disminución de la temperatura con la elevación
Telev	Elevación de datos de temperatura en el archivo PTQ
TT	Umbral de Temperatura
UZL	Parámetro Umbral
β	Parámetro que determina la contribución relativa a la escorrentía procedente de la lluvia o del deshielo.

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto de investigación fue realizar una modelación hidrológica de la cuenca alta del río Tempisque ubicada en Guanacaste, Costa Rica. Se delimitó la cuenca desde la estación hidrológica en Guardia utilizando el modelo HBV-Light. Luego se calibraron los parámetros y se aplicó el modelo en la subcuenca del río Sardinal, que carecía de información hidrológica, pero presentaba características geomorfológicas similares.

El modelo HBV-Light, utilizado para simular la escorrentía, se caracteriza por una estructura simple y es un modelo semi distribuido, fácil de comprender y aplicar. El modelo simula la descarga diaria a partir de datos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, utilizando tres rutinas: humedad del suelo, función de respuesta y enrutamiento. Las entradas consisten en productos satelitales de precipitación, temperatura y evapotranspiración, así como registros de caudales de la estación hidrológica en Guardia.

La evaluación del desempeño del modelo se llevó a cabo mediante tres estadísticas: la eficiencia de Nash- Sutcliffe (NSE), el logaritmo de NSE y la eficiencia de Kling-Gupta (KGE). Estas métricas se combinaron en una Función Objetivo Ponderada (FOP) con pesos específicos de 0.3, 0.3 y 0.4 para NSE, lnNSE y KGE, respectivamente. Se realizó un Análisis de Sensibilidad Regionalizado (RSA) para identificar y ajustar los parámetros más influyentes con el fin de optimizar el desempeño del modelo, destacando los parámetros de la rutina de humedad del suelo con mayor sensibilidad. Estos parámetros se ajustaron mediante procesos de calibración, como simulaciones de Monte Carlo y optimización de algoritmo genético (GAP), hasta obtener estadísticas de desempeño mejoradas. El modelo se validó con un conjunto de parámetros que generaron resultados con un valor FOP de 0.64 y valores de 0.60, 0.64 y 0.67 para las métricas NSE, lnNSE y KGE, respectivamente.

Al aplicar los parámetros calibrados en la subcuenca del río Sardinal, utilizando la serie de caudales simulados con el modelo HYPE (Arciniega-Esparza y Birkel, 2020) como referencia, se obtuvieron métricas de 0.6 para NSE y 0.4 para lnNSE. Aunque los resultados indicaron un buen desempeño en la determinación del comportamiento general del hidrograma y la simulación de picos, se señaló una deficiencia en la simulación de caudales bajos, sugiriendo la necesidad de mejorar mediante la recopilación de información de datos en campo para ajustar los parámetros y lograr una simulación más precisa de las condiciones en la subcuenca del río Sardinal.

PALABRAS CLAVE: HBV-LIGHT, MODELO PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD REGIONALIZADO

ABSTRACT

The objective of this research was to conduct hydrological modeling of the upper Tempisque River basin located in Guanacaste, Costa Rica. The basin was delineated from the hydrological station in Guardia using the HBV-Light model. Subsequently, parameters were calibrated, and the model was applied to the Sardinal River basin, which lacked hydrological information but exhibited similar geomorphological characteristics.

The HBV-Light model, employed for runoff simulation, is characterized by a simple structure and is a semi-distributed model that is easy to comprehend and apply. The model simulates daily discharge based on daily data of precipitation, temperature, and potential evapotranspiration, utilizing three routines: soil moisture, response function, and routing. Inputs include satellite products for precipitation, temperature, and evapotranspiration, as well as streamflow records from the hydrological station in Guardia.

Model performance evaluation was conducted using three statistics: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), the logarithm of NSE, and Kling-Gupta Efficiency (KGE). These metrics were combined into a Weighted Objective Function (WOF) with specific weights of 0.3, 0.3, and 0.4 for NSE, \ln NSE, and KGE, respectively. A Regionalized Sensitivity Analysis (RSA) was performed to identify and adjust the most influential parameters to optimize model performance, highlighting the sensitivity of soil moisture routine parameters. These parameters were adjusted through calibration processes such as Monte Carlo simulations and Genetic Algorithm Optimization (GAO) until enhanced performance statistics were achieved. The model was validated with a parameter set that generated results with a WOF value of 0.64 and values of 0.60, 0.64, and 0.67 for NSE, \ln NSE, and KGE metrics, respectively.

When applying the calibrated parameters to the Sardinal River basin, using the simulated flow series with the HYPE model (Arciniega-Esparza and Birkel, 2020) as a reference, metrics of 0.6 for NSE and 0.4 for \ln NSE were obtained. Although the results indicated good performance in determining the general behavior of the hydrograph and simulating peaks, a deficiency in the simulation of low flows was noted, suggesting the need for improvement through the collection of field data to adjust parameters and achieve a more accurate simulation of conditions in the Sardinal River basin.

KEY WORDS: HBV-LIGHT, PRECIPITATION-RUNOFF MODEL, REGIONALIZED SENSITIVITY ANALYSIS

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

De acuerdo con la Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2000), una de las regiones de mayor vulnerabilidad en Costa Rica es Guanacaste. El cambio climático impacta a toda la población en general, pero sus efectos recaen con mayor intensidad en las poblaciones más frágiles, principalmente quienes habitan en zonas altamente vulnerables a eventos climáticos e hidrológicos extremos (Gobierno de Costa Rica, 2018). Como respuesta al cambio climático, es indispensable la creación de planes de gestión del recurso hídrico sustentados en información hidrometeorológica actualizada. Estos planes deben incluir medidas de mitigación de riesgos asociados al cambio climático y lineamientos orientados a la toma de decisiones a nivel local y de política pública, de ser necesario implementar medidas ante posibles déficits hídricos.

Existen diversas investigaciones en el tema de modelación hidrológica, cambio climático y planificación del recurso hídrico en el Área de Conservación Guanacaste, la cual pertenece la cuenca del río Tempisque. De acuerdo con el Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (2008), la cuenca requiere atención prioritaria de los problemas asociados al recurso hídrico en términos de infraestructura, disponibilidad hídrica, conflictos por el uso, contaminación, aprovechamiento, riesgo de inundaciones y cambio climático.

Entre los estudios realizados se encuentra el de Calvo et al. (2013), cuyo objetivo fue caracterizar hidrológicamente la parte alta de la cuenca alta del río Tempisque. Generaron balances hídricos diarios para evaluar el impacto de distintos escenarios de cambio de uso del suelo y cambio climático. Además, propusieron una estrategia de planificación de recurso hídrico considerando la demanda actual y futura, con base en la información generada.

El estudio de Guzmán (2014) muestra la demanda y disponibilidad del recurso proyectadas al 2030, considerando diferentes escenarios de cambios en el uso de suelos y cambio climático. Se realiza además una propuesta de gestión del recurso hídrico a partir de un modelo de planificación vinculado a tres dimensiones: gobierno, control ciudadano y sector empresarial. Carvajal (2017), utilizó el modelo hidrológico SWAT para analizar el comportamiento del recurso hídrico en la cuenca del río Tempisquito a nivel de zonas de vida de Holdridge. Dicha investigación incluyó una proyección de la producción hídrica y sedimentos bajo diferentes escenarios de zonas de vida y cambio climático. Los estudios citados aportan insumos relevantes sobre la planificación hídrica territorial considerando variables biofísicas, socioeconómicas y climáticas para distintos horizontes temporales.

En la tesis del 2019 elaborada por Quesada, se utilizó el modelo hidrológico semi-distribuido HBV (Hydrologiska Byråns Vattenavdelning) (Käser et al., 2012) para analizar los cambios de cobertura de la tierra en la cuenca del río Tempisque y el impacto de la variabilidad climática, generando escenarios de los impactos en los cambios de la cobertura de la tierra a diferentes escalas de tiempo, información útil para la planificación territorial.

En el 2021 el estudio de Araya aplicó el modelo HBV en la cuenca alta del río Tempisque, con el objetivo de evaluar el impacto de la implementación de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) como aforestación, reforestación y creación de reservorios en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Las políticas públicas en Costa Rica se orientan al establecimiento de acciones que reduzcan los impactos del cambio climático mediante planes de manejo integrado del recurso hídrico (MINAET, 2008), en una escala macrorregional. Sin embargo, existen pocos estudios a nivel de subcuencas y microcuencas, donde habitan poblaciones más vulnerables, “como lo son los pueblos indígenas, las poblaciones en situación de riesgo social y las mujeres jefas de hogar en condiciones de pobreza” (Gobierno de Costa Rica, 2018). Estos grupos vulnerables dependen fuertemente de los servicios ecosistémicos tal como aprovechamiento del recurso hídrico para consumo humano, desarrollo de actividades económicas y recreación. Por lo tanto, los datos disponibles para fundamentar la toma de decisiones en materia de gestión del recurso hídrico a escala local son aún limitados. Esto evidencia la necesidad de generar conocimiento hidrológico territorialmente desagregado, que sirva de base para el diseño de estrategias de adaptación sensible al contexto de las poblaciones más expuestas.

El objetivo del estudio es realizar una modelación hidrológica capaz de representar el comportamiento de la cuenca alta del río Tempisque, y determinar si el modelo es aplicable en las subcuencas ubicadas en la zona del país con las mismas condiciones biofísicas, pero con limitantes de registros sistemáticos de datos hidrológicos in situ. Para ello, el modelo hidrológico será aplicado a la subcuenca del río Sardinal, localizada en la parte media de la cuenca del río Tempisque.

Para cumplir con el objetivo planteado, se implementará el modelo hidrológico semi-distribuido llamado HBV-Light, seleccionado dado su flexibilidad, eficiencia computacional y efectividad demostrada bajo un rango amplio de características climáticas y fisiográficas (Beck et al., 2016). Se utilizarán los datos de entrada procesados en el proyecto “*Simulaciones hidrológicas para Costa Rica - HYPE¹ CR*” (Arciniega-Esparza y Birkel, 2020), con la finalidad de realizar una comparación mediante estadística descriptiva entre los resultados de ambos modelos para la cuenca alta del río Tempisque y subcuenca del río Sardinal.

Finalmente, calibrado el modelo para la cuenca alta del río Tempisque se aplica en la subcuenca del río Sardinal. El propósito fue determinar si los datos hidrológicos generados por el modelo HBV-Light presentan diferencias significativas con respecto a los resultados del modelo HYPE desarrollado previamente, y así establecer líneas de acción de utilidad para las autoridades gestoras del recurso hídrico en Costa Rica, como las Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunales (ASADAS) y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) para apoyar la instrumentación y el monitoreo hidrológico en la subcuenca del río Sardinal.

¹ Modelo hidrológico semidistribuido HYPE (Hydrological Predictions for the Environment)

1.3 IMPORTANCIA

Los modelos hidrológicos tienen un papel importante en la hidrología, ya que contribuyen a comprender el comportamiento de una cuenca de drenaje y sus procesos. Tienen aplicaciones en la implementación de sistemas de alerta temprana de riesgos de avenidas máximas e inundaciones, apoyo a la agricultura, gestión y planificación de cuencas, estudios de impacto climático, entre otros (Pascual y Díaz, 2016).

La aplicación del modelo hidrológico HBV-Light permite conocer la disponibilidad hídrica superficial en la cuenca alta del río Tempisque y en la subcuenca del río Sardinal, definiendo el estado actual del recurso y permitiendo realizar proyecciones futuras que ofrezcan información clave para los tomadores de decisión en cuanto a la planificación y gestión del recurso hídrico en un contexto de cuenca.

Al determinar la aplicabilidad del modelo hidrológico a escala de subcuenca o microcuenca donde no se cuenta con registro de datos hidrológicos para calibración, se puede obtener información de suma importancia para las instituciones, organizaciones y actores encargados de la gestión del recurso hídrico a nivel local. Estos conocimientos constituyen una base para la toma de decisiones, establecimiento de líneas de acción y planes de mitigación de riesgos asociados al recurso hídrico.

Las Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes (ASADAS) se verían beneficiadas directamente con la información generada en el presente estudio, ya que se generan datos hidrológicos de la subcuenca del río Sardinal, que podrían ser usados para mejorar la gestión y planificación del recurso hídrico a escala local.

La presente investigación describe los siguientes apartados. Inicia con los objetivos específicos, los cuales responden al objetivo general dirigido a “evaluar un modelo hidrológico en la cuenca alta del río Tempisque delimitada desde la estación hidrológica Guardia y su aplicabilidad en la subcuenca del río Sardinal”.

En el capítulo tres se desarrolla el marco referencial, abordando los conceptos más relevantes para la comprensión del estudio, tal como el concepto de modelización hidrológica y la descripción de los dos modelos relevantes del estudio: el modelo HYPE y en mayor detalle del modelo HBV-Light.

El capítulo cuatro describe la metodología implementada, iniciando con la descripción del área de estudio, correspondiente a la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal. Posteriormente, se describe el proceso metodológico diseñado para dar cumplimiento a cada objetivo específico y los resultados esperados.

Seguidamente, en el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos a la luz del cumplimiento de dichos objetivos. Finalmente, en el capítulo seis se realiza un análisis de los hallazgos, sobre la base del cual se generan las respectivas conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el modelo hidrológico HBV-Light en la cuenca alta del río Tempisque delimitada desde la estación hidrológica Guardia y su aplicabilidad en la subcuenca del río Sardinal.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

1. Describir estadísticamente los datos biofísicos de la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal.
2. Aplicar el modelo hidrológico HBV-Light en la cuenca alta del río Tempisque.
3. Utilizar los parámetros de optimización resultantes de la calibración en la cuenca alta del río Tempisque para realizar la modelación hidrológica de la subcuenca del río Sardinal.

3 MARCO REFERENCIAL

3.1 MODELO HIDROLÓGICO

Un modelo hidrológico se define como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante un evento de precipitación (Viessman et al., 1989, citado por Solís et al., 1993). Es una representación simplificada del comportamiento de una cuenca, constituyéndose en una herramienta útil para comprender los procesos que se llevan a cabo en la conversión de la precipitación en escorrentía dentro de los límites de la cuenca (Pascual y Díaz, 2016).

Al representar una cuenca como un sistema hidrológico, se observan tres partes: las entradas, los procesos intermedios y las salidas. Las entradas son los componentes iniciales del sistema, donde la variable más relevante es la precipitación. En los procesos intermedios se consideran parámetros o variables de estado que describen las condiciones de los componentes del modelo y se perciben abstracciones o pérdidas del flujo en forma de evaporación, infiltración, almacenamiento en superficie y percolación. Las variables de salida son los componentes finales, principalmente el caudal.

Los modelos hidrológicos generalmente se clasifican según la forma en que representan el área de la cuenca en agregados, semidistribuidos y distribuidos; según el enfoque matemático en deterministas y estocásticos, y según el planteamiento de los procesos hidrológicos en teóricos (basados en leyes físicas) o empíricos (formulaciones matemáticas a partir de la experimentación) (Pascual y Díaz, 2016).

Los modelos agregados consideran a la cuenca como un espacio con parámetros de un mismo valor para toda la distribución espacial. En los modelos semidistribuidos se aplican los mismos parámetros para subunidades de la cuenca con características similares y los modelos distribuidos detallan en pequeñas unidades de área cada parámetro y proceso.

Un modelo estocástico tiene salidas de cierta aleatoriedad, ya que no siempre una entrada produce la misma salida, mientras que un modelo determinístico siempre va a generar las mismas salidas con los mismos valores de entrada (Beven, 2012).

Existen diferentes etapas del modelo hidrológico que incluyen desde su percepción hasta la validación de los resultados. Según Beven (2012), la primera etapa es el modelo perceptual, el cual corresponde al esquema general de los procesos involucrados en el modelo. A partir de la definición de estos procesos, se avanza al modelo conceptual, el cual incluye la elección de las ecuaciones que simplifican los procesos y luego sigue la etapa del modelo procedural, en el cual se ensamblan las variables de entrada con las ecuaciones del modelo conceptual, mediante la programación de un código. El siguiente paso es la calibración del modelo, la cual consiste en seleccionar los mejores parámetros de entrada para obtener los valores de salida más cercanos a la realidad, realizando una comparación con datos observados en sitio. Finalmente, la etapa de validación es la comprobación de que el modelo funciona adecuadamente, mediante la ejecución de simulaciones.

Los modelos hidrológicos tienen aplicación en la gestión de cuencas, donde se utilizan para la estimación de la disponibilidad del recurso hídrico y planificación para la toma de decisiones; en la evaluación de impactos ambientales, tal como: incendios forestales, cambios en la cobertura de la tierra y efectos de inundaciones. Además, se utilizan para la estimación de impactos asociados a la variación de parámetros meteorológicos y efectos del cambio climático.

3.2 MODELO HIDROLÓGICO HYPE

El modelo hidrológico HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) es un modelo dinámico semidistribuido para la simulación de procesos hídricos y concentración de nutrientes a nivel de cuenca y subcuenca. Fue creado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) con el objetivo de integrar el recurso hídrico y su calidad a través de los compartimientos del modelo, realizar predicciones en cuencas no instrumentadas y configuración de modelos a gran escala.

Los parámetros de entrada obligatorios son precipitación y temperatura del aire. Opcional se pueden incluir los parámetros de caudales observados, humedad relativa, concentración de nutrientes, velocidad del viento, entre otras. La salida del modelo está conformada por un archivo de series de tiempo de flujo de salida para cada subcuenca, así como criterios de desempeño para cada subcuenca.

En el 2022 se utilizó el modelo HYPE para explorar estrategias de mejoramiento de la modelación en regiones tropicales con escasez de datos en sitio, utilizando diferentes intervalos de tiempo y productos globales reticulados para Costa Rica. Los objetivos específicos del proyecto consistieron en ajustar el modelo para simular la hidrología de Costa Rica a nivel nacional, utilizando productos globales de teledetección climática y de terreno, para correr y calibrar el modelo bajo cuatro estrategias de calibración basadas en configuraciones de calibración a diferentes escalas temporales; y analizar el efecto de la evapotranspiración real y potencial como productos de la teledetección en la calibración del modelo y su capacidad para mejorar la validación de este (Arciniega-Esparza et al., 2022).

El estudio utilizó precipitación diaria de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Satellite data (CHIRPS) (Funk et al., 2015) (periodo 1981-2021 a escala diaria), evapotranspiración potencial y real de MOD16 (periodo 2000-2014 a escala mensual), temperatura máxima, media y mínima diaria de

CPC Global Temperature (periodo 1979-2021) de NOAA/OAR/ESRL PSL, cobertura vegetal anual de Climate Change Initiative (CCI) Land Cover (periodo 1993-2015), características del suelo de SoilGrids y elevación de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Además, se utilizaron datos en sitio de estaciones meteorológicas e hidrológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), respectivamente, para la calibración del modelo.

Para obtener los mejores resultados se aplicó una corrección de sesgo a los datos de precipitación de CHIRPS, utilizando datos de las estaciones pluviométricas en la cuenca y estaciones virtuales creadas en el centroide de las cuencas, debido a que los valores de caudal se subestimaban con respecto a los valores reales. También se aplicó una corrección a la temperatura según la elevación de la cuenca, para contrarrestar la resolución espacial que ofrece la base de datos.

3.3 MODELO HIDROLÓGICO HBV-LIGHT

El modelo HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) desarrollado por el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI), se ha utilizado para simulaciones de escorrentía en Suecia y se ha aplicado en versiones modificadas en alrededor de 30 países.

Es un modelo conceptual para la simulación de escorrentía semi distribuido, es decir, permite dividir la cuenca en subcuencas, zonas de elevación y vegetación. Este modelo es fácil de aplicar, y se ha aplicado en múltiples cuencas, proporcionando buenos resultados y convirtiéndose en una herramienta estándar para los estudios de escorrentía. Entre sus ventajas se encuentra que requiere una cantidad mínima de datos de entrada y sus requerimientos computacionales no son elevados (Seibert, 2005).

La versión modificada HBV-Light, proporciona una versión de Windows sencilla de usar para investigación y educación. Se diferencia del modelo HBV en que, en lugar de utilizar estados iniciales, aplica un periodo de calentamiento. También es posible utilizar una corrección de la media a largo plazo de los valores de evaporación potencial propuesta. La versión HBV-light ofrece dos opciones que no existen en la versión HBV. La primera es la posibilidad de incluir los niveles de agua subterránea observados en el análisis y la segunda es la posibilidad de utilizar una rutina de respuesta diferente con un parámetro de retraso.

El modelo simula la descarga diaria a partir de datos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial. Se simula que la precipitación es nieve o lluvia dependiendo de si la temperatura está por encima o por debajo de un umbral de temperatura TT ($^{\circ}C$). En la siguiente figura se muestra un esquema conceptual del modelo.

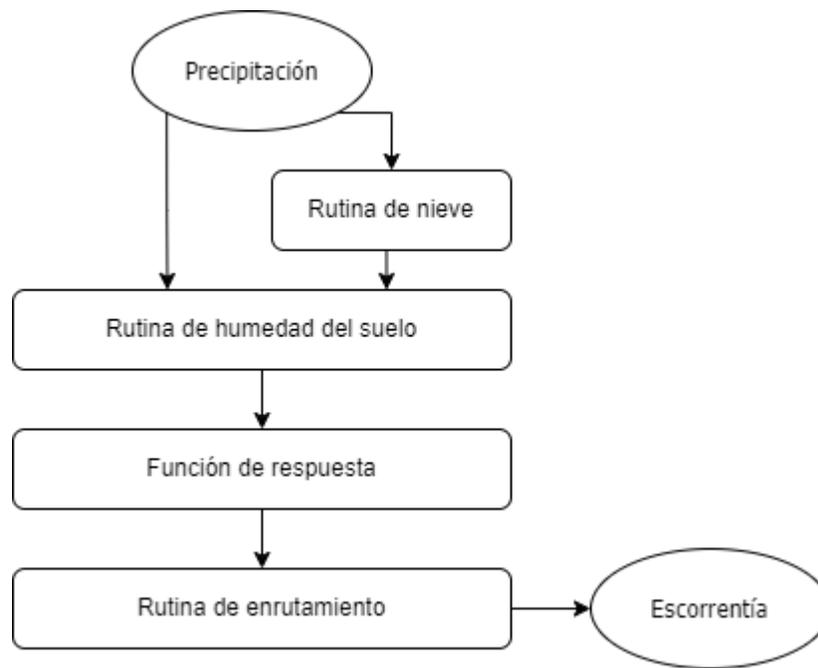


Figura 1. Esquema del modelo HBV-Light. Fuente: adaptado de Seibert (2005).

Rutina de humedad del suelo

Las variables de entrada son la evapotranspiración potencial (ETP) y precipitación, y las salidas son la humedad del suelo, evapotranspiración real (ETR) y recarga de agua subterránea. Las precipitaciones y el deshielo (P) se dividen en agua que llena la caja de almacenamiento del suelo y recarga de agua subterránea, dependiendo de la relación entre el contenido de agua de la caja del suelo SM (mm) y su valor mayor FC (mm). Su ecuación está dada por:

$$\frac{recarga}{P(t)} = \left(\frac{SM(t)}{FC} \right)^\beta \quad [Ecuación 1]$$

La evaporación real de la caja de suelo es igual a la evaporación potencial si SM/FC está por encima de un valor LP [-] mientras que una reducción lineal se utiliza cuando SM/FC está por debajo de LP.

$$ETR = ETP \min \left(\frac{SM(t)}{FC \cdot LP}, 1 \right) \quad [Ecuación 2]$$

Donde:

- FC ²= almacenamiento máximo de humedad del suelo (mm)
- LP = valor de humedad del suelo por encima del cual ETR alcanza ETP (mm)
- B = parámetro que determina la contribución relativa a la escorrentía por lluvia o deshielo (-)

² FC es un parámetro del modelo y no necesariamente es igual a los valores medidos de capacidad de campo (Seibert, 2005).

En las siguientes imágenes se representa el funcionamiento de la rutina.

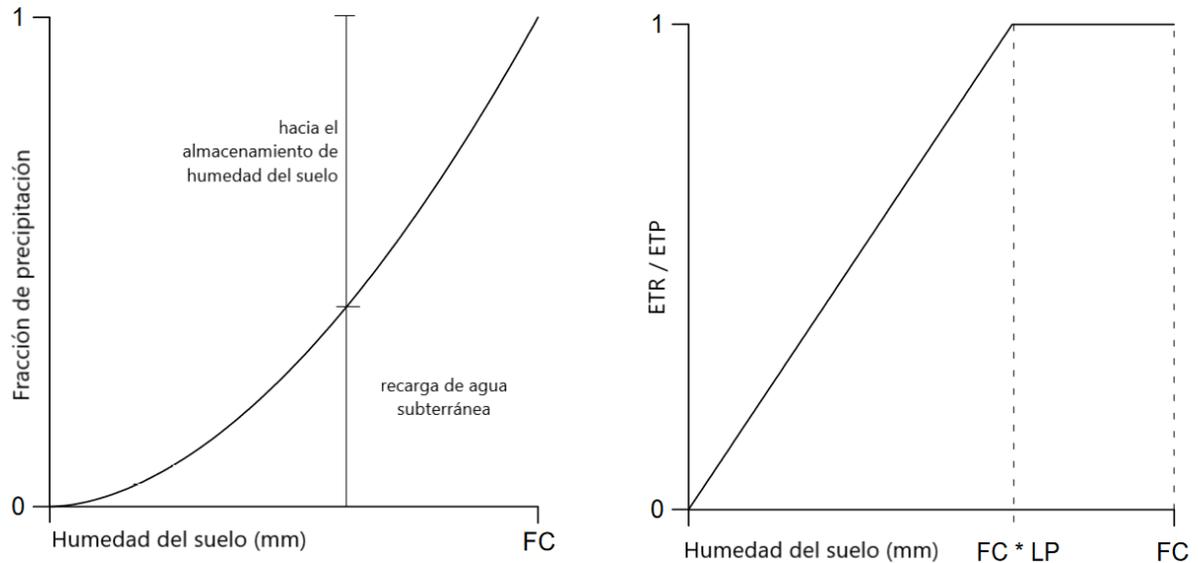


Figura 2. Contribución de la precipitación al almacenamiento de agua subterránea (izquierda) y reducción de la ETP según el almacenamiento de la humedad del suelo (derecha). Fuente: adaptado de Seibert (2005).

Si se utilizan diferentes zonas de elevación, los cambios de precipitación y temperatura con la elevación se calculan utilizando los dos parámetros PCALT (%/100m) y TCALT (°C/100m).

$$P(h) = P_0 \left(1 + \frac{PCALT(h-h_0)}{10000} \right) \quad [Ecuación 3]$$

$$T(h) = T_0 - \left(\frac{TCALT(h-h_0)}{100} \right) \quad [Ecuación 4]$$

La media a largo plazo de la evaporación potencial, $E_{pot,M}$ para un día determinado del año, puede corregirse a su valor en el día t , $E_{pot}(t)$, utilizando las desviaciones de la temperatura, $T(t)$, de su valor medio a largo plazo, T_M , y un factor de corrección, C_{ET} (°C⁻¹).

$$ETP(t) = (1 + c_{ET} (T(t) - T_M)) EETP_M \quad \text{con } 0 \leq ETP(t) \leq 2 \cdot ETP_M \quad [Ecuación 5]$$

Función de respuesta

Las entradas de esta sección son la recarga de agua subterránea y la ETP y las salidas son la escorrentía y el nivel de agua subterránea. Se basa en el modelo de un embalse lineal único como una descripción simple de una cuenca donde se supone que la escorrentía $Q(t)$ en el momento t es proporcional al almacenamiento de agua $S(t)$ y está dado por la siguiente ecuación, donde k es un coeficiente de almacenamiento (día⁻¹).

$$Q(t) = k \cdot S(t) \quad [Ecuación 6]$$

El balance hídrico de la cuenca está dado por:

$$P(t) = E(t) + Q(t) + \frac{dS(t)}{dt} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

En la figura mostrada a continuación, se observa el esquema de la rutina de función de respuesta.

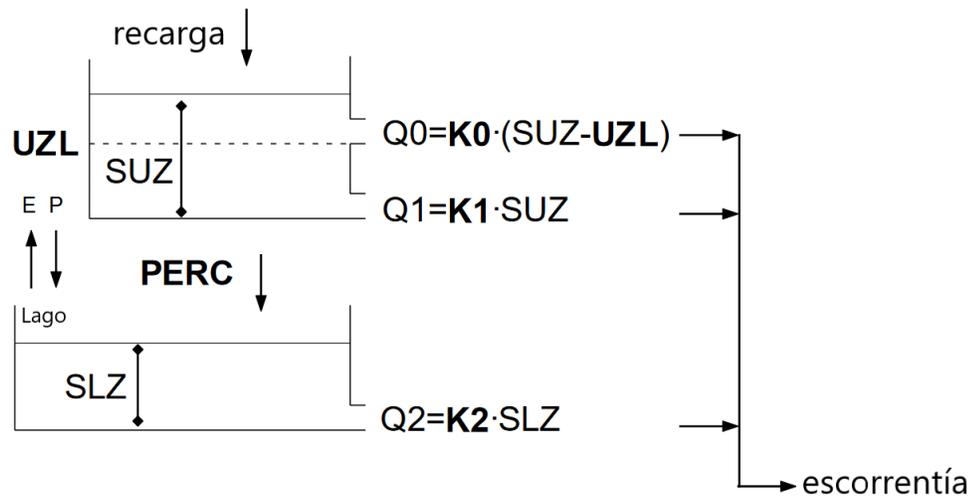


Figura 3. Función de respuesta. Fuente: adaptado de Seibert (2005).

La recarga de agua subterránea se agrega a la caja de agua subterránea superior SUZ (mm). PERC (mm d⁻¹) define la percolación máxima de caudal desde la caja de agua subterránea superior a la inferior SLZ (mm). La escorrentía de las cajas de agua subterránea se calcula como la suma de dos o tres ecuaciones lineales de salida dependiendo de si SUZ está por encima de un valor umbral, UZL (mm), o no.

$$Q_{GW}[t] = k_2 SLZ + k_1 SUZ + k_0 \max(SUZ - UZL, 0) \quad [\text{Ecuación 8}]$$

Rutina de enrutamiento

Este escurrimiento (entrada) es finalmente transformado por una función de ponderación triangular, cuya base es definida por el parámetro MAXBAS para dar el escurrimiento simulado Q_{sim} (mm d⁻¹) (salida).

$$Q_{sim}(t) = \sum_{i=1}^{MAXBAS} c(i) \cdot Q_{GW}(t - i + 1) \text{ donde}$$

$$c(i) = \int_{i-1}^i \frac{2}{MAXBAS} - \left| u - \frac{MAXBAS}{2} \right| \frac{4}{MAXBAS^2} du \quad [\text{Ecuación 9}]$$

3.4 EVALUACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Con el fin de utilizar los resultados de los modelos hidrológicos en sus diversas aplicaciones, los modelos deben presentar solidez científica. Por lo tanto, deben realizarse análisis de sensibilidad para determinar las variaciones de las salidas del modelo con respecto al cambio en las entradas; calibrar el modelo, el cual consiste en la estimación de los parámetros mediante la comparación de las salidas con los datos observados; y la validación del modelo, el cual implica correr el modelo utilizando los parámetros establecidos en la calibración.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Se recomienda realizar la evaluación de modelos hidrológicos, además del uso de técnicas gráficas, mediante estadísticas cuantitativas como el valor de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Moriassi et al., 2007). Esta estadística determina el ajuste de los datos observados contra los simulados. Se define según la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X^{med})^2} \right] \quad [Ecuación 10]$$

Donde X^{obs} representa la observación evaluada, X^{sim} la observación simulada y X^{med} es el promedio de los datos.

El NSE se extiende en un rango de infinito negativo a 1. Los valores negativos indican que los valores simulados presentan un desempeño inaceptable.

Logaritmo de la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (lnNSE)

Es una modificación de la NSE en la cual se utilizan los logaritmos de los valores y se enfoca en simulaciones de flujos bajos. Este método identifica si una simulación subestima o sobreestima los valores de caudal. El rango de aceptación tiene los mismos valores que el NSE.

$$\ln NSE = 1 - \frac{\sum_t (\ln(Q_{obs}) - \ln(Q_{sim}))^2}{\sum_t (\ln(Q_{obs}) - \ln(\bar{Q}_{obs}))^2} \quad [Ecuación 11]$$

Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)

La métrica de eficiencia KGE se basa en una descomposición de la NSE en sus componentes constitutivos: correlación, sesgo de la variabilidad y sesgo promedio, los cuales se relacionan con la capacidad del modelo de reproducir la distribución de las observaciones, la forma y el tiempo de respuesta (Gupta et al., 2009). La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad [Ecuación 12]$$

Donde c es la correlación lineal entre Q_{obs} and Q_{sim} , α mide la variabilidad del error del flujo, dada por la razón $\alpha = \sigma_{qsim}/\sigma_{obs}$, y β es un término de sesgo dado por promedio(Q_{sim})/promedio(Q_{obs}).

En la literatura se encuentran diferentes variaciones para un rango aceptable del KGE; no obstante, en muchas investigaciones, tal como en Nonki et al. (2021) se establece un valor aceptable mayor a 0 y siendo óptimo la unidad (Knoben et al., 2019).

3.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad (SA) permite determinar en qué medida la incertidumbre en la salida de un modelo es atribuible a los parámetros del mismo (Iooss y Lemaitre, 2014; Devak y Dhanya, 2017, Hadjimichael, 2020; Song et al., 2015; (Wang y Solomatine, 2019), así como la interacción entre los parámetros (Devak y Dhanya, 2017). En modelos hidrológicos, ayuda a comprender la significancia de los múltiples parámetros que requiere el modelo y a identificar los que presentan una menor influencia (Wan et al., 2015).

Los métodos de análisis de sensibilidad se pueden clasificar según su objetivo, aplicabilidad y características y la clasificación más común es en locales y globales (Song et al., 2015; Wang y Solomatine, 2019). Los métodos locales se enfocan en determinar la influencia de un factor en la salida del modelo, mientras que los parámetros restantes se mantienen fijos (Campolongo et al., 2011). Sin embargo, mediante este tipo de análisis, no se puede determinar la interacción entre los parámetros. A través de un análisis global, se obtiene un enfoque que comprende tanto el efecto de un parámetro sobre la salida del modelo, como la interacción entre los parámetros (Campolongo et al., 2011) en todo el espacio posible de entradas (Song et al., 2015).

4 METODOLOGÍA

4.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El modelo se aplicará en la cuenca alta del río Tempisque delimitada desde la estación hidrológica río Tempisque en Guardia ubicada en las coordenadas CRTM05 325868.0 Este y 1168302.8 Norte. La cuenca se ubica en la Vertiente Pacífica de Costa Rica, en la provincia de Guanacaste y abarca gran parte del cantón de Liberia, donde se extiende en los distritos de Mayorga, Cañas Dulces, Curubandé, Liberia y Nacascolo; La Cruz, en el distrito de Santa Elena, y Carrillo en el distrito Palmira. La delimitación de la cuenca se encuentra entre las coordenadas CRTM05 320000 – 360000 Este y 116500 – 121500 Norte.

La cuenca de aplicación de los parámetros calibrados es la subcuenca del río Sardinal, ubicada en la provincia de Guanacaste, cantón Carrillo, distrito Sardinal, entre las coordenadas 306000 – 322000 este y 1154000 – 116500 norte. En la siguiente figura se muestra el mapa de ubicación de la zona de estudio.

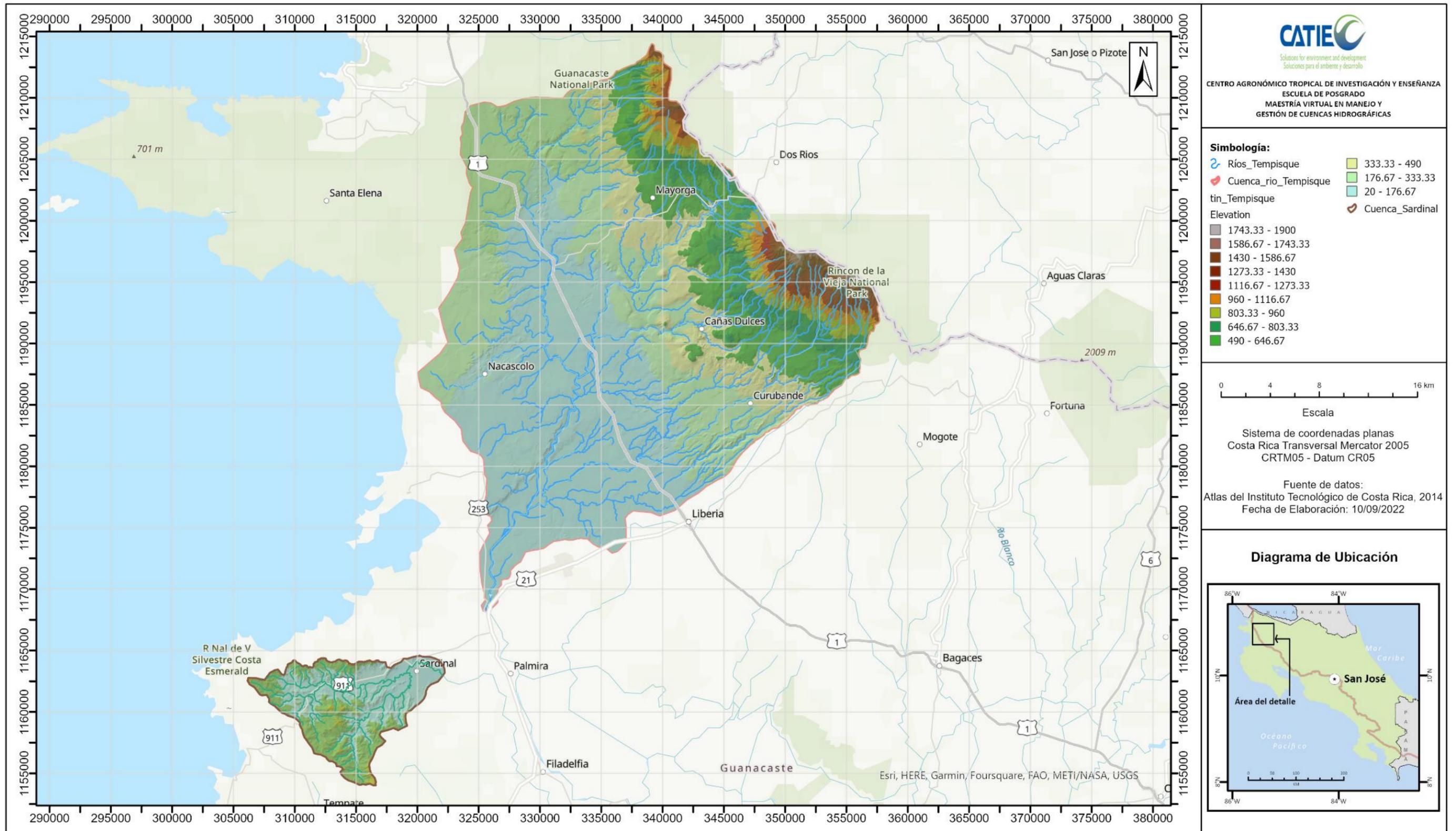


Figura 4. Ubicación de la cuenca alta del río Tempisque y subcuenca del río Sardinal.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.2.1 Características biofísicas

La cuenca hidrográfica se puede caracterizar morfológicamente con base en parámetros de forma y relieve y características concernientes a la red de drenaje (Camino et al., 2018). Su morfometría se relaciona con el comportamiento de su red hídrica (Lux, 2015). Entre los parámetros de forma, se determina el área de las cuencas, perímetro, factor de forma e índice de Gravelius. Los parámetros de relieve utilizados son elevación mínima, media y máxima, pendiente media de la cuenca y curva hipsométrica, la cual es característica del ciclo de erosión según Strahler (González y Guerra, 2002). En cuanto a las características de la red de drenaje, se definen la longitud y pendiente del cauce principal y densidad de drenaje.

Morfología

El siguiente cuadro muestra las principales características morfológicas de las cuencas, obtenidas mediante sistemas de información geográfica.

Cuadro 1. Características morfológicas de la cuenca alta del río Tempisque en Guardia

Característica	Cuenca río Tempisque	Cuenca río Sardinal
Área (km ²)	935.25	85.91
Perímetro (km)	145.57	48.78
Longitud del cauce principal (km)	68.81	23.82
Índice de Gravelius	1.34	1.48
Factor de forma KF	0.20	0.15
Elevación mínima (msnm)	20.00	34.50
Elevación media (msnm)	342.02	158.60
Elevación máxima (msnm)	1900.00	539.86
Pendiente media (m/m)	0.075	0.084
Pendiente media cauce principal (m/m)	0.014	0.047
Diferencia de altura de la cuenca (m)	1880.00	505.36

La cuenca alta del río Tempisque en Guardia tiene un área de 935.2 km² y un perímetro de 145.6 km y la subcuenca del río Sardinal presenta una décima parte del área de la cuenca alta del río Tempisque. Esta cuenca presenta un rango de elevaciones amplio, abarca desde los 20 hasta los 1900 msnm; sin embargo, tal como se observa en la Figura 5, el 70% del área de la cuenca se encuentra por debajo de los 400 msnm, con una media de 342 msnm y el 6% del área se encuentra sobre los 1000 msnm. El rango de elevaciones de la subcuenca del río Sardinal inicia desde los 34.5 msnm hasta los 540 msnm con una elevación media de 158 msnm. La curva hipsométrica indica que las elevaciones sobre los 200 msnm sólo se presentan en un 20% del área de la cuenca. La forma de ambas curvas hipsométricas es muy similar, indicando que corresponden a una cuenca vieja, la cual ha

experimentado procesos erosivos, con mayor incidencia en la cuenca alta del río Tempisque que en la subcuenca del río Sardinal.

Las cuencas tienen índices de forma muy similares. El índice de Gravelius o índice de compacidad, es un indicador que representa la concentración de agua en la cuenca. El valor obtenido para ambas cuencas las define como Oval – Redonda a Oval Oblonga, según la recopilación realizada por Lux (2015). El factor de forma es un indicador de la capacidad de la cuenca a experimentar crecientes. En este caso, se tienen valores bajos de 0.2 y 0.15 para la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal, respectivamente, indicando que las cuencas están menos sujetas a crecidas que una de la misma área, pero con un mayor factor de forma.

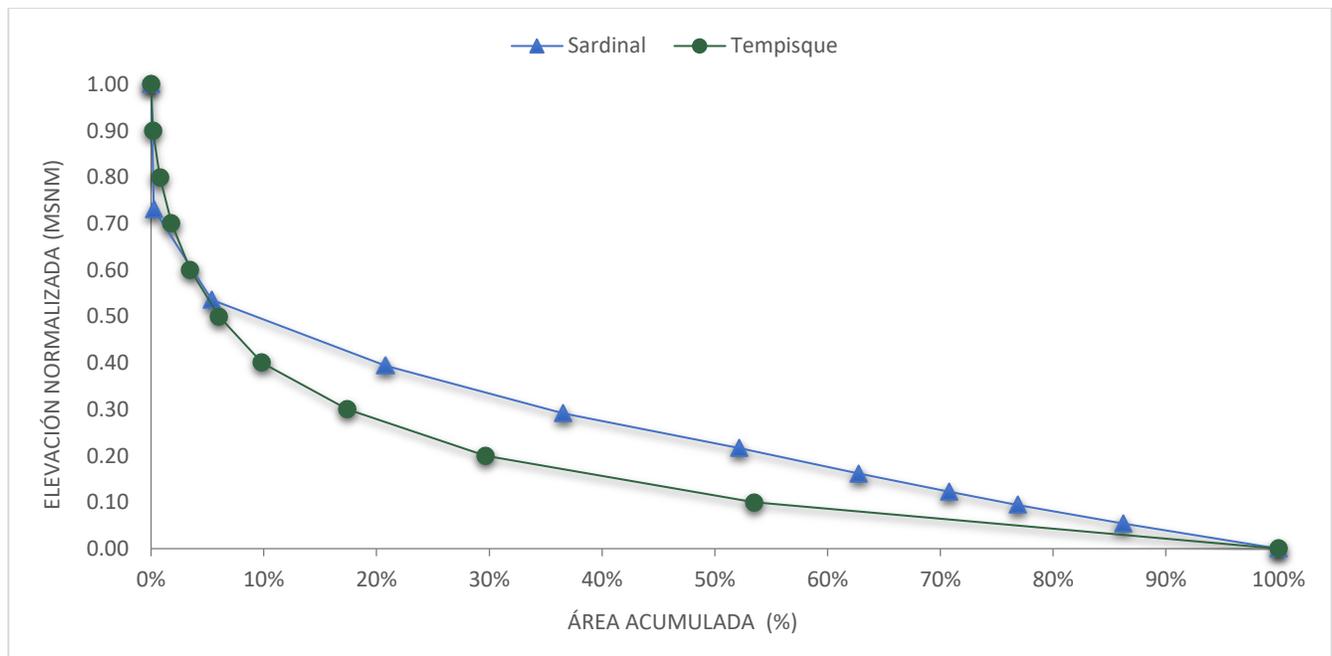


Figura 5. Curva hipsométrica de la cuenca alta del río Tempisque en Guardia y la subcuenca del río Sardinal.

En el histograma de frecuencias altimétricas mostrado en la siguiente figura, evidencia que la mayor parte de la cuenca alta del río Tempisque, un 46.5% se encuentra en el rango de menor elevación, de 20 a 208 msnm. Esta área se distribuye en la parte sur, oeste y noroeste de la cuenca, mientras que las elevaciones mayores se distribuyen al norte y descienden hacia el oeste de la cuenca, como se puede apreciar en el mapa de la Figura 4. En el caso de la subcuenca del río Sardinal, las elevaciones de mayor magnitud se encuentran en la parte sur y noroeste en un área del 5.4% del total. La mayor parte del área se concentra en un rango entre los 140 a 300 msnm, aproximadamente un 46.8%.

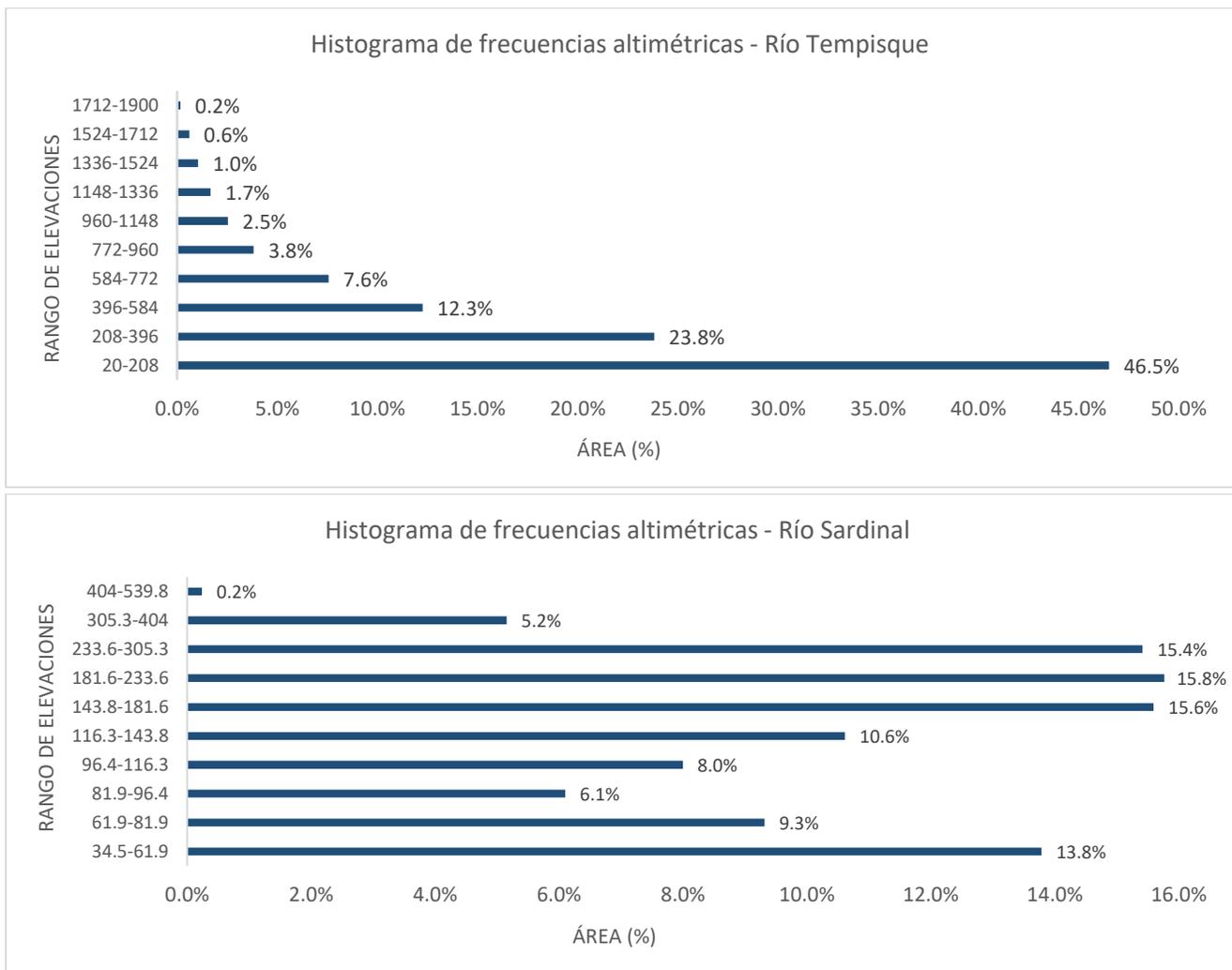


Figura 6. Frecuencia de altitudes de la cuenca alta del río Tempisque en Guardia y la subcuenca del río Sardinal

Hidrología

La red de drenaje de las cuencas tiene una estructura detrítica, como se muestra en la Figura 7. Los ríos principales de la cuenca alta del río Tempisque son el río Ahogados y el río Tempisquito, los cuales se unen con el río Colorado para formar el río Tempisque. El cauce principal nace en el norte de la cuenca hasta formar el río Tempisquito, el cual desciende hacia el sureste hasta conformar el río Tempisque. Tiene una longitud de 68.8 km y una pendiente media de 0.075 m/m. La subcuenca del río Sardinal cuenta con una red hídrica de 104.4 km y sus ríos principales son el río Sardinal y el río Brasil. Su cauce principal tiene una pendiente media de 0.047 m/m.

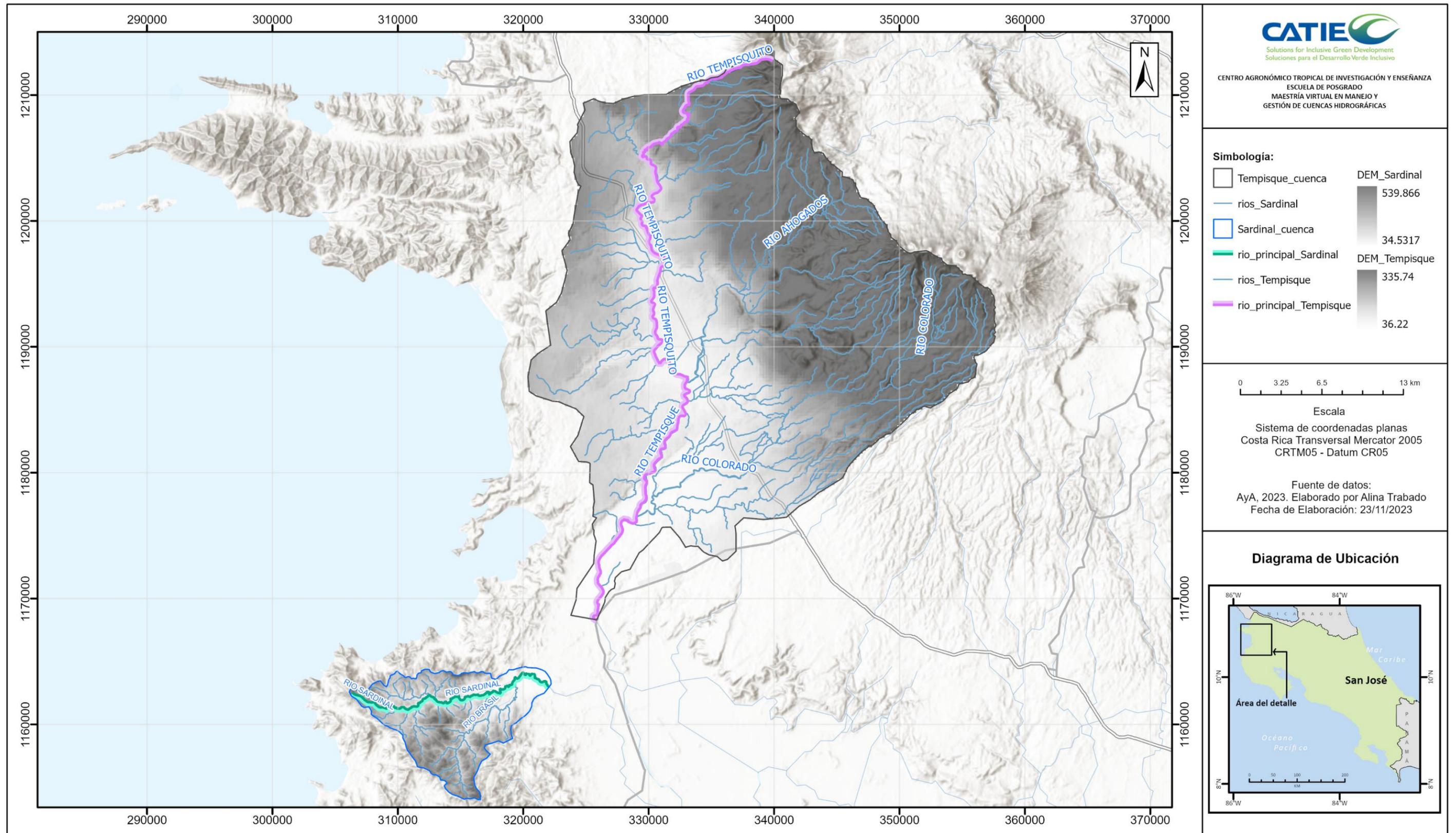


Figura 7. Red hídrica en la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal.

La densidad de drenaje se determina a partir de la longitud total de las corrientes distribuidas en el área total de la cuenca. Se obtiene un valor de 1.26km/km² para la cuenca alta del río Tempisque y de 1.22 km/km² para la subcuenca del río Sardinal, valores que según la clasificación realizada por Delgadillo y Páez (2008) (citado por Camino et al., 2018) clasifican la densidad como moderada e indica baja peligrosidad debido a que repercute en la duración de la escorrentía (Camino et al., 2018).

Características climáticas

Según el estudio de cuencas hidrográficas elaborado por Rojas en el 2011, se presenta en las cuencas un régimen de precipitación del Pacífico, con una estación seca marcada de diciembre a abril y la época lluviosa se extiende de mayo a noviembre. Entre el mes de julio y agosto disminuye la precipitación para dar paso al “veranillo”. Los meses más lluviosos son setiembre y octubre, ya que aportan un 23 y 21% de la precipitación anual, respectivamente. Los meses más secos son enero y febrero. En promedio, se registran anualmente 105 días con lluvia.

La precipitación media anual en la cuenca del río Tempisque varía desde los 1500 a 4000 mm. En la parte baja se presenta una media de 1500 mm. La parte baja y media varía desde 1500 a 2000 mm y en la parte alta de la cuenca se tiene una precipitación media anual de 2000 a 4000 mm. En la cuenca del río Sardinal se presentan dos rangos de precipitación, siendo el menor en la parte norte de la cuenca con menos de 1500 mm anuales y en el resto de la cuenca se presenta una precipitación media anual entre 1500 a- 200 mm.

Con respecto a la temperatura en la cuenca del río Tempisque, la media anual en la parte baja es de 28°C, en la parte media oscila entre 26 y 28°C y en la parte alta de 22 a 24°C. A nivel diario se presentan diferencias de temperatura de hasta 12°C. En cuanto a la evapotranspiración, anualmente se percibe una media entre 1600 a 1900 mm en la parte baja, de 1900 a 2000 mm en la parte media y entre 1200 a 1300 mm en la parte alta.

La siguiente figura muestra la precipitación media anual en la zona de estudio.

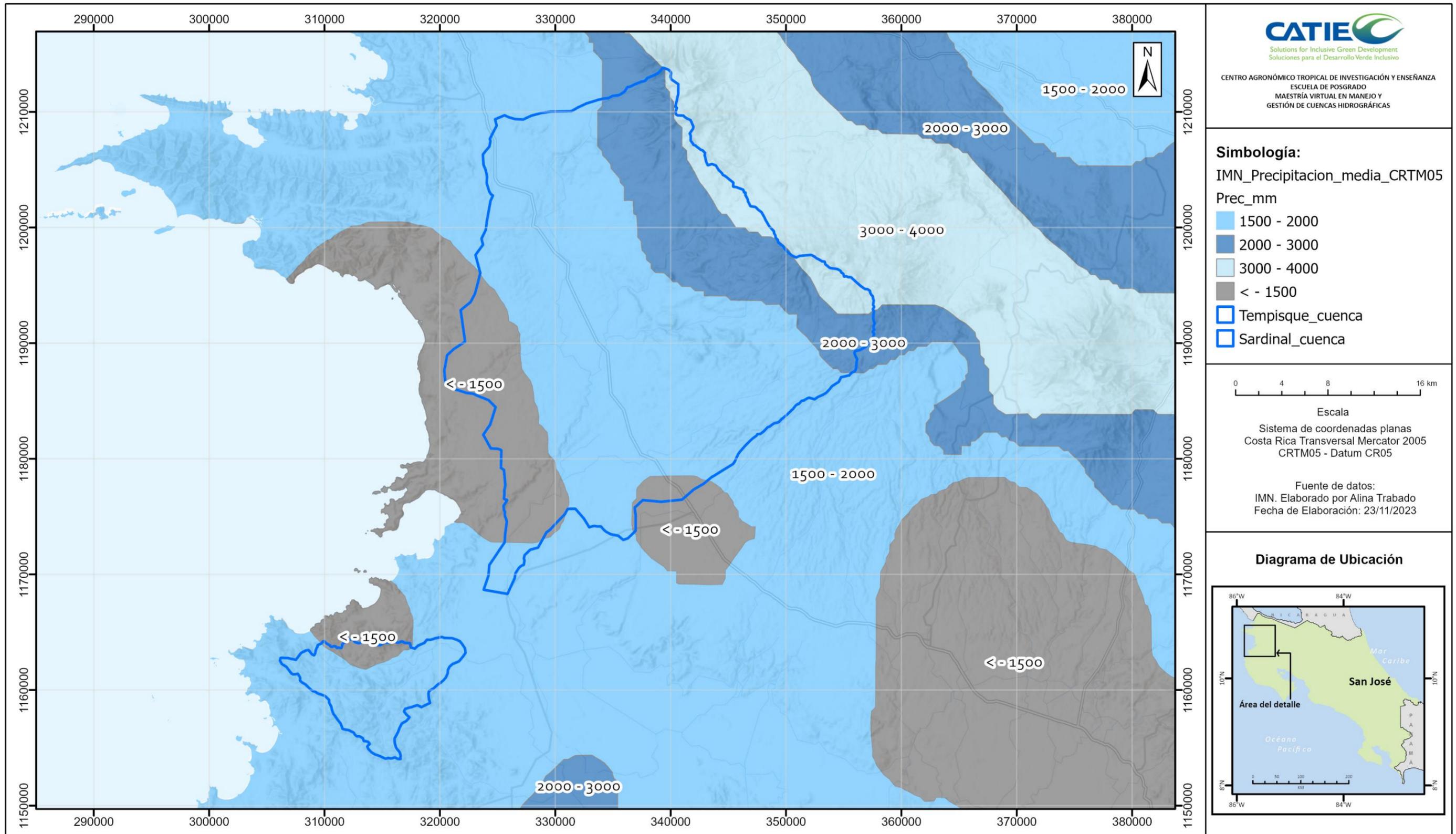


Figura 8. Precipitación media anual en la cuenca alta del río Tempisque en Guardia y la subcuenca del río Sardinal. Fuente: Ortiz-Malavasi, E. (2014).

Geología

En la cuenca alta del río Tempisque se presentan rocas volcánicas y piroclásticas del Pleistoceno, Plio-Pleistoceno y Mioceno en la parte norte. En la parte media de la cuenca (incluyendo el área de la subcuenca del río Sardinal) predominan las rocas sedimentarias continentales, de transición y marino someros del Holoceno con rocas ígneas submarinas, intrusivas, sedimentarias marino profundo, talud continental, plataforma y marino someras (Rojas, 2011).

Uso de suelo

En la verificación de uso del suelo realizada por Fernández en el 2010, se observa que en la cuenca alta del río Tempisque predomina la cobertura de pasto, la cual se extiende en un 64.8% del área total; categorizado en pasto, pasto de engorde, pasto en regeneración y jaragua. Seguidamente, un 14% del área está cubierta por bosque primario, ubicado principalmente en la parte alta de la cuenca y un 12.1% por bosque secundario. En menor medida se puede observar bosque seco y terreno rocoso en la parte alta, cubriendo un área de 2.3 y 3% del total. Con respecto a las áreas de cultivos, la caña se concentra en la parte baja de la cuenca y corresponde a un porcentaje del 1.1%, mientras que el cultivo de melón se observa en la parte media baja y se extiende en un 2.7% de la cuenca. En el siguiente cuadro se observan los porcentajes correspondientes a cada categoría de uso del suelo.

Cuadro 2. Porcentajes de uso del suelo en la cuenca alta del río Tempisque.

Uso	Área (m ²)	Área (km ²)	Porcentaje
bosque primario	131307581.5	131.3	14.0
bosque reserva seco	21909327.4	21.9	2.3
bosque secundario	113077104.5	113.1	12.1
caña	10246228.6	10.2	1.1
jaragua-pasto	74351876.8	74.3	7.9
melón	24836645.1	24.8	2.7
pasto	517984779.5	518.0	55.4
pasto en regeneración	11831614.2	11.8	1.3
pasto engorde	1638573.6	1.6	0.18
terreno rocoso	28072917.1	28.1	3.0
Total general	935256648.5	935.3	100.0

En la cuenca del río Sardinal se cuenta con una verificación general del uso del suelo realizada por el AyA en el 2023. Esta considera únicamente tres categorías de uso del suelo: bosques, pastos y cultivos. Se observa en el Cuadro 3 que el mayor porcentaje de área, correspondiente a un 50.8% está cubierto por bosque, seguido de un porcentaje de 46.9% de pastos y únicamente un 2.3% a cultivos.

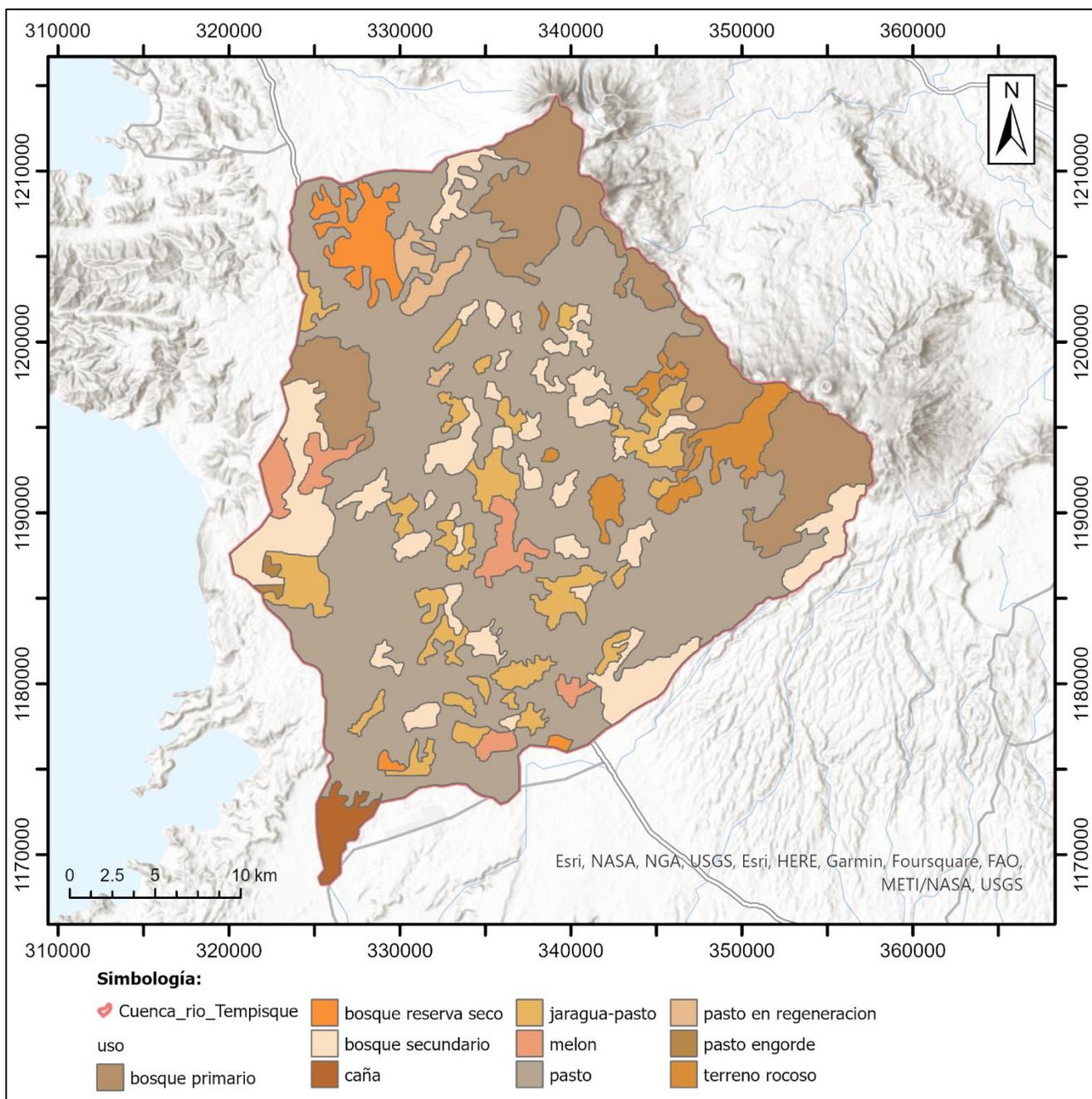


Figura 9. Mapa de uso del suelo en la cuenca alta del río Tempisque en Guardia. Fuente: Fernández, 2010.

Cuadro 3. Uso del suelo en la subcuenca del río Sardinal.

Uso	Área (m ²)	Área (km ²)	Porcentaje
Bosque	41062588.63	41.06	50.8%
Cultivos	1871304.37	1.87	2.3%
Pastos	37906791.52	37.91	46.9%
Total general	80840684.52	80.84	100.0%

En la siguiente figura se observa la distribución del uso del suelo en la cuenca.

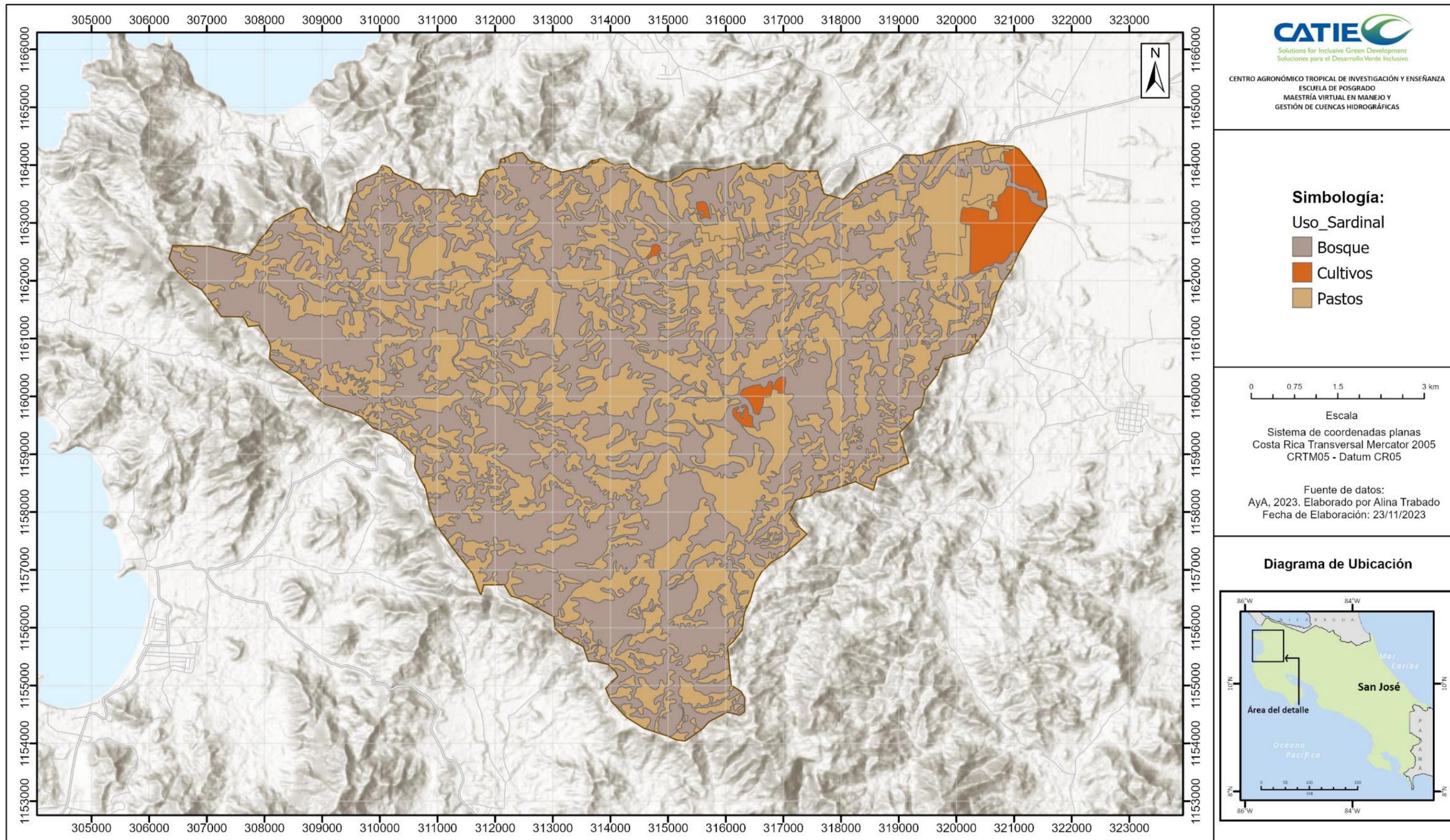


Figura 10. Mapa de uso del suelo en la subcuenca del río Sardinal. Fuente: AyA, 2023.

Zonas de vida

En la parte baja y media de la cuenca alta del río Tempisque predominan dos zonas de vida que abarcan más del 50% de la cuenca: el bosque seco tropical y el bosque húmedo premontano transición a basal. Sobre los 400 msnm se observa una variedad mayor, iniciando con el bosque húmedo tropical. Conforme aumenta la elevación se visualiza una transición de bosque húmedo tropical transición a premontano y bosque muy húmedo premontano. Finalmente, en la parte más alta de la cuenca se destacan tres zonas de vida: bosque pluvial premontano, bosque pluvial montano bajo y bosque muy húmedo tropical transición a premontano. En la subcuenca del río Sardinal se desarrolla el bosque húmedo premontano transición a basal.

De las características biofísicas de las cuencas se puede apreciar la similitud entre ambas, donde la cobertura del suelo se puede agrupar en tres grupos: bosque, pasto y cultivos, siendo el bosque y pasto las de mayor extensión en ambas cuencas. Las características de la red hídrica son similares en densidad y forma, así como la morfología en las dos cuencas, donde se observan índices de forma y compacidad de magnitud cercana, así como la pendiente media de las cuencas y la distribución de sus elevaciones por área. Las características climáticas presentan el mismo comportamiento dada su cercanía geográfica y distribución topográfica.

Por lo tanto, a partir de la similitud entre sus características climáticas, geográficas y morfológicas, se procedió a tomar la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal para realizar el traslado de las condiciones calibradas de una cuenca con información hidrológica a una con un déficit de registros, en este caso la cuenca alta del río Tempisque y Sardinal, respectivamente.

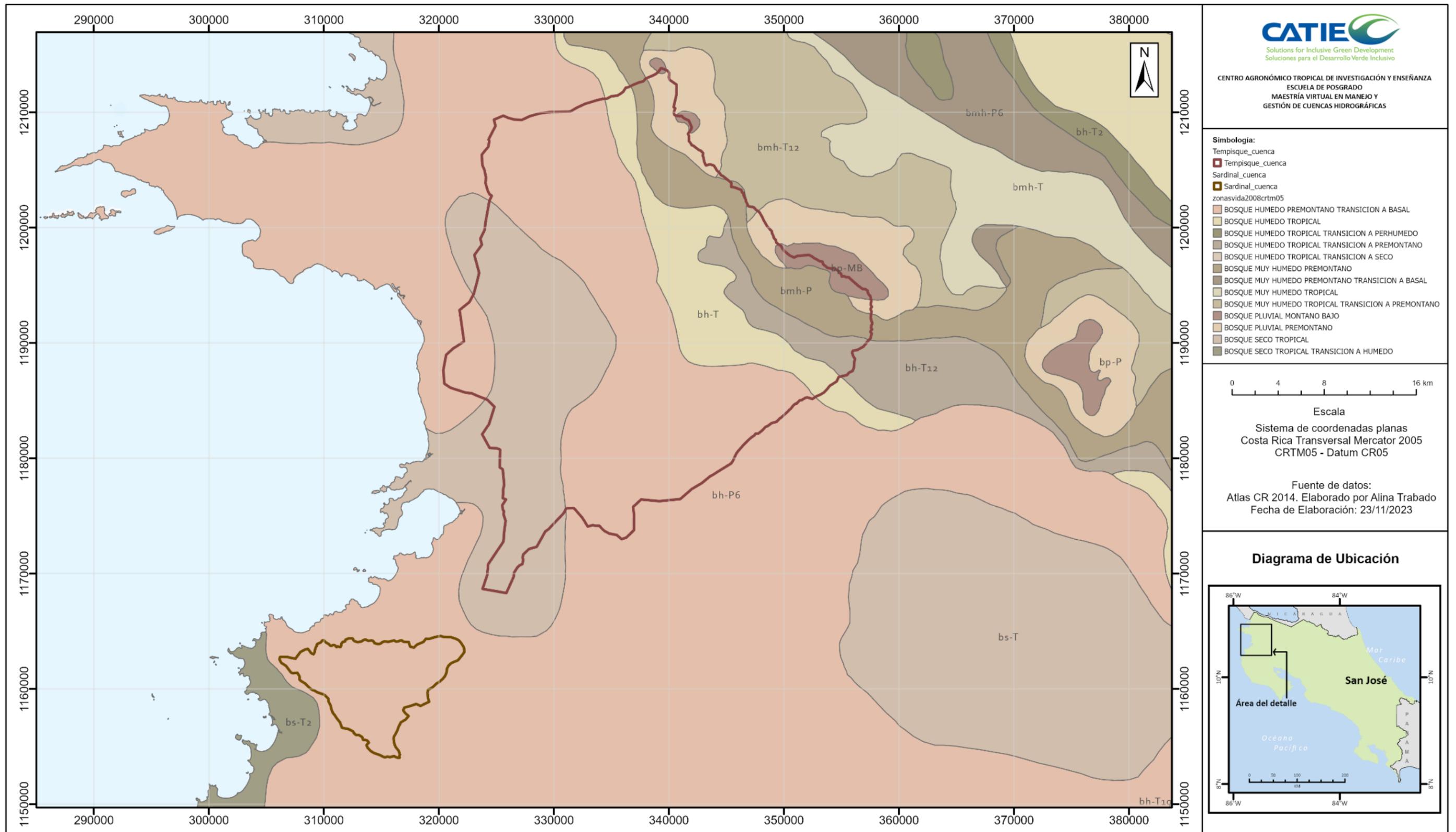


Figura 11. Zonas de vida en la cuenca alta del río Tempisque y subcuenca del río Sardinal. Fuente: Ortiz, 2014.

4.2.2 Características socioeconómicas

Población

En la cuenca alta del río Tempisque se desarrollan cerca de 43 poblados, los cuales se distribuyen en las áreas de los distritos Mayorga, Cañas Dulces, Nacascolo, Curubandé, la parte norte del distrito Liberia del cantón Liberia, la sección este de Santa Elena del cantón La Cruz y la sección norte del distrito Palmira del cantón Carrillo. Guzmán (2013) estima la población total de la cuenca a partir del requerimiento de agua para consumo humano, el cual es de 17.9 l/s y aplicando un consumo por persona de 350 l/día, se obtiene una población de 4426 personas. En la subcuenca del río Sardinal la población es de aproximadamente 5400 habitantes, según estimaciones realizadas a partir del Censo del 2011 del INEC.

Actividades productivas

Según el estudio de cuencas realizado por Rojas (2011), las principales actividades productivas son el desarrollo turístico y la producción agrícola de caña de azúcar, arroz, pasto, melón y sandía, así como la ganadería extensiva (Figura 9).

La producción agrícola principal son los cultivos de arroz, caña de azúcar y melón. El área de producción de arroz es de aproximadamente 5000 ha; para la caña de azúcar se contabilizan 22000 ha y en el caso del melón únicamente 1500 ha (Guzmán, 2013).

Con respecto a la actividad turística, es un campo que se encuentra en crecimiento, ya que, según datos del Instituto Costarricense de Turismo, el Aeropuerto Daniel Oduber recibió el primer semestre del 2022 un 3% más de turistas con respecto al semestre homólogo del 2019 (Jara, 2022). Se proyecta que aumente la cantidad de turistas internacionales, cantidad de habitaciones hoteleras y empresas turísticas certificadas hasta llegar a un punto de equilibrio en el 2030 (Guzmán, 2013).

En el territorio de Sardinal las principales actividades productivas son las relacionadas a la producción de cultivos anuales, permanentes, forestales y ornamentales, acuicultura, avicultura y ganado porcino y vacuno, así como turismo rural y manejo y protección de bosques naturales (INDER, 2016).

4.3 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

4.3.1 Descripción estadística de datos

Para el alcance del primer objetivo, se describen estadísticamente las series de datos de precipitación, temperatura y los datos observados de caudales, mediante la obtención de los valores promedio, desviación estándar, valores mínimos y máximos, y se realiza una descripción gráfica de los resultados con el fin de representar la distribución de los datos. Se utiliza el lenguaje de programación Python, el cual provee una amplia variedad de técnicas gráficas y estadísticas tal como modelado lineal y no lineal, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series de tiempo, clasificación, entre otros.

4.3.2 Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Tempisque

La etapa forma parte del alcance del segundo objetivo. Inicialmente, se realiza una modelación hidrológica de la cuenca alta del río Tempisque, delimitada a partir de la estación hidrológica en Guardia, utilizando el modelo hidrológico HBV-Light, detallado en la sección 3.3.

Los principales insumos de entrada del modelo hidrológico fueron: series de tiempo de precipitación y temperatura, evapotranspiración potencial, caudales observados, características de suelos y zonas de elevación y uso del suelo.

Área de la cuenca y Modelo de Elevación Digital: la delimitación de las cuencas se obtuvo mediante el uso del programa de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ArcGisPro, utilizando como referencia los ríos a escala 1:50000 y las curvas de nivel 1:50000 del Atlas de Costa Rica 2014, las cuales presentan elevaciones a cada 10 m de altitud. A partir de estas curvas se realizó el modelo de elevación digital a una resolución de 250 m, utilizando las herramientas de geoprocso del programa ArcGisPro.

Uso de la tierra: a partir de la delimitación de la cuenca se elaboró una capa vectorial utilizando el programa ArcGisPro a partir de la información disponible en el Diagnóstico del Uso Actual del Suelo en la Cuenca Alta del Río Tempisque de Ronald Fernández, elaborado en el 2010.

Precipitación: se utilizaron los datos de precipitación procesados por Arciniega-Esparza y Birkel (2020) para el proyecto Simulaciones hidrológicas para Costa Rica de 1985 a 2019 utilizando HYPE CR 1.0, los cuales corresponden a datos obtenidos de CHIRPS del periodo de 1981 al 2019 y corregidos con los datos de las estaciones de precipitación del IMN ubicadas en la zona de estudio.

Temperatura: se utilizaron los datos de temperatura del proyecto Simulaciones hidrológicas para Costa Rica de 1985 a 2019 utilizando HYPE CR 1.0; obtenidos del producto de teledetección CPC Global Temperature.

Evapotranspiración potencial: se utilizaron los datos del proyecto Simulaciones hidrológicas para Costa Rica de 1985 a 2019 utilizando HYPE CR 1.0; obtenidos del producto de teledetección MODIS16.

Caudales: los caudales observados fueron obtenidos de los registros de la estación hidrológica Guardia, propiedad del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en la época que corresponde al periodo del modelo, la cual se extiende de 1981 a 2010.

4.3.3 Evaluación del modelo hidrológico

Como parte de la modelación hidrológica, se realizará un análisis de sensibilidad de los datos, el cual permite conocer la variabilidad de los parámetros de entrada a nivel espacial. Con este análisis se asignan constantes a los parámetros no influyentes, permitiendo calibrar con base en los parámetros más influyentes, evitando la sobre parametrización y aumentando la eficiencia del modelo hidrológico (Devak y Dhanya, 2017; Gan et al., 2013; Song et al. 2015). El análisis de sensibilidad del modelo se realizará mediante el método de Análisis de Sensibilidad Regionalizado (RSA) (Wang y Solomatine,

2019; Pianosi et al., 2016; Song et al., 2015; Tang et al., 2007) a partir de una muestra definida con la metodología del muestreo de Monte Carlo (Devak y Dhanya, 2017; Saltelli et al., 2008).

La calibración del modelo se realizará a nivel diario, según las estadísticas de desempeño: NSE, lnNSE y KGE descritas en el apartado 3.5. Asimismo, se realizará una comparación gráfica de los hidrogramas simulados con los observados en el periodo de tiempo disponible.

Para la validación del modelo, se ejecutarán simulaciones para el periodo disponible de datos observados que no fue utilizado para la calibración.

4.3.4 Aplicación del modelo en una subcuenca con características similares

Para la ejecución del tercer objetivo, el modelo calibrado con parámetros de la cuenca alta del río Tempisque se aplicará en la subcuenca del río Sardinal, que es una subcuenca del río Tempisque, ubicada en la provincia de Guanacaste, cantón Carrillo, distrito Sardinal, entre las coordenadas CRTM05 306000 – 322000 Este y 1154000 – 116500 Norte.

Los resultados obtenidos para ambas aplicaciones serán comparados con los resultados del estudio Modelación precipitación – escorrentía con ayuda de la teledetección en los trópicos de Costa Rica del 2022, el cual como resultado generó valores de caudales para subcuencas de todo el territorio de Costa Rica. La comparación se realizará mediante un análisis de desempeño según los indicadores definidos en la sección 3.4.

A partir de las comparaciones, se efectuará una discusión de los resultados obtenidos y de la aplicabilidad del modelo. En la siguiente figura se observa un diagrama resumen del proceso metodológico.

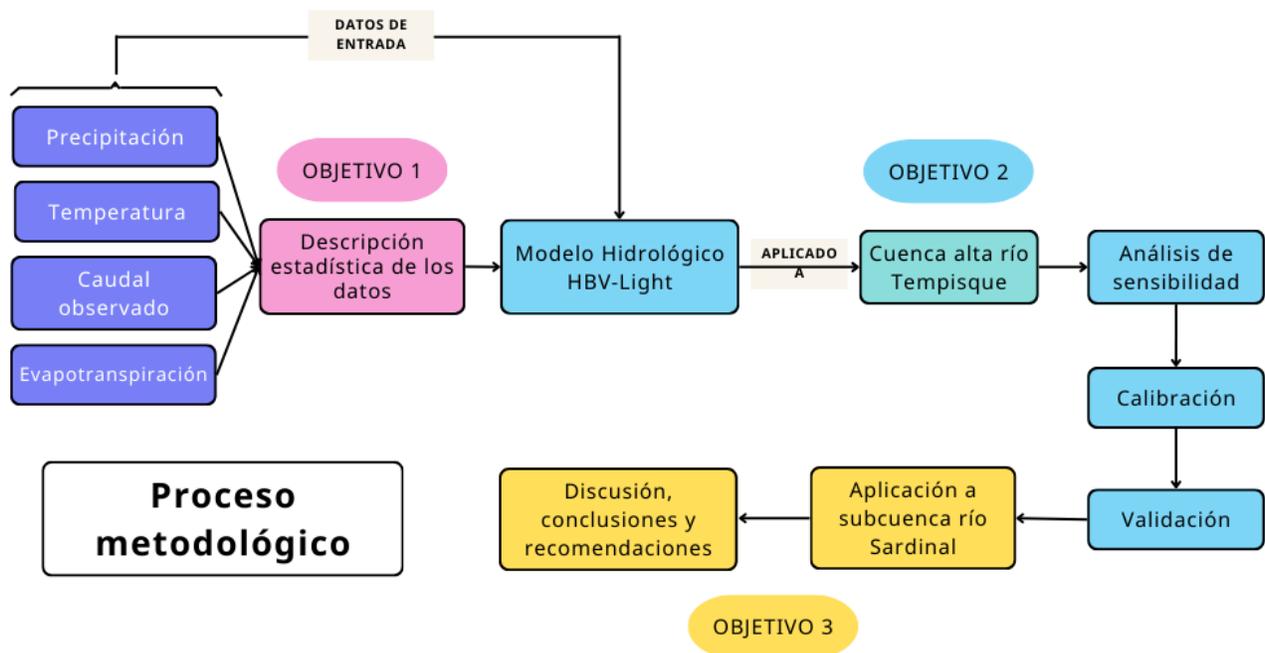


Figura 12. Diagrama del proceso metodológico

5 RESULTADOS

5.1. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Se aplicó el modelo hidrológico HBV-Light en la cuenca alta del río Tempisque con el propósito de obtener parámetros de calibración que cumplan con los objetivos de desempeño para ser aplicados en la subcuenca del río Sardinal.

En primer lugar, se identificaron los componentes que se van a incluir como variables de entrada en el modelo. Luego, se procesó la información recopilada con el fin de que cumpliera con los requisitos del programa. Seguidamente se realizó la calibración del modelo calculando las estadísticas de desempeño NSE, lnNSE y KGE. Al obtener métricas satisfactorias se realizó la validación del modelo. Finalmente, los parámetros que corresponden al mejor desempeño se utilizaron como entradas para la aplicación del modelo en la subcuenca del río Sardinal.

5.1.1. Variables de entrada

A continuación, se detalla la fuente de los datos de entrada del modelo para las cuencas del río Tempisque y el río Sardinal.

5.1.1.1. Precipitación

Se utilizó la precipitación a escala diaria de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Satellite data (CHIRPS) aplicada y procesada como parte de la elaboración del estudio Modelación de lluvia-escorrentía asistido por teledetección en los trópicos de Costa Rica (Arciniega-Esparza et al., 2022). Se utilizó el modelo HYPE para explorar estrategias de mejoramiento de la modelación hidrológica en regiones tropicales con escasez de datos in situ, manejando diferentes intervalos de tiempo y productos globales de teledetección climática y de suelo reticulados para Costa Rica. Los objetivos específicos del proyecto consistieron en: ajustar el modelo para simular la hidrología de Costa Rica, utilizando productos globales de teledetección climática y de terreno, para correr y calibrar el modelo bajo cuatro estrategias de calibración; y analizar el efecto de la evapotranspiración real y potencial como productos de la teledetección en la calibración del modelo y su capacidad para mejorar la validación de este (Arciniega-Esparza et al., 2022).

Para obtener los mejores resultados se aplicó en el estudio del 2022, una corrección lineal de sesgo ($\text{sesgo} = X_{\text{obs}}/X_{\text{satellite}}$) a los datos de precipitación de CHIRPS, utilizando datos de las estaciones pluviométricas en la cuenca y estaciones virtuales creadas en el centroide de las cuencas, debido a que los valores de caudal se subestimaban con respecto a los valores reales.

El gráfico de las series de tiempo para ambas cuencas se puede observar en la Figura 13.

5.1.1.2. Temperatura

Para el modelo se utilizó el producto satelital del Centro Europeo de Previsión Meteorológica a Medio Plazo (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF) denominado ERA5: 2 metre temperature de ERA5-Land (Hersbach et al., 2023), el cual es un parámetro instantáneo disponible a nivel horario, con una cobertura de un periodo de 1950 hasta la actualidad y una resolución de 31km (Hersbach et al., 2020; Bell et al., 2021). Las series de tiempo para las cuencas del río Tempisque y Sardinal, se graficaron en la Figura 14.

5.1.1.3. Evapotranspiración potencial

Se utilizó la evapotranspiración potencial aplicada en el estudio Modelación de lluvia-escorrentía asistido por teledetección en los trópicos de Costa Rica (2022), del satélite MODIS16 presentada a nivel diario con una resolución de 5km. La ETP se visualiza en la Figura 15 para la cuenca alta del río Tempisque y para la subcuenca del río Sardinal.

5.1.1.4. Caudal

Los registros de caudal se obtuvieron de la estación hidrológica Guardia del Instituto Costarricense de Electricidad ubicada en las coordenadas CRTM05 325868.0 Este y 1168302.8 Norte. La estación cuenta con registros diarios de caudal medio a partir de 1951; no obstante, para este estudio se utilizaron datos a partir de 1981. Para la modelación de la subcuenca del río Sardinal, se toma como referencia de caudal observado, el simulado en el estudio de Arciniega-Esparza y Birkel (2020). Las series de tiempo se ilustran en la Figura 16.

En la Figura 17 se muestran las curvas de probabilidad de excedencia para las series de caudal. Se observa que para ambas series, menos del 5% de las ocurrencias son mayores a los 10mm/día, lo cual es esperado para cuencas con caudales pico consecuentes de precipitaciones elevadas. En la región de caudales bajos, la curva es muy plana en ambas cuencas, lo cual representa la capacidad de sostener el flujo en época de estiaje.

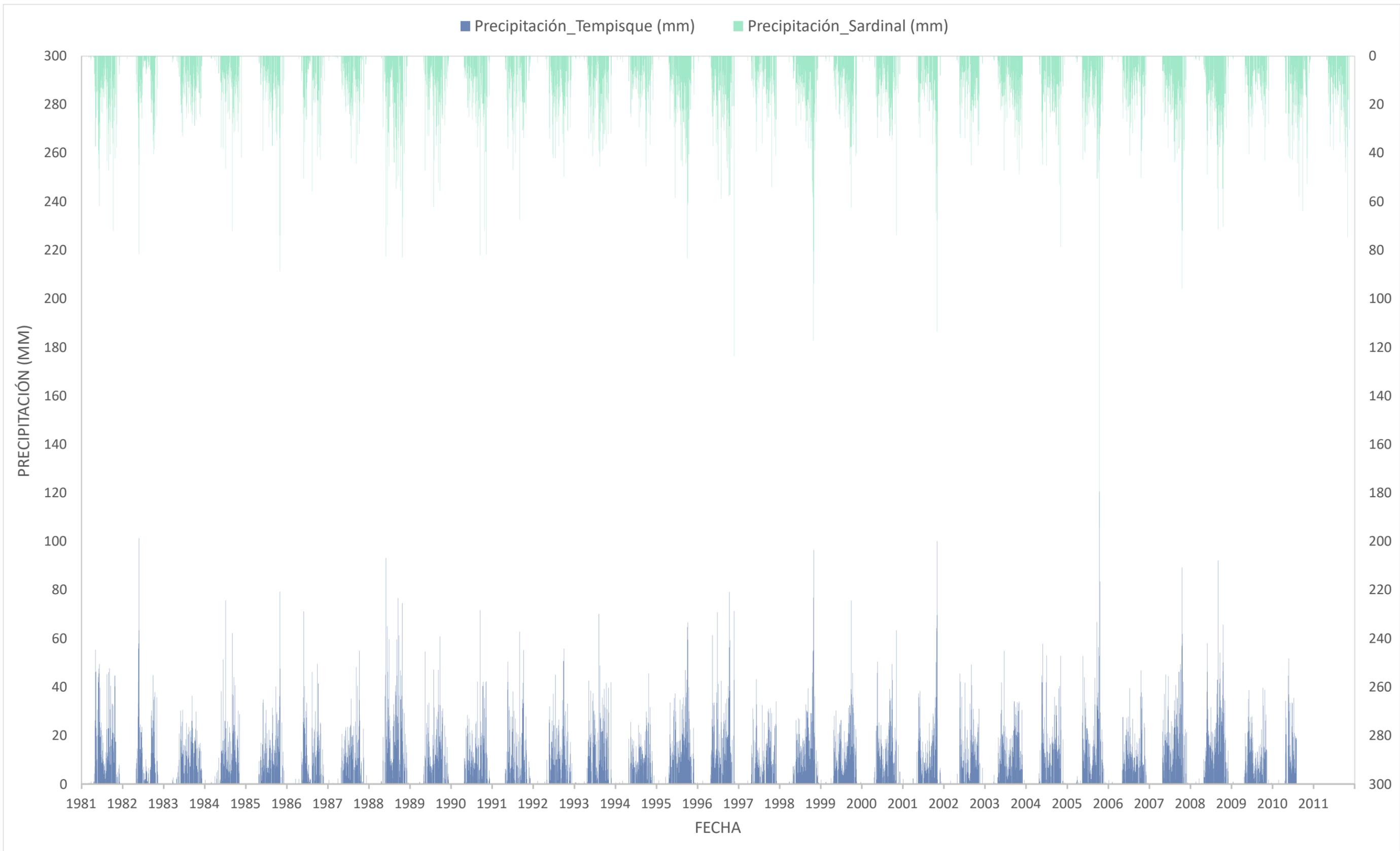


Figura 13. Gráfico de las series de tiempo de precipitación de la subcuenca del río Sardinal y cuenca alta del río Tempisque.

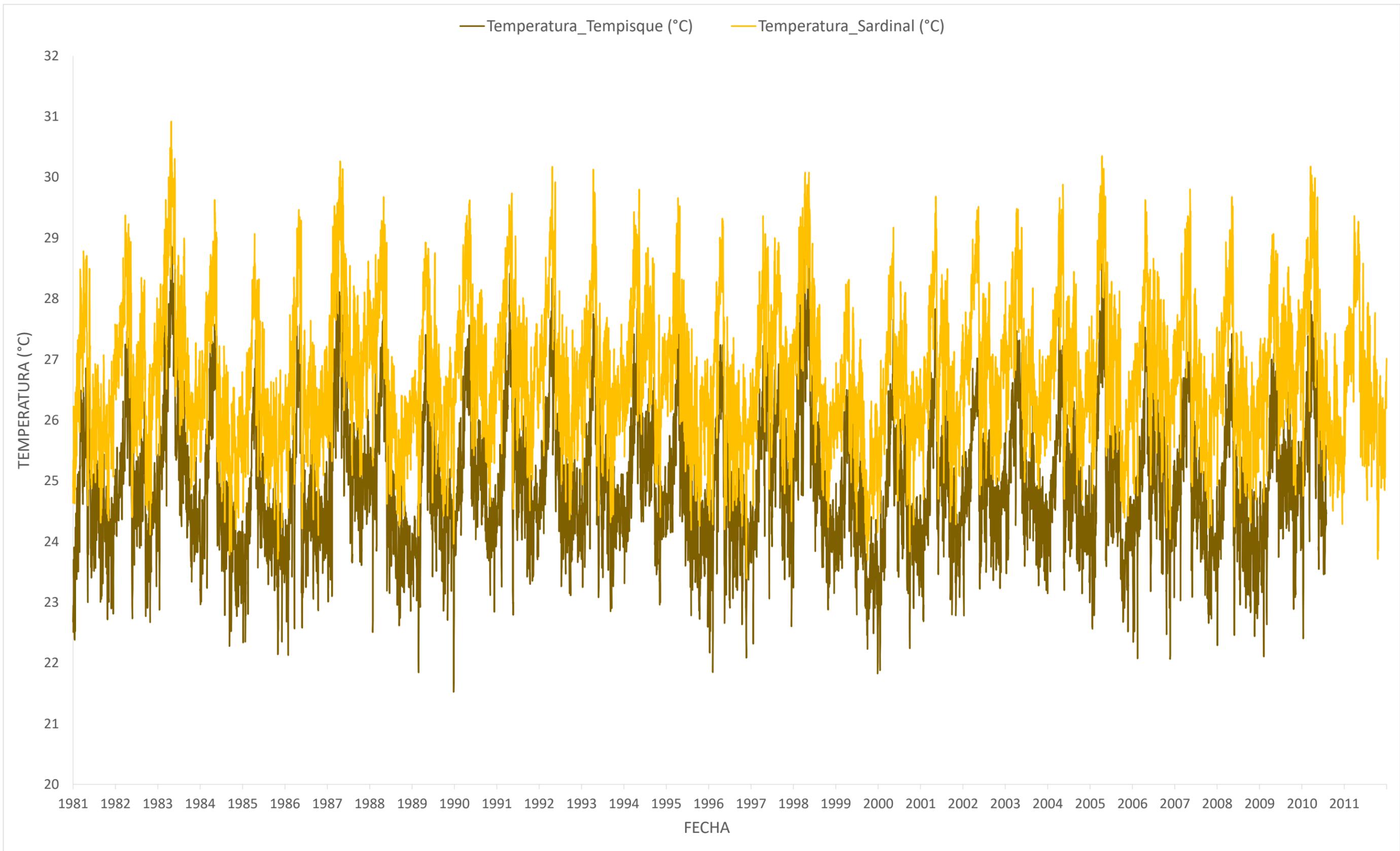


Figura 14. Gráfico de las series de tiempo de temperatura de la subcuenca del río Sardinal y cuenca alta del río Tempisque.

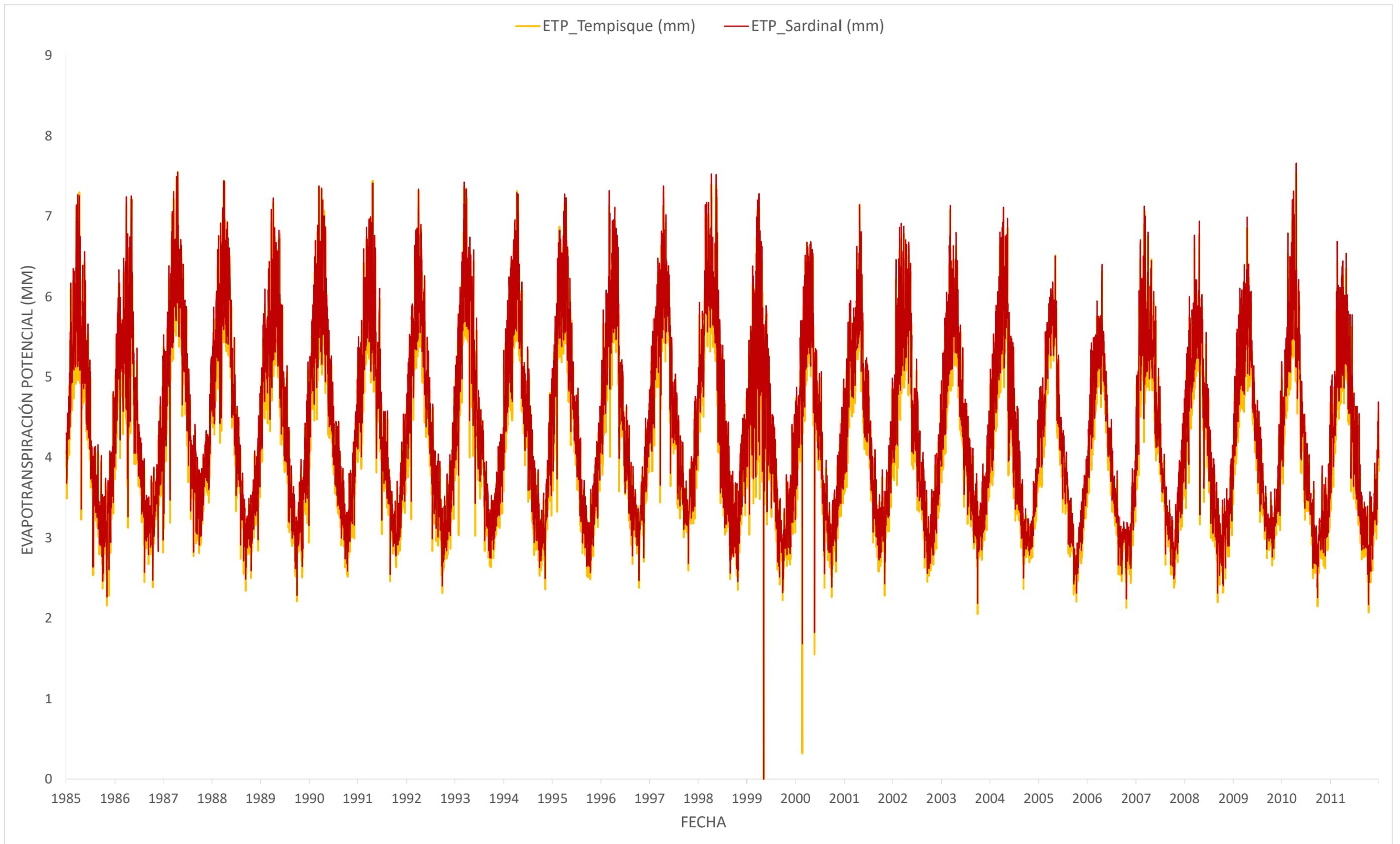


Figura 15. Gráfico de las series de tiempo de evapotranspiración potencial de la subcuenca del río Sardinal y cuenca alta del río Tempisque.

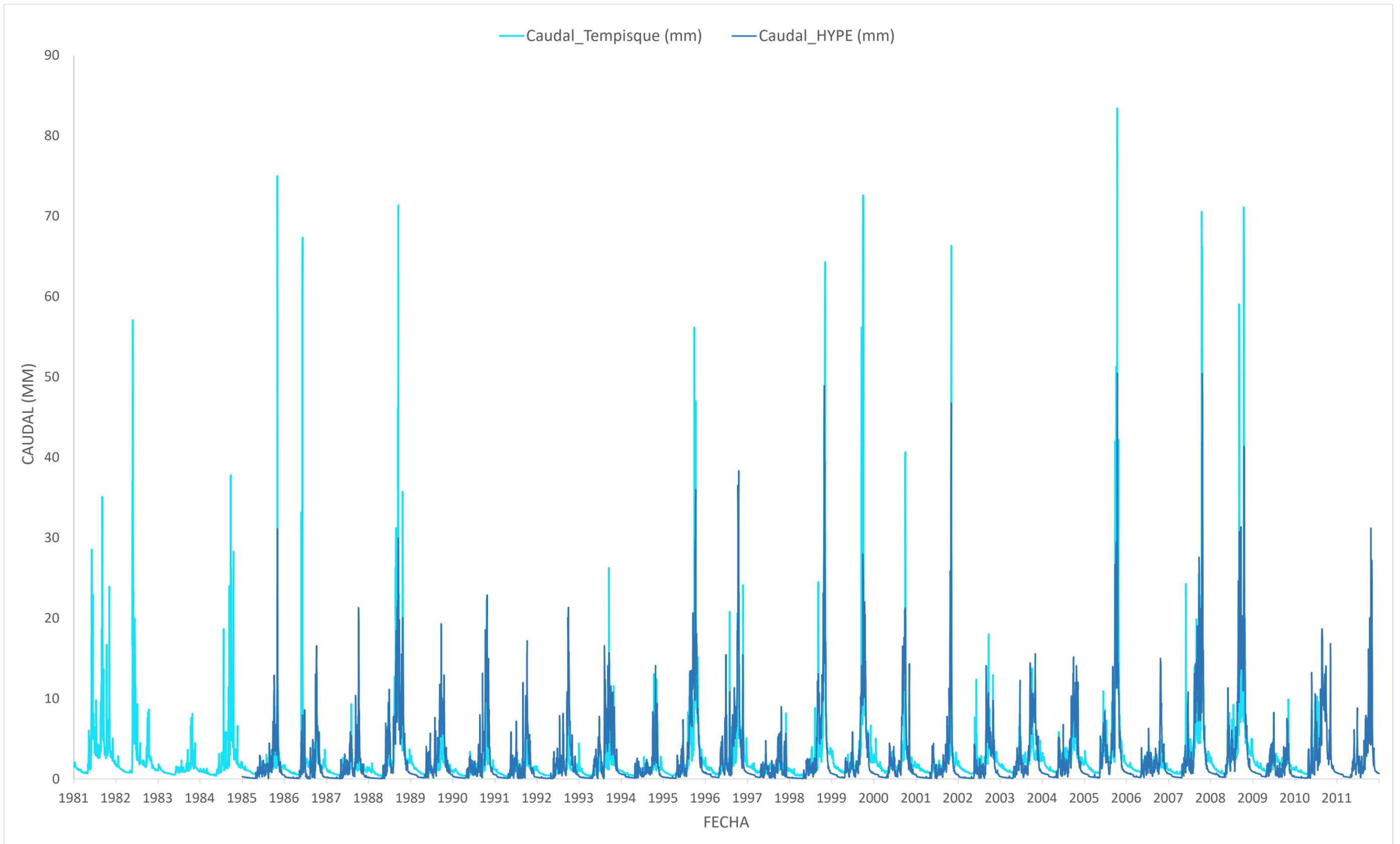


Figura 16. Gráfico de las series de tiempo de caudal de la subcuenca del río Sardinal, simulado por el modelo HYPE y la serie de caudal de la cuenca alta del río Tempisque.

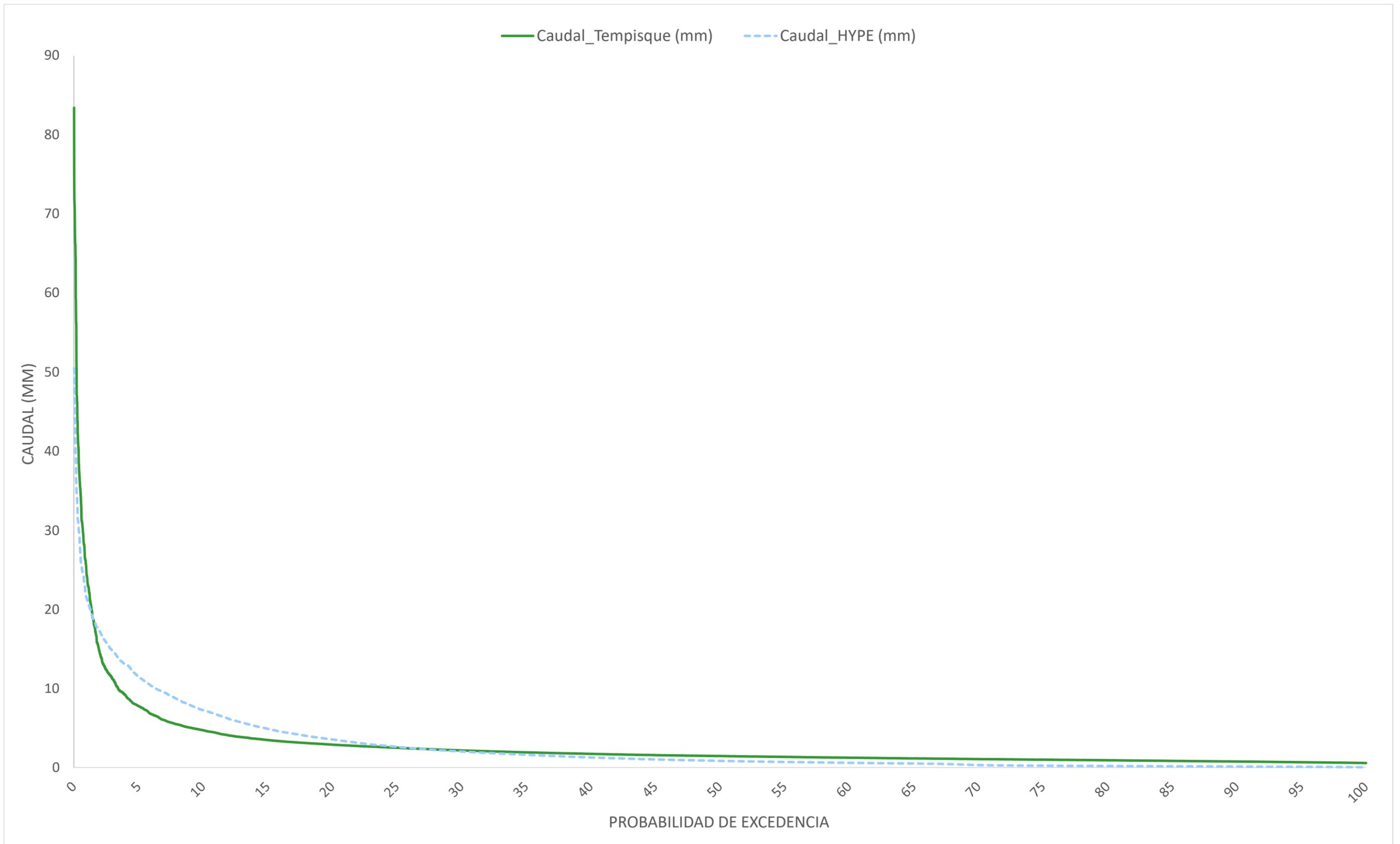


Figura 17. Curva de probabilidad de excedencia de las series de tiempo de caudal de la subcuenca del río Sardinal, simulado por el modelo HYPE y la serie de caudal de la cuenca alta del río Tempisque.

5.1.2. Características estadísticas de los datos

Las características estadísticas como el promedio, desviación estándar y valores extremos para los parámetros de entrada de la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal, se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Características estadísticas de las series de tiempo de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal para las cuencas del río Tempisque y río Sardinal

Serie de tiempo	Cuenca alta río Tempisque				Subcuenca río Sardinal			
	Caudal (m ³ /s)	Prec. (mm)	Temp. (°C)	ETP (mm)	Caudal HYPE (m ³ /s)	Prec. (mm)	Temp. (°C)	ETP (mm)
Cant. de datos	10804	10804	10804	9861	9861	11322	11322	9861
Promedio	26.68	5.30	24.92	4.26	2.56	4.91	26.76	4.40
Desv. estándar	49.49	10.02	1.09	1.08	4.49	9.79	1.15	1.10
mínimo	2.60	0.00	21.53	0.00	0.02	0.00	23.39	0.00
Q25	9.70	0.00	24.16	3.35	0.24	0.00	25.94	3.46
Q50	14.70	0.00	24.77	4.11	0.85	0.00	26.64	4.26
Q75	25.30	7.60	25.56	5.12	2.60	6.84	27.50	5.29
Máximo	903.00	120.60	28.87	7.55	50.19	194.22	30.92	7.66
Mediana	14.70	0.00	24.76	4.11	0.85	0.00	26.64	4.26

En la Figura 18 y Figura 19 se observan gráficos de caja e histogramas de frecuencias para las series de tiempo, los cuales representan una visión general de las características de los datos.

Los registros de caudales del río Tempisque presentan una alta dispersión en los datos, con rangos de 2.6 a 903 m³/s, por su parte, la serie de caudales simulados por el modelo HYPE presentaron rango de 0.02 a 50.19 m³/s, comportamiento esperable debido a las variaciones estacionales y caudales pico habituales. El 75% de los datos estuvo por debajo de los 25.3 m³/s y el promedio fue de 26.68 m³/s para la cuenca del río Tempisque y los caudales modelados para la cuenca del río Sardinal tienen una media de 2.56 m³/s. En la cuenca de río Tempisque se evidencian eventos de caudal por encima de los 400 m³/s e incluso valores extremos han alcanzado los 800 m³/s en varias ocasiones, presentándose entre los meses de setiembre a noviembre. Un dato aislado es el valor máximo de la serie de 903 m³/s, el cual se presentó en octubre del 2005.

Los datos de precipitación en Tempisque y Sardinal presentan características semejantes, con una distribución de frecuencias muy similar para ambas series. En ambos casos, el 50% de los datos tienen un valor de 0 mm, mientras que el 75% se encuentran por debajo de 7.6 mm en Tempisque y 6.84 mm en Sardinal, respectivamente. Los valores máximos diarios de 120.6 mm para Tempisque y 194.22 mm para la cuenca del río Sardinal, corresponden al mismo evento del 12-10-2005, al igual que el punto máximo de caudal registrado.

Con respecto a las series de temperatura, debido a la naturaleza de los datos, la desviación es menor, con valores de 1.09°C para la cuenca de Tempisque y 1.15°C para Sardinal. En los gráficos se aprecia una distribución gaussiana, variando los rangos entre 21.5 a 28.9°C en Tempisque y 23.4 a 30.9°C en Sardinal, respectivamente, esto se corrobora por la cercanía de los valores del promedio y

la mediana. Los diagramas de cajas revelan que el 50% de las observaciones se sitúa entre los 24 a 29°C en la cuenca del río Tempisque y 25 a 27°C para Sardinal.

Las series de ETP muestran una distribución análoga a la de temperatura, con tendencia a la normal. Presentan datos estadísticos similares, con promedios de 4.26 mm en Tempisque y 4.40 mm para Sardinal, respectivamente. El 50% de los datos se encuentra entre 3.35 a 5.12 mm en Tempisque y 3.46 a 5.29 mm en Sardinal, con valores máximos que alcanzan los 7.55 y 7.66 mm. De esta forma, las variables de ETP exhiben patrones análogos entre ambas cuencas hidrográficas evaluadas, en función del comportamiento estadístico descrito.

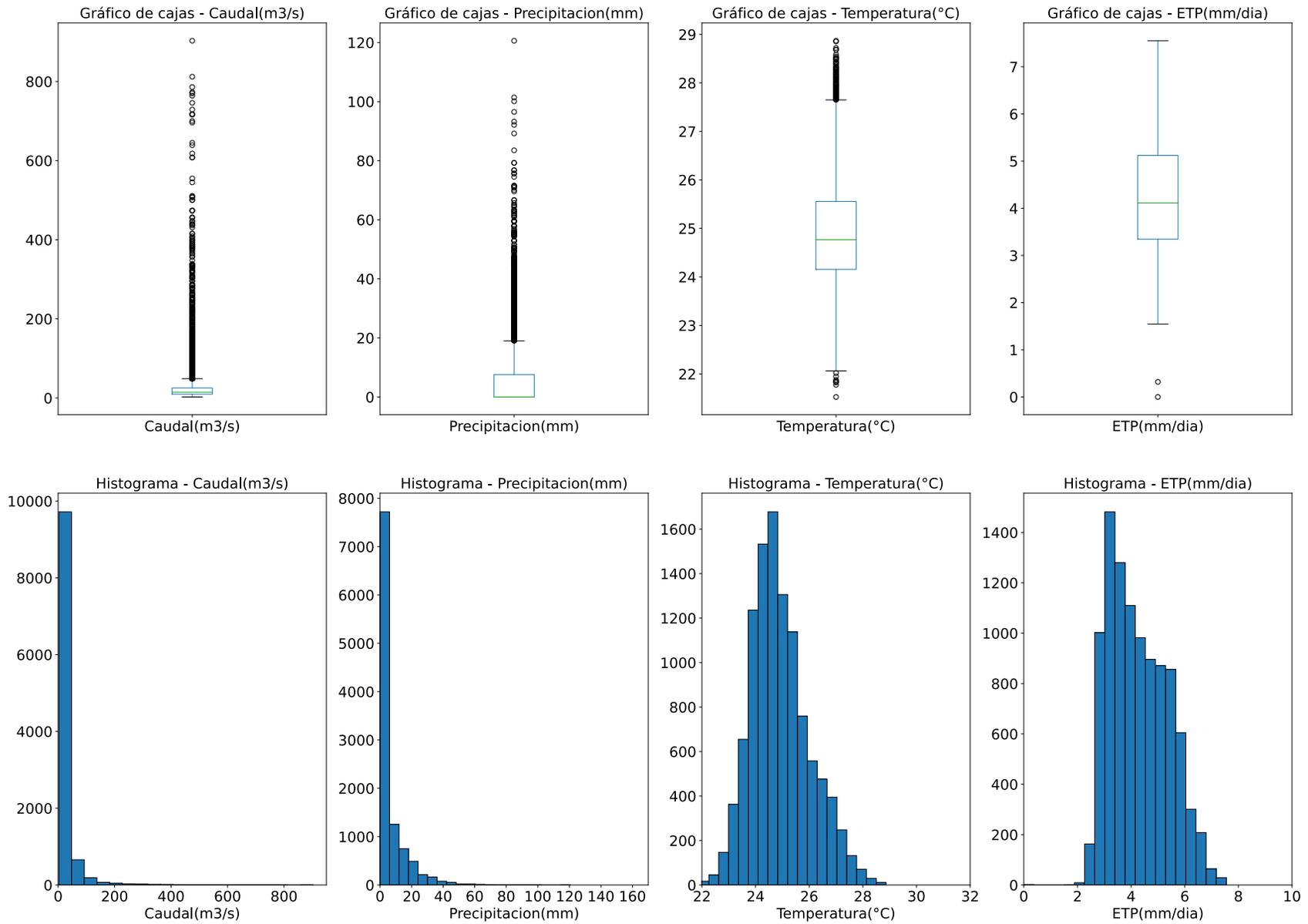


Figura 18. Histogramas y gráficos de cajas de las series de datos de entrada Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración y Caudal para la cuenca alta del río Tempisque.

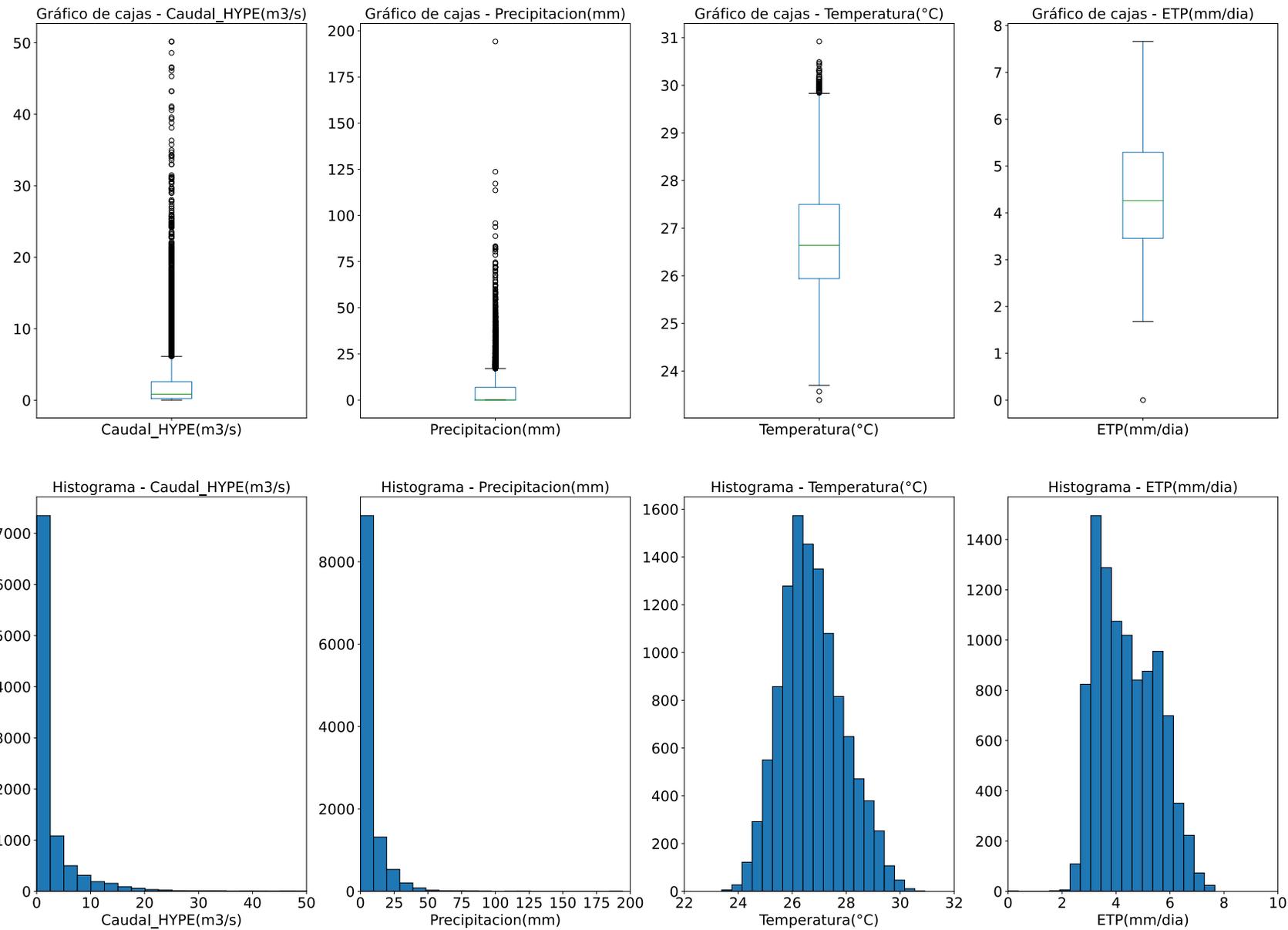


Figura 19. Histogramas y gráficos de cajas de las series de datos de entrada Precipitación, Temperatura, Evapotranspiración y Caudal para la subcuenca del río Sardinal.

5.1.3. Procesamiento de información

Se procesaron las variables de entrada para cumplir con los requerimientos del programa HBV-Light. Se requiere tres archivos en formato .txt que contengan información diaria de precipitación, caudal, evapotranspiración potencial y temperatura. La precipitación y temperatura, al ser productos distribuidos, se promediaron en toda el área de cada cuenca utilizando rutinas de programación generadas en el lenguaje Python. La ETP se ingresó como el promedio para cada día del año, por lo que generó un archivo con 365 datos. Con respecto al caudal, el modelo requiere el ingreso del caudal específico, el cual se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{mm/día} = Q_{m3/s} \cdot 86400 \cdot 1000/A \quad [Ecuación 13]$$

Donde A es el área de la cuenca en m².

5.1.4. Configuración del modelo

Con el objetivo de encontrar un conjunto de parámetros que sean compatibles con las características de la subcuenca del río Sardinal, se realizó una división por rangos de elevación y zonas de vegetación.

La cuenca alta del río Tempisque presenta un rango de 20 a 1843 msnm y la subcuenca del río Sardinal de 0 a 540 msnm, por lo que se configuraron dos zonas de elevación para la cuenca alta del río Tempisque, donde una se encuentra en el rango de 0 a 540 msnm y la segunda desde los 540 hasta los 1843 msnm.

Para efecto de la modelación, se agrupó la cobertura del suelo en tres categorías: bosque, pastos y cultivos, para cada una de las cuencas. En el siguiente cuadro se observa el área total para cada distribución de elevación-vegetación.

Cuadro 5. Distribución de zonas de elevación-vegetación en la configuración del modelo para la cuenca alta del río Tempisque.

Rango elevación	Cobertura	Área (m ²)	Fracción de área
0-540	bosque	158910608.36	0.17
	cultivos	35207031.75	0.04
	pasto	542023334.45	0.59
540-1843	bosque	130874982.35	0.14
	pasto	59245647.74	0.06
	Total	926261604.65	1.00

En la subcuenca del río Sardinal, el rango de elevaciones de 0 a 540 msnm representa la totalidad de su área. Con el fin de caracterizar la altitud, se dividió en subzonas para encontrar parámetros de calibración que caractericen dicho rango de elevación. Esta zona de elevación contiene el 80% del área de la cuenca alta del río Tempisque y se subdivide en tres zonas de vegetación: bosque (17% de la cuenca), pasto (59%) y cultivos (4%). Para el rango de 540 a 1843 msnm, existen dos zonas de bosque

y pasto, que representan 14% del área de la cuenca y los pastos el 6% restante. Esta estratificación permitió configurar parámetros diferenciados en función de la altitud y uso de suelo característicos.

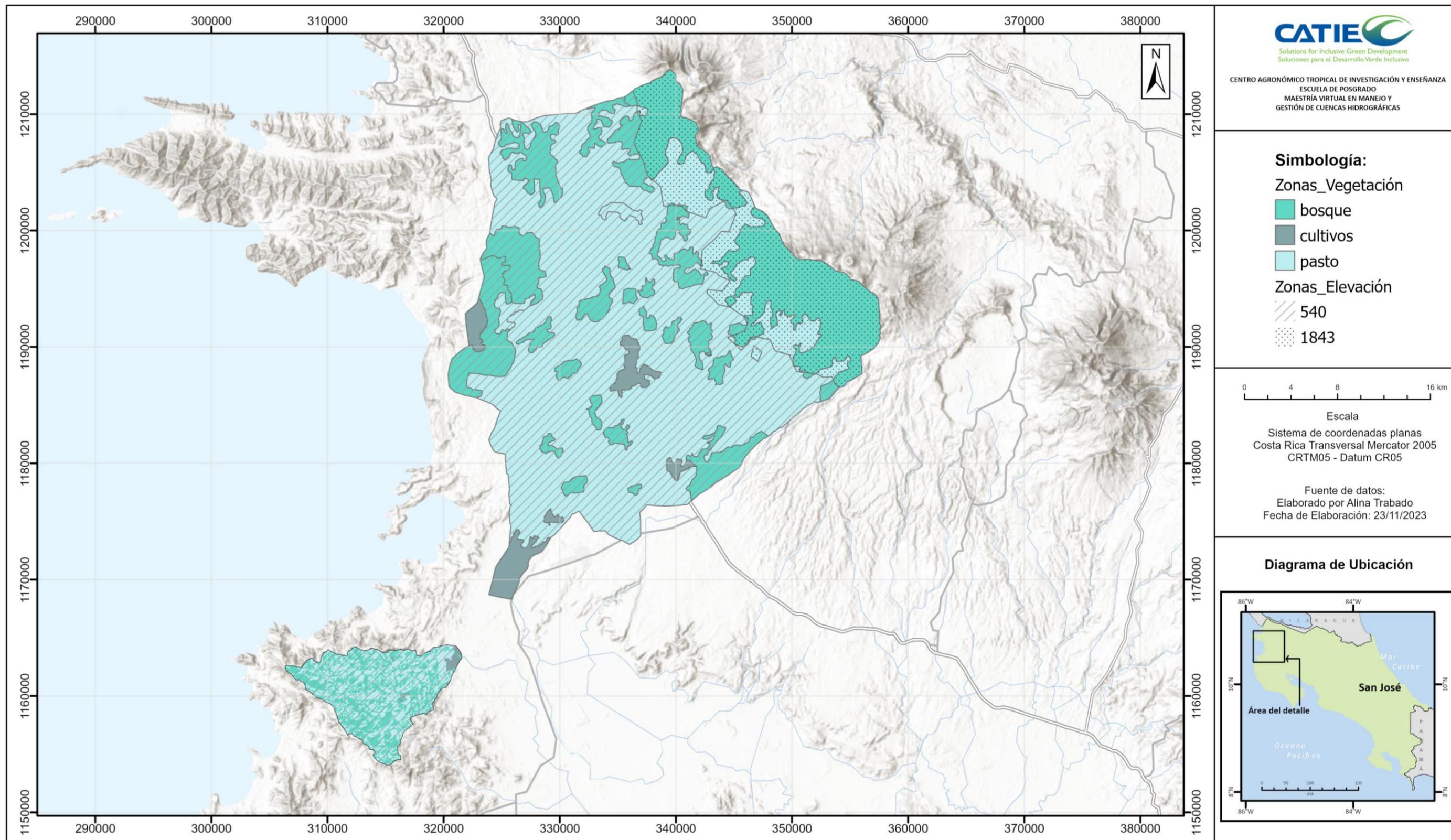


Figura 20. Mapa de zonas de elevación-vegetación en la cuenca alta del río Tempisque y la subcuenca del río Sardinal.

5.1.4.1. Parámetros del modelo

El modelo HBV-Light requiere el ingreso de parámetros de la cuenca y parámetros de las zonas de vegetación. En el cuadro mostrado a continuación, se indica la lista de los parámetros con los rangos de validez que permite el programa.

Cuadro 6. Rango de parámetros para el modelo HBV-Light

Nombre	Unidades	Descripción	Rango de validez
Parámetros de la cuenca			
PERC	mm/ Δt	Percolación desde el almacenamiento superior al inferior	[0,inf)
UZL	mm	parámetro umbral	[0,inf)
K0	1/ Δt	coeficiente de almacenamiento (o recesión) 0	[0,1)
K1	1/ Δt	coeficiente de almacenamiento (o recesión) 1	[0,1)
K2	1/ Δt	coeficiente de almacenamiento (o recesión) 2	[0,1)
MAXBAS	Δt	longitud de la función de ponderación triangular	[1,100]
Cet	1/°C	factor de corrección de evaporación potencial	[0,1]
PCALT	%/100m	aumento de la precipitación con la elevación	(-inf,inf)
TCALT	°C/100m	disminución de la temperatura con la elevación	(-inf,inf)
Pelev	m	elevación de datos de precipitación en el archivo PTQ	(-inf,inf)
Telev	m	elevación de datos de temperatura en el archivo PTQ	(-inf,inf)
Parámetros de la zona de vegetación			
FC	mm	almacenamiento máximo de humedad del suelo	(0,inf)
LP	-	Valor de humedad del suelo por encima del cual la ETA alcanza la ETP	[0,1]
β	-	Parámetro que determina la contribución relativa a la escorrentía procedente de la lluvia o del deshielo.	(0,inf)

Debido a que no existían mediciones in situ para toda la información requerida de los parámetros de calibración, estos se configuraron inicialmente según lo sugerido por Beck et al. (2016). Dichos autores agruparon los parámetros de una muestra de cuencas ya calibradas utilizando el modelo HBV, agrupando los parámetros según las características de las cuencas, y obteniendo un promedio de valores regionalizados. Tal como menciona Beck et al. (2016), este enfoque que transfiere parámetros de calibración entre cuencas con características climáticas y/o fisiográficas similares, tiene un mejor desempeño que otro tipo de enfoques, al igual que la transferencia por proximidad geográfica. Los rangos sugeridos se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 7. Rango de parámetros para el modelo HBV-Light, sugeridos por Beck et al. (2016)

Parámetro	Rango
FC	50.6 - 686.7
β	1.01 - 4.17
LP	0.5 - 1.0

Parámetro	Rango
K0	0.08 - 0.8
K1	0.04 - 0.66
K2	0.001 - 0.14
UZL	12.24 - 86.87
PERC	0.14 - 4.17
MAXBAS	1.0 - 4.0

Fuente: Beck et al., 2016 citado por Araya, 2021.

Para los parámetros Cet, PCALT y TCALT se utilizaron los rangos que por defecto utiliza el modelo. Los valores de Pelev y Telev corresponden al valor de elevación de los datos de precipitación y temperatura utilizados, por lo que se ingresó la elevación media de la cuenca, con un valor de 384 msnm.

5.1.5. Simulación del modelo

Para llevar a cabo el proceso de simulación, se realiza una división de los datos observados en tres periodos:

1. Periodo de “calentamiento”: este periodo se excluye de la calibración. Se utilizaron los primeros dos años de datos disponibles, desde el 01-01-1981 hasta 31-12-1982.
2. Periodo de calibración: comprende 15 años que se extienden desde el 01-01-1983 hasta el 31-12-1997.
3. Periodo de validación: desde el 01-01-1998 hasta el 31-07-2010, para un total de 12.6 años de datos.

Los datos se dividieron en periodos con características estadísticas como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 8. Características estadísticas de los periodos de calibración y validación para la serie de tiempo de caudal observado.

Propiedad estadística	Serie de tiempo completa	Periodo de calibración	Periodo de validación
Rango de tiempo	1/1/1981 a 31/7/2010	1/1/1983 a 31/12/1997	1/1/1998 a 31/7/2010
Cantidad de datos	10804	6209	4595
Promedio (m ³ /s)	25.08	20.75	32.82
Desviación estándar (m ³ /s)	49.49	38.77	58.65
Promedio época lluviosa (m ³ /s)	33.34	28.23	45.52
Promedio época seca (m ³ /s)	13.52	10.29	15.05
Máximo (m ³ /s)	903.00	812	903
Mínimo (m ³ /s)	2.56	2.56	3.89

El modelo utiliza una simulación mediante la generación de muestras basadas en el método de Monte Carlo, el cual estima la función $f(x)$ como igual al valor promedio de $f(x)$ en n puntos aleatorios de todo el espacio (Devak y Dhanya, 2017). Es un método flexible y fácil de utilizar; sin embargo, requiere una gran cantidad de muestras mientras aumenta el número de parámetros por calibrar. Como primera aproximación, se ejecutaron 2,000,000.00 de simulaciones para realizar un ajuste preliminar del modelo a los rangos de los parámetros propuestos previamente.

De las mejores 100 simulaciones, se seleccionó la que agrupaba las mejores métricas de NSE, lnNSE y KGE. En el Cuadro 9 se muestran los parámetros resultantes y métricas asociadas a la mejor simulación.

Cuadro 9. Parámetros resultantes para la mejor simulación con el método de Monte Carlo y métricas de desempeño asociadas.

No. Simulación		1390128
Parámetros	Unidades	Valor
PERC	mm/ Δt	2.87
UZL	mm	48.74
K0	1/ Δt	0.55
K1	1/ Δt	0.18
K2	1/ Δt	0.01
MAXBAS	Δt	1.83
Cet	1/ $^{\circ}\text{C}$	0.29
PCALT	%/100m	10.00
TCALT	$^{\circ}\text{C}/100\text{m}$	0.60
Pelev	m	342.00
Telev	m	342.00
FC_1	mm	625.73
LP_1	-	0.69
β_1	-	2.57
FC_2	mm	586.62
LP_2	-	0.69
β_2	-	1.77
FC_3	mm	592.22
LP_3	-	0.52
β_3	-	3.92
Contribución Q0	-	0.07
Contribución Q1	-	0.45
Contribución Q2	-	0.48
Diferencia media	mm/año	-56.07
Reff	-	0.36
KGE	-	0.64
LogReff	-	0.56

La Figura 21 presenta las series de tiempo correspondientes a los datos de entrada de precipitación, así como el caudal observado y el caudal simulado para todo el periodo de calibración. En general, se aprecia un buen ajuste a los caudales bajos y al comportamiento del hidrograma,

manteniendo replicar los periodos del flujo, conforme se refleja en un valor aceptable para la métrica KGE. Sin embargo, existe una subestimación de los picos registrados, evidenciado en la magnitud deficiente de NSE. En total se obtiene una diferencia de caudal de -56.07 mm/año. La Figura 23 muestra los resultados para la rutina de agua subterránea, donde se encuentran los niveles de agua subterránea para cada una de las cajas de almacenamiento. El valor máximo para la caja superior se estima en 60 mm y para la caja inferior de 320 mm. En el gráfico de la Figura 22 se encuentra la evapotranspiración real simulada.

El Cuadro 10 contiene un resumen de los resultados del modelo dado por el programa.

Cuadro 10. Resumen de resultados del modelo HBV_Light para la primera simulación con Monte Carlo.

Balance hídrico (mm/año)	Cuenca alta del río Tempisque
Sumatoria Qsim	757
Sumatoria Qobs	701
Sumatoria Precipitación	1829
Sumatoria ETR	1066
Sumatoria ETP	1580
Contribución Q0	0.071
Contribución Q1	0.449
Contribución Q2	0.48
Bondad de ajuste	
Coefficiente de determinación	0.4299
Eficiencia del modelo	3576
Eficiencia para logQ	0.5602
Diferencia media	-56
Eficiencia para época seca	0.5928

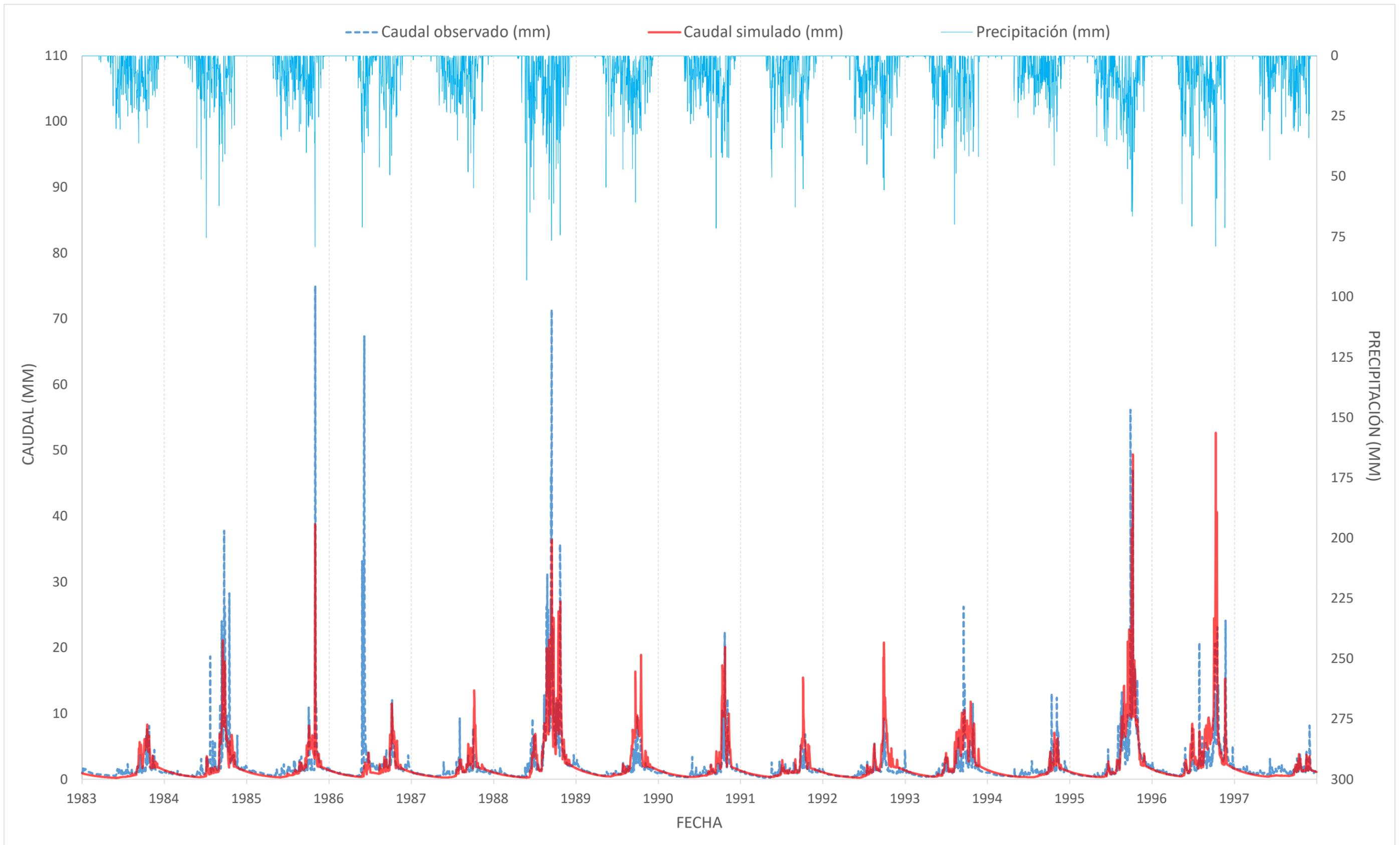


Figura 21. Resultados obtenidos de la serie de caudal y precipitación para el primer ajuste del modelo con el método de Monte Carlo.

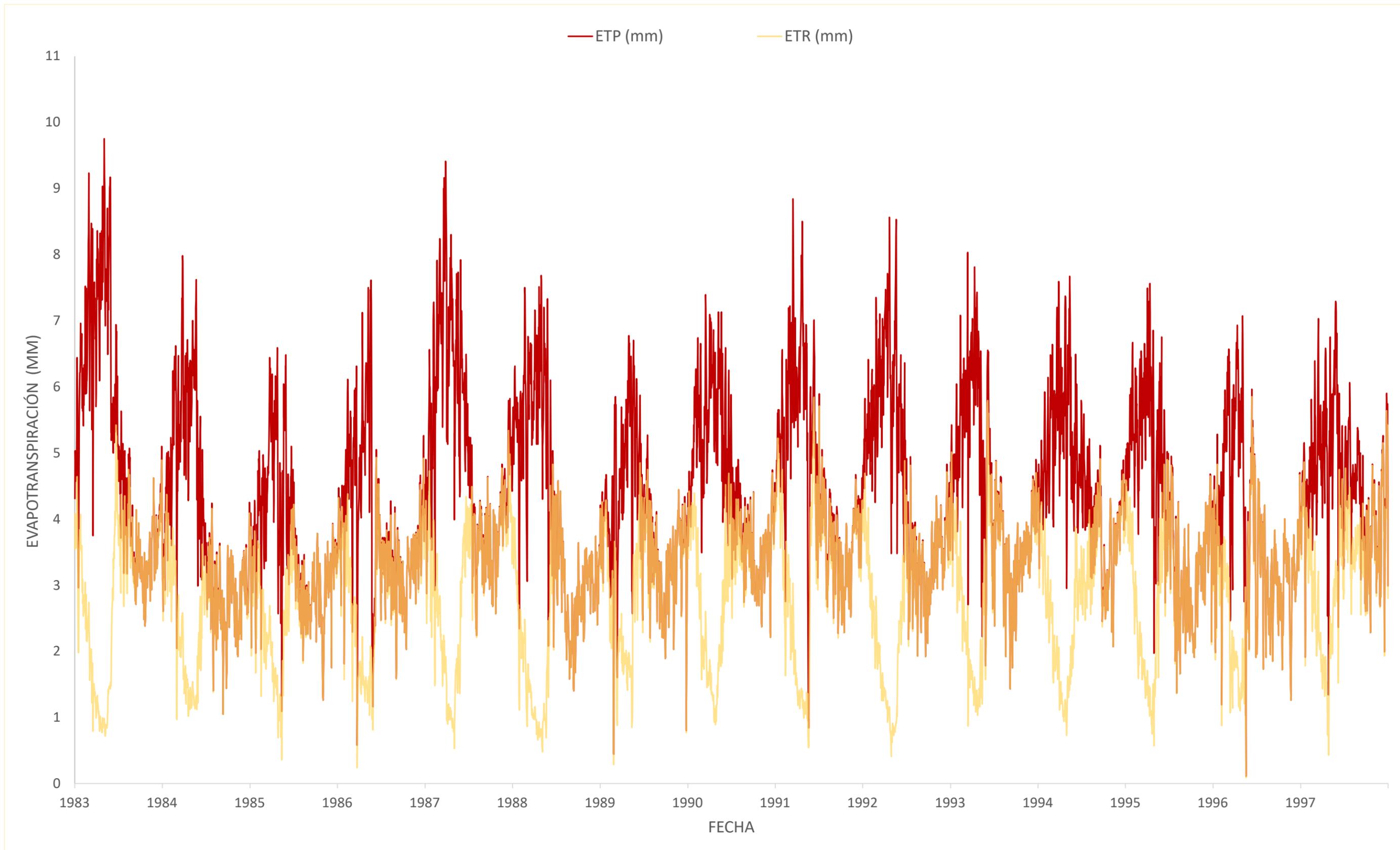


Figura 22. Resultados obtenidos para la evapotranspiración real y potencial para el primer ajuste del modelo con el método de Monte Carlo.

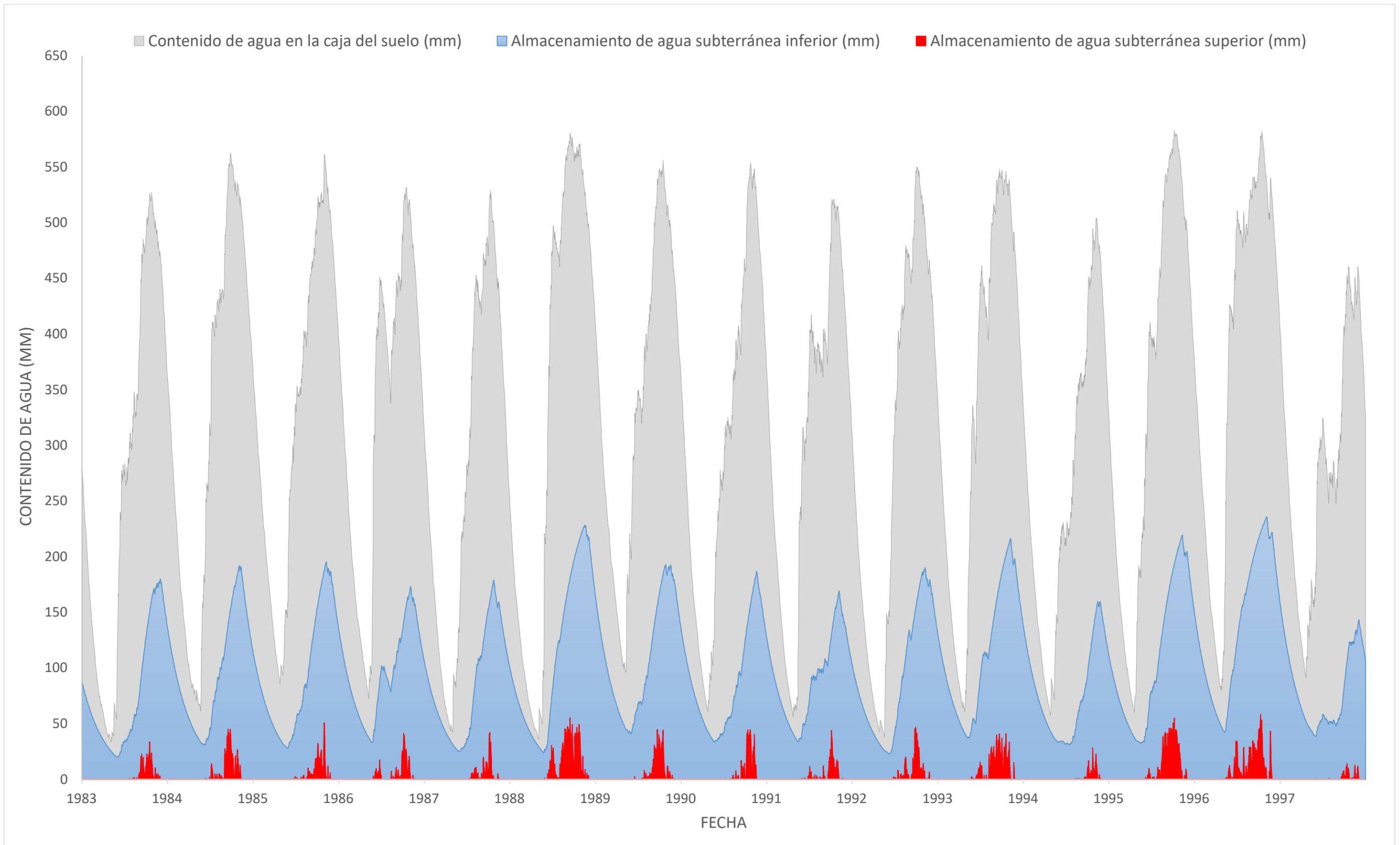


Figura 23. Resultados obtenidos para el nivel de agua subterránea en cada subnivel para el primer ajuste del modelo con el método de Monte Carlo.

6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El objetivo principal de implementar un Análisis de Sensibilidad (SA) fue optimizar la calibración del modelo hidrológico, mediante la identificación de los parámetros más influyentes, los cuales se incorporaron al proceso de la calibración; asimismo se buscó reducir la incertidumbre del modelo.

Se implementó el método de Análisis de Sensibilidad Regionalizado (RSA) o generalizado, el cual se basa en simulaciones de Monte Carlo con combinaciones aleatorias de parámetros tomadas para toda su distribución. Las combinaciones se califican en conductuales y no conductuales, basadas en un umbral predefinido de los resultados del modelo (Pianosi et al., 2016; Song et al., 2015; Tang et al., 2007). Sin embargo, con el fin de evitar la necesidad de hacer la división en conductuales y no conductuales, Wagener et al. (2001) realiza una división en diez subgrupos de igual magnitud, ordenados según el desempeño del modelo. Para cada subgrupo se determina la distribución de probabilidad acumulativa y se grafican para determinar de manera visual si un parámetro es sensitivo (si las curvas están alejadas) o no.

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad mediante el método RSA, se utilizó el muestreo de Monte Carlo para generar simulaciones de entrada requeridas para el análisis de sensibilidad. Según las revisiones realizadas por Song et al. (2015), la mayoría de las investigaciones aplican entre 1000 y 10000 simulaciones del modelo hidrológico utilizado como entrada para encontrar la convergencia en el análisis de sensibilidad. Por lo tanto, para el estudio se generaron 10000 muestras aleatorias utilizando el muestreo de Monte Carlo y se ordenaron los vectores de mayor a menor según el valor de la métrica de desempeño KGE, con el fin de generar los subgrupos de parámetros.

La Figura 24 y Figura 25 representan los resultados de las curvas de distribución de probabilidad para cada uno de los parámetros del modelo. El RSA mide la distribución de las respuestas del modelo a partir de las muestras generadas. Cuando cada grupo de 1000 simulaciones se encuentra sobre o muy cercano a otro, son representativos de valores uniformemente distribuidos de la métrica de desempeño utilizada (Tang et al., 2007), en este caso KGE. La métrica KGE se utilizó para el análisis de sensibilidad, debido a que representa tres componentes esenciales que se esperan alcanzar de las simulaciones: distribución de las observaciones, forma y tiempo de respuesta.

Las curvas que como subgrupo presentan mayor ajuste a la distribución de probabilidad acumulativa del parámetro son las correspondientes al Cet, FC2 (de la segunda zona de vegetación), LP2 y β_2 . Las siguientes en mostrar acercamiento entre sí, son las que representan los parámetros k_0 , MAXBAS, β_1 , k_2 , UZL y PERC. Seguidamente, se observa una ligera dispersión en los parámetros k_1 y LP1, representativos de la zona de vegetación 1, la cual corresponde a bosque. Todos los parámetros mencionados se consideran no influyentes debido a la cercanía de las curvas en comparación con los parámetros FC1 y los descriptivos de la zona de vegetación tres correspondiente a pastos FC3, LP3 y β_3 , siendo el FC3 el más influyente en los resultados del modelo.

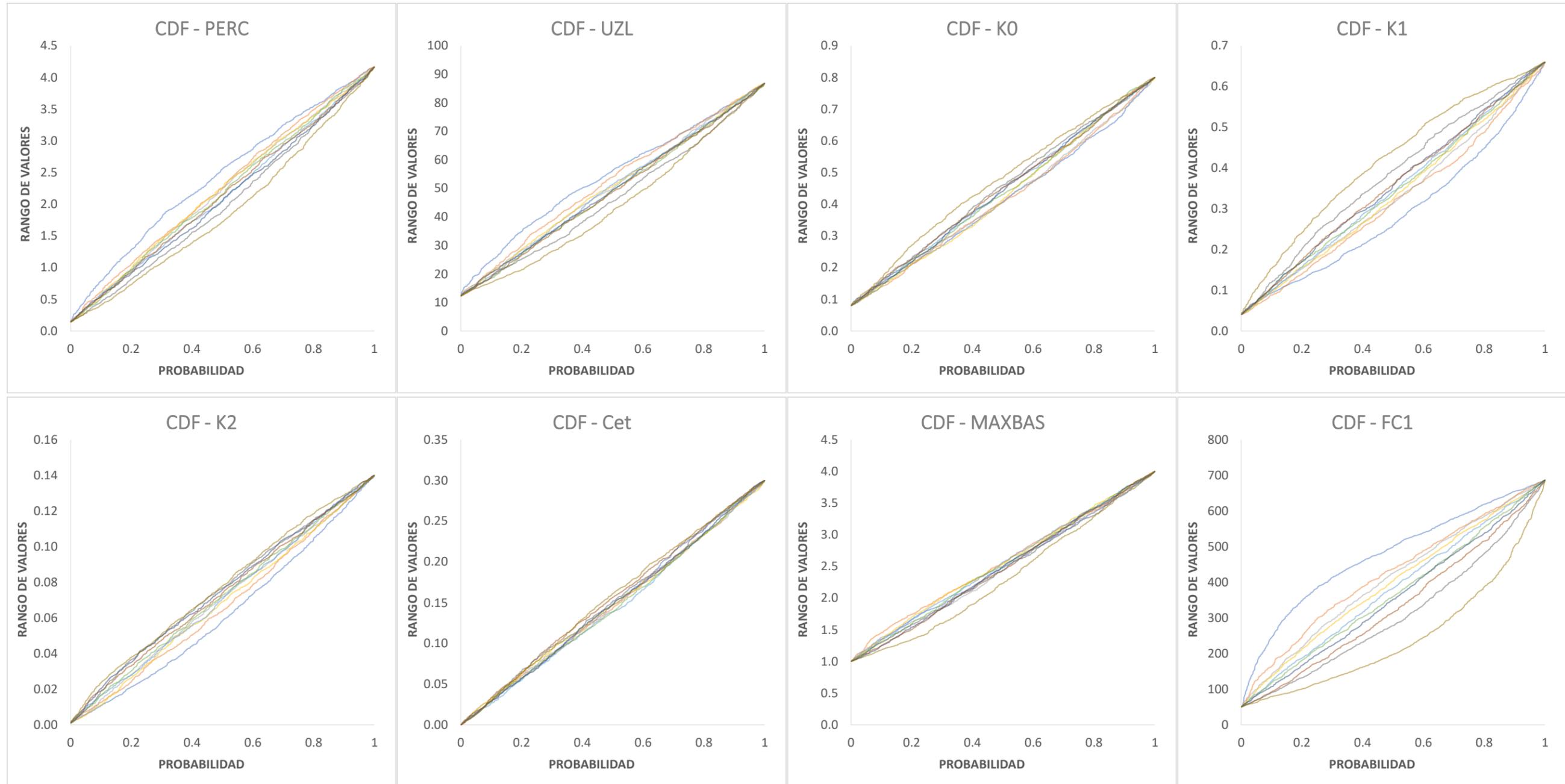


Figura 24. Gráficos de distribución de probabilidad acumulada para el RSA de los parámetros del modelo: PERC, UZL, K0, K1, K2, CET, MAXBAS, FC1.

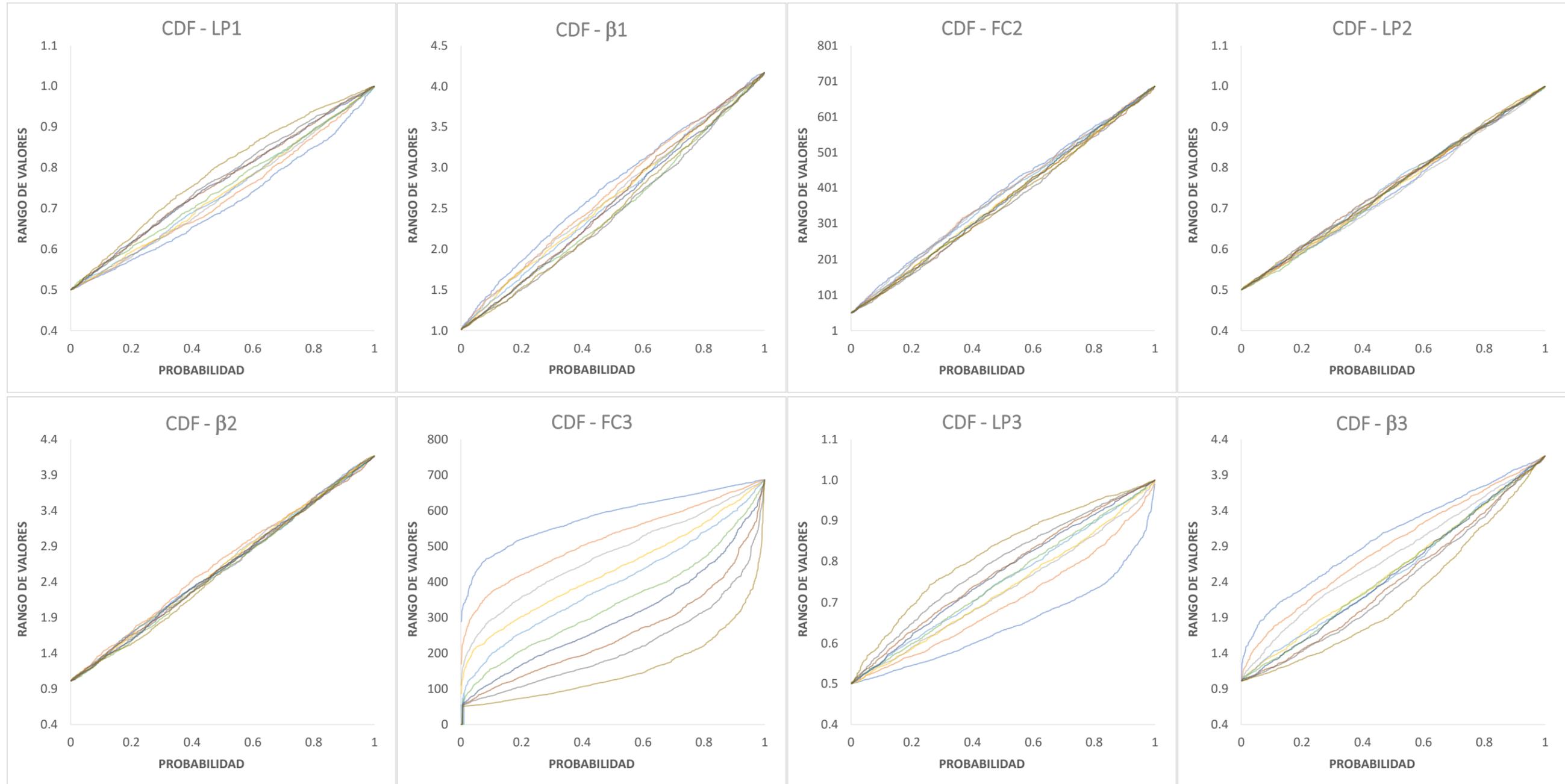


Figura 25. Gráficos de distribución de probabilidad acumulada para el RSA de los parámetros del modelo: LP1, β_1 , FC2, LP2, β_2 , FC3, LP3, β_3 .

7 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Se realizó la calibración del modelo utilizando un algoritmo genético (GAP), el cual, según Seibert (2000), evoluciona los conjuntos de parámetros a través de la selección y recombinación, para encontrar un vector de parámetros optimizado. Inicia con una población de n vectores (por defecto de 50 vectores) y el ajuste se evalúa según la función o funciones objetivo establecidas. Al encontrar el mejor ajuste para una población, se genera una nueva población a partir de dos poblaciones A y B (nueva generación), siguiendo una de las siguientes cuatro reglas para cada parámetro con ciertas probabilidades (p):

- Valores del set A ($p=0.41$)
- Valores del set B ($p=0.41$)
- Valor aleatorio entre los valores del set A y el set B ($p=0.16$)
- Valor aleatorio dentro de los límites del parámetro (mutación) ($p=0.02$)

El mejor vector de parámetros se mantiene hasta encontrar uno nuevo con un mejor desempeño.

La calibración de un modelo de precipitación-escorrentía se puede ver como un proceso de optimización, debido a que se busca aproximar el valor mínimo de una función (error del modelo) para un grupo de variables (Valles, 2017 citado por Araya, 2021). La optimización puede basarse en una o múltiples funciones objetivo, tal como se mencionó anteriormente. Para la optimización del modelo se ponderaron las métricas de desempeño generando una Función Objetivo Ponderada (FOP), ajustando NSE con un peso de 0.3, lnNSE ponderada al 0.3 y RGE con 0.4 de peso, a fin de considerar un ajuste a los caudales pico, caudales base y el ajuste al comportamiento del hidrograma.

Se llevan a cabo cuatro procesos de optimización con GAP y un proceso experimental con simulaciones de Monte Carlo. Para el primer proceso ejecutado, denominado GAP 1, se configuraron 5000 modelaciones para 100 calibraciones dentro del método GAP. Para el proceso GAP 2 se configuraron 10000 modelaciones para 100 calibraciones. Los parámetros de los dos procesos se establecieron según los rangos del Debido a que no existían mediciones in situ para toda la información requerida de los parámetros de calibración, estos se configuraron inicialmente según lo sugerido por Beck et al. (2016). Dichos autores agruparon los parámetros de una muestra de cuencas ya calibradas utilizando el modelo HBV, agrupando los parámetros según las características de las cuencas, y obteniendo un promedio de valores regionalizados. Tal como menciona Beck et al. (2016), este enfoque que transfiere parámetros de calibración entre cuencas con características climáticas y/o fisiográficas similares, tiene un mejor desempeño que otro tipo de enfoques, al igual que la transferencia por proximidad geográfica. Los rangos sugeridos se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 7. Las tres optimizaciones restantes denominadas Local 1 MC, Local 2 GAP y Local 3 GAP, se ejecutaron dejando constantes todos los parámetros según los valores obtenidos en la optimización GAP 1 (ya que presenta mejor desempeño según la FOP) y se configuró la generación de valores aleatorios para los parámetros con mayor incidencia según los resultados del análisis de sensibilidad, los cuales son FC, LP y β . El proceso ejecutado en Monte Carlo crea valores aleatorios diferenciados para cada zona de vegetación. En Local 2 GAP se mantuvo la aleatoriedad dentro de cada parámetro, pero constantes en las tres zonas de vegetación, excepto β , para el cual se modifican los pesos de

cada zona según la fracción de área correspondiente para cada zona de vegetación. Finalmente, en el proceso Local 3 GAP se configuró la generación de valores aleatorios para los tres parámetros más influyentes, con el mismo peso para cada zona de vegetación. Asimismo, se extendió el rango de FC hasta 1357mm con el fin de probar si existe mayor ajuste a la serie observada, según la información de capacidad de campo en la cuenca alta del río Tempisque obtenida por Alvarado (2023).

El siguiente cuadro resume los parámetros obtenidos para cada proceso y en el Cuadro 12 se indican los parámetros de desempeño asociados.

Cuadro 11. Vector de parámetros que producen la mejor función objetivo ponderada para cada uno de los procesos de calibración realizados.

Nombre	GAP 1	GAP 2	Local 1 MC	Local 2 GAP	Local 3 GAP
Runs done	6071	11041	370.000	5412	6074
ReffSeason	0.525	0.541	0.523	0.497	0.528
PERC	2.838	2.727	2.840	2.840	2.840
UZL	85.678	35.963	85.680	85.680	85.680
K0	0.570	0.125	0.570	0.570	0.570
K1	0.195	0.128	0.190	0.190	0.190
K2	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
MAXBAS	1.565	1.145	1.560	1.560	1.560
Cet	1.000	0.865	1.000	1.000	1.000
PCALT	10.000	1.000	10.000	10.000	10.000
TCALT	0.600	0.184	0.600	0.600	0.600
Pelev	342.000	342.000	342.000	342.000	342.000
Telev	342.000	342.000	342.000	342.000	342.000
FC_1	686.699	686.700	627.081	902.932	150.646
LP_1	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
β_1	2.367	2.010	2.370	0.792	1.553
FC_2	686.699	686.700	392.838	902.932	954.924
LP_2	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
β_2	2.367	2.010	2.370	0.042	4.170
FC_3	686.699	686.700	683.546	902.932	996.222
LP_3	0.500	0.500	0.519	0.500	0.500
β_3	2.367	2.010	2.835	3.336	4.170

Cuadro 12. Valores de las métricas de desempeño para cada uno de los procesos de calibración realizados.

Proceso de optimización	NSE	lnNSE	KGE	Función objetivo Ponderada
GAP 1	0.426	0.599	0.649	0.572
GAP 2	0.430	0.616	0.634	0.567
Local 1 MC	0.416	0.589	0.653	0.563
Local 2 GAP	0.447	0.631	0.615	0.570
Local 3 GAP	0.442	0.639	0.646	0.583

Según las métricas de desempeño calculadas para cada proceso, los valores de la FOP están entre 0.56 y 0.583, a partir de los cuales se esperaría continuar con procesos que mejoren el desempeño del modelo y acercar a la unidad esta métrica. Sin embargo, se recalca que la FOP disminuye debido a los bajos valores conseguidos para NSE, donde el mayor número es de 0.447 y se dio en el proceso Local 2 GAP, indicando una subestimación de los caudales picos. Por otro lado, se alcanzaron métricas favorables en logNSE y KGE, con valores máximos de 0.639 (Local 3 GAP) y 0.653 (Local 1 MC), respectivamente, y acercándose a una buena simulación del modelo en cuanto a caudales bajos y la forma y tiempo de respuesta del hidrograma.

Por lo tanto, según los valores de la FOP, se considera que el proceso Local 3 GAP arrojó la mejor combinación de parámetros y por consiguiente, se utilizaron para la validación del modelo.

8 VALIDACIÓN DEL MODELO

Con el propósito de validar el modelo, se ingresó el vector de parámetros obtenidos en la optimización Local 3 GAP para el periodo comprendido entre 1/1/1998 a 31/7/2010. Los gráficos de la Figura 26, Figura 27 y Figura 28 muestran los resultados de la simulación en el periodo de validación para las series de caudal, ETP y agua subterránea, respectivamente. La simulación representó de manera satisfactoria el comportamiento del hidrograma y los tiempos de respuesta. Según los resultados de la simulación indicados en el Cuadro 13, hay una diferencia entre el caudal observado y el simulado de 137mm/año. La eficiencia del modelo calculada a partir de la NSE aumenta a 0.600, indicando que los caudales altos se simulan mejor para el periodo de validación. Sin embargo, la eficiencia para el periodo de época seca disminuye con respecto a la eficiencia calculada en la calibración, cuyo valor máximo es de 0.528 y para la validación tiene un valor de 0.374. Se determinó el valor de KGE resultado de 0.673 y la FOP aumentó a 0.64 con respecto a los resultados de la calibración.

Cuadro 13. Resumen de resultados del modelo HBV_Light para la simulación de validación.

Nombre Simulación	Validación
Balance hídrico (mm/año)	
Sumatoria Qsim	948
Sumatoria Qobs	1086
Sumatoria Precipitación	2051
Sumatoria ETR	1076
Sumatoria ETP	1522
Contribución Q0	0.043
Contribución Q1	0.516
Contribución Q2	0.441
Bondad de ajuste	
Coefficiente de determinación	0.605
Eficiencia del modelo	0.600
Eficiencia para logQ	0.638
Diferencia media	137.000
Eficiencia para época seca	0.374
KGE	0.673

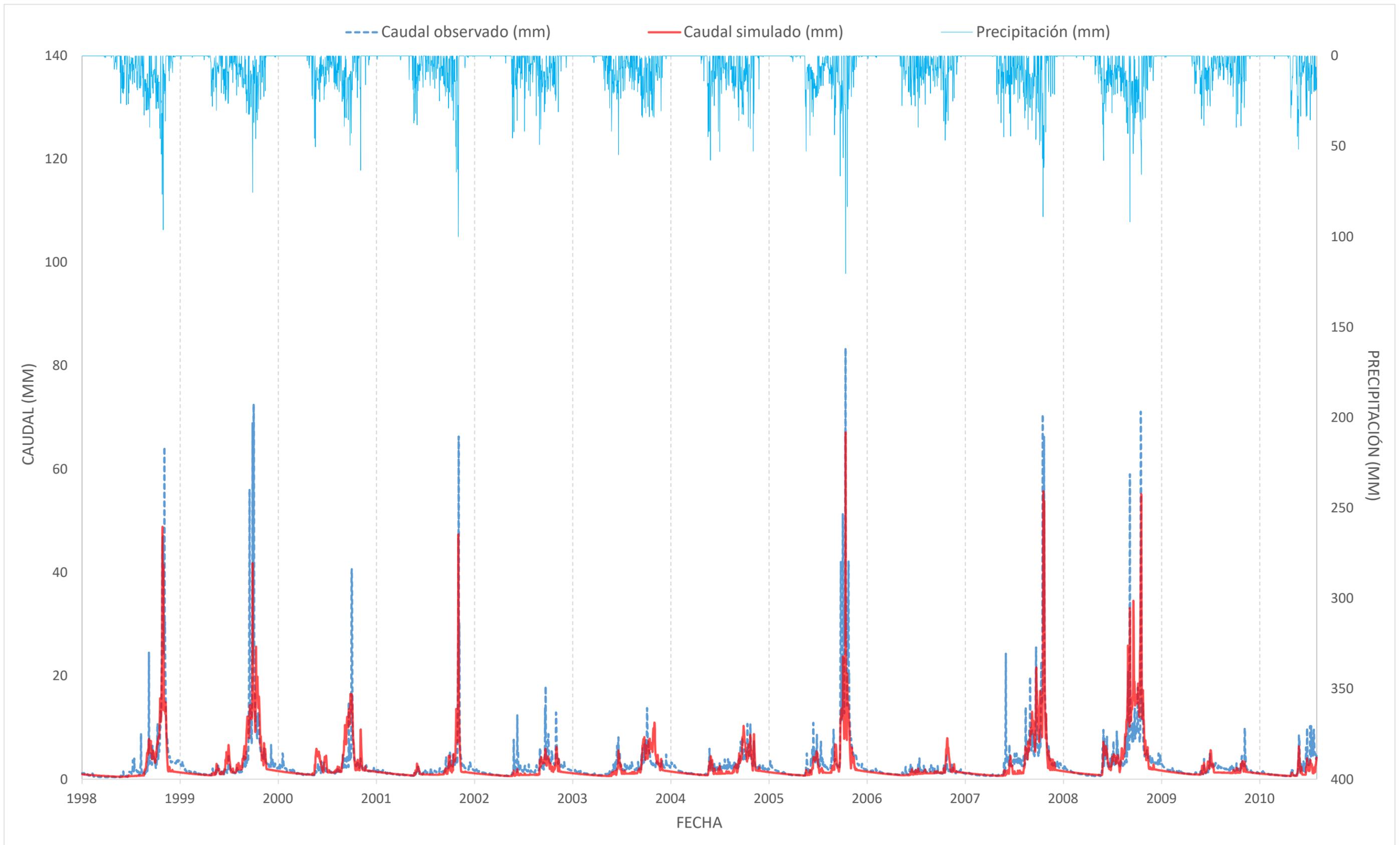


Figura 26. Resultados obtenidos de la serie de caudal y precipitación para la simulación de validación del modelo.

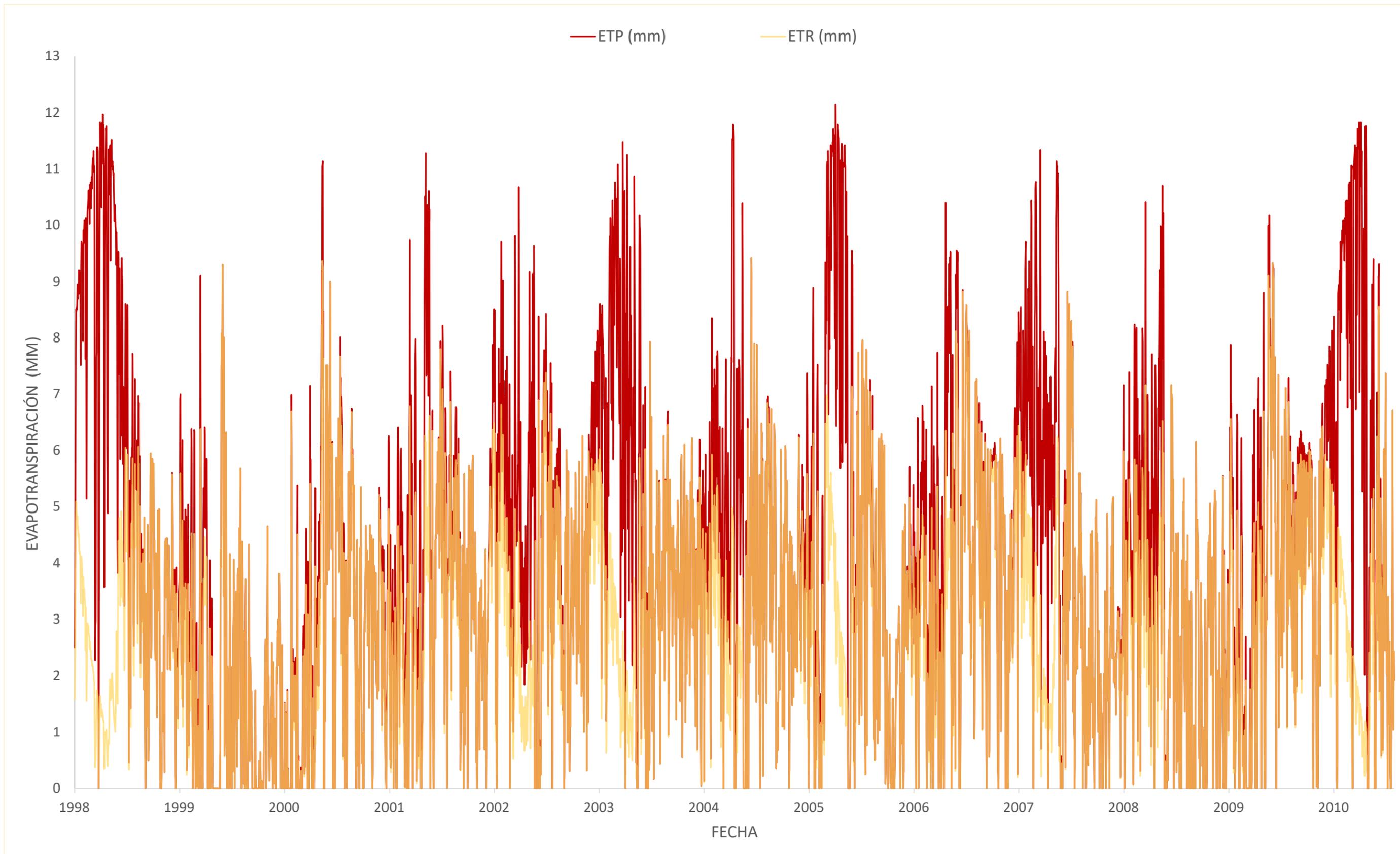


Figura 27. Resultados obtenidos para la evapotranspiración real y potencial para la simulación de validación del modelo.

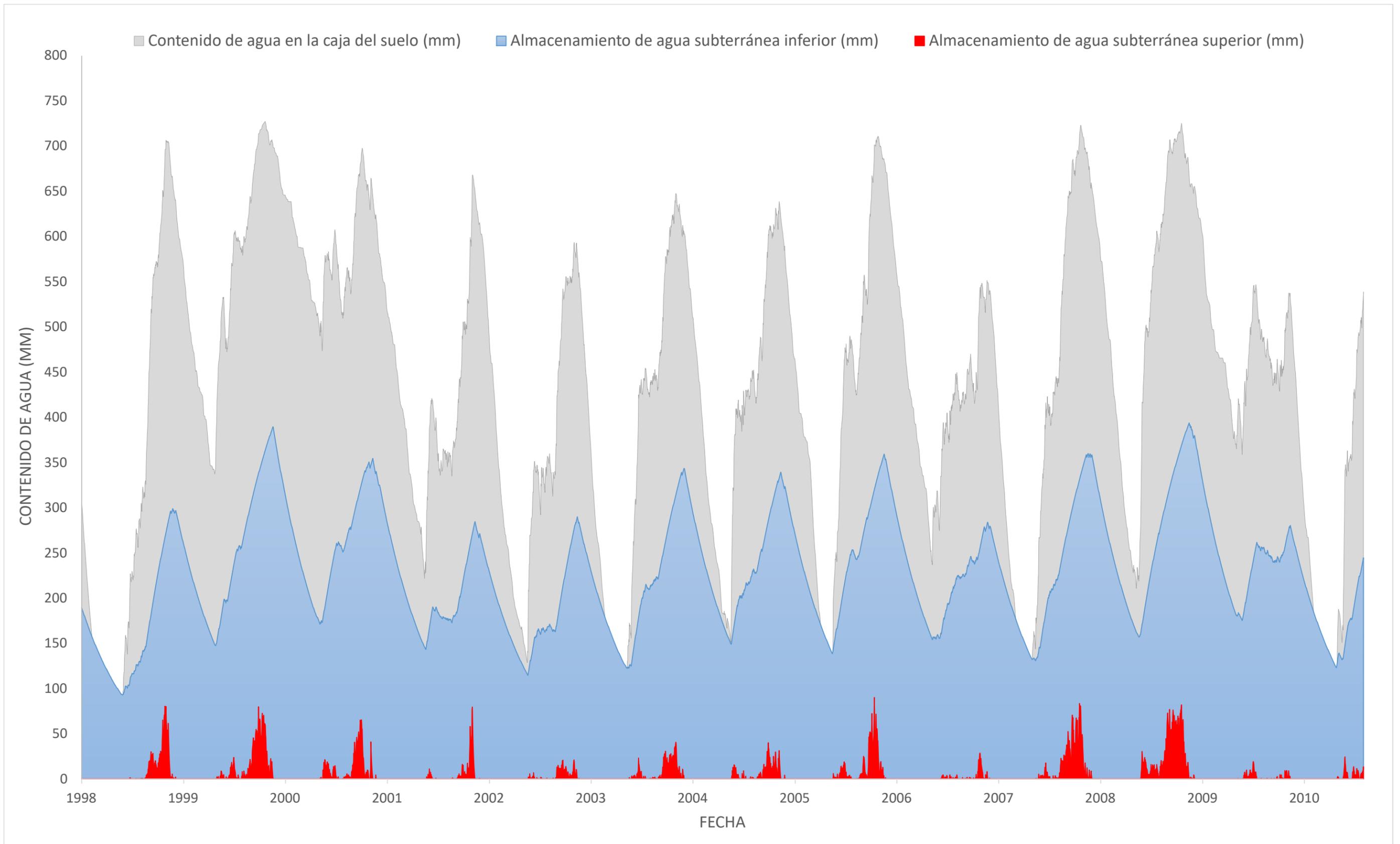


Figura 28. Resultados obtenidos para el nivel de agua subterránea en cada subnivel para la simulación de validación del modelo.

9 SIMULACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SARDINAL

9.1 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Para efectuar la modelación hidrológica en la subcuenca del río Sardinal, se generaron las entradas requeridas con los datos mencionados en el apartado 5.1.1, ingresando el caudal del modelo HYPE como caudal observado para realizar una comparación entre los resultados simulados a partir de la calibración de la cuenca alta del río Tempisque y los resultados del modelo HYPE aplicado en Costa Rica.

Se crearon zonas de vegetación en el área de elevación de toda la cuenca, conformando tres zonas: una de bosque, otra de cultivos y una última de pastos. La zona de cultivos corresponde a un porcentaje muy bajo de la cuenca, de 2%, siendo las zonas de bosque y pastos las de mayor cobertura con porcentajes de 51 y 47%, respectivamente. El siguiente cuadro muestra la distribución de las zonas.

Cuadro 14. Distribución de zonas de elevación-vegetación en la configuración del modelo para la subcuenca del río Sardinal.

Rango elevación	Cobertura	Área (m ²)	Fracción de área
0-540	Bosque	41062588.62	0.51
	Cultivos	1871304.37	0.02
	Pasto	37906791.46	0.47
	Total	80840684.45	1.00

9.1.1 Parámetros del modelo

Se ingresaron al modelo los parámetros de entrada calibrados para la cuenca alta del río Tempisque.

Cuadro 15. Vector de parámetros para la implementación del modelo HBV-Light en la subcuenca del río Sardinal.

Nombre	Unidades	Valor
PERC	mm/ Δ t	2.840
UZL	mm	85.680
K0	1/ Δ t	0.570
K1	1/ Δ t	0.190
K2	1/ Δ t	0.005
MAXBAS	Δ t	1.560
Cet	1/ $^{\circ}$ C	1.000
PCALT	%/100m	10.000
TCALT	$^{\circ}$ C/100m	0.600
Pelev	m	158.600
Telev	m	158.600
FC_1	mm	150.646

Nombre	Unidades	Valor
LP_1	-	0.500
β _1	-	1.553
FC_2	mm	954.924
LP_2	-	0.500
β _2	-	4.170
FC_3	mm	996.222
LP_3	-	0.500
β _3	-	4.170

9.1.2 Simulación de la cuenca

Se ejecutó el modelo en la subcuenca del río Sardinal, obteniendo los resultados mostrados en el Cuadro 16, y la Figura 29, Figura 30 y Figura 31.

Con respecto al modelo hidrológico HYPE, hay una diferencia de 368mm/año entre el caudal observado y el simulado. Se observa un buen ajuste considerando el coeficiente de determinación r^2 , el cual tiene un valor de 0.728 y la eficiencia del modelo calculada a partir del NSE es 0.597, valor mayor que para la calibración del modelo en la cuenca alta del río Tempisque y similar al periodo de validación, donde se obtuvo una NSE de 0.6. La métrica de desempeño lnNSE tiene un valor de 0.442, lo cual es menor a lo obtenido para la calibración y validación del modelo, de 0.638 y 0.639, respectivamente. La eficiencia para la época seca es menor a 0, lo que implica que no simula adecuadamente las condiciones para este periodo, con respecto a los resultados del modelo hidrológico HYPE. En el Anexo 14.1 se puede apreciar con más detalle la simulación por año. Los caudales bajos no se representan de forma apropiada, ya que hay periodos en los que no se observa la forma del hidrograma, tal como entre los meses de mayo y junio de 1985 o entre mayo y agosto de 1990, mientras que hay años en los cuales se puede apreciar un buen desempeño de la simulación en cuanto a comportamiento del hidrograma en forma y periodo; sin embargo, existe una subestimación de los picos, por ejemplo, los resultados para 1988, 1995, 1996 y 1999. Se destaca en esta línea que los años en los que los caudales máximos son menores a 15mm/día, no hay una buena representación del comportamiento del hidrograma.

Cuadro 16. Resumen de resultados del modelo HBV_Light para la simulación de la subcuenca del río Sardinal.

Nombre Simulación	Sardinal
Balance hídrico (mm/año)	
Sumatoria Qsim	574
Sumatoria Qobs	941
Sumatoria Precipitación	1792
Sumatoria ETR	897
Sumatoria ETP	1620
Contribución Q0	0.015
Contribución Q1	0.416
Contribución Q2	0.569
Bondad de ajuste	

Coeficiente de determinación	0.728
Eficiencia del modelo	0.597
Eficiencia para logQ	0.442
Diferencia media	368.000
Eficiencia para época seca	-1.779

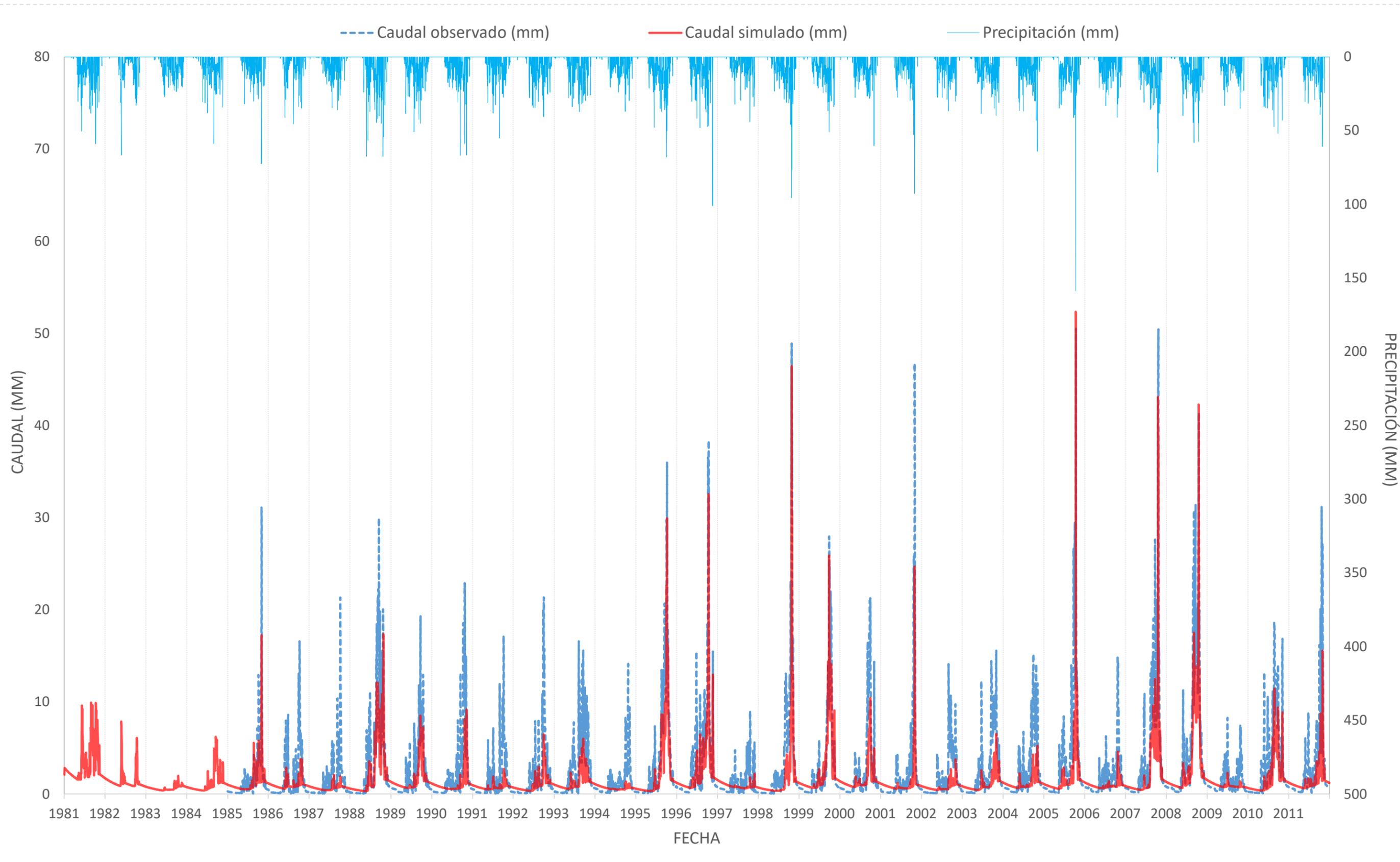


Figura 29. Resultados obtenidos de la serie de caudal y precipitación para la simulación en la subcuenca del río Sardinal.

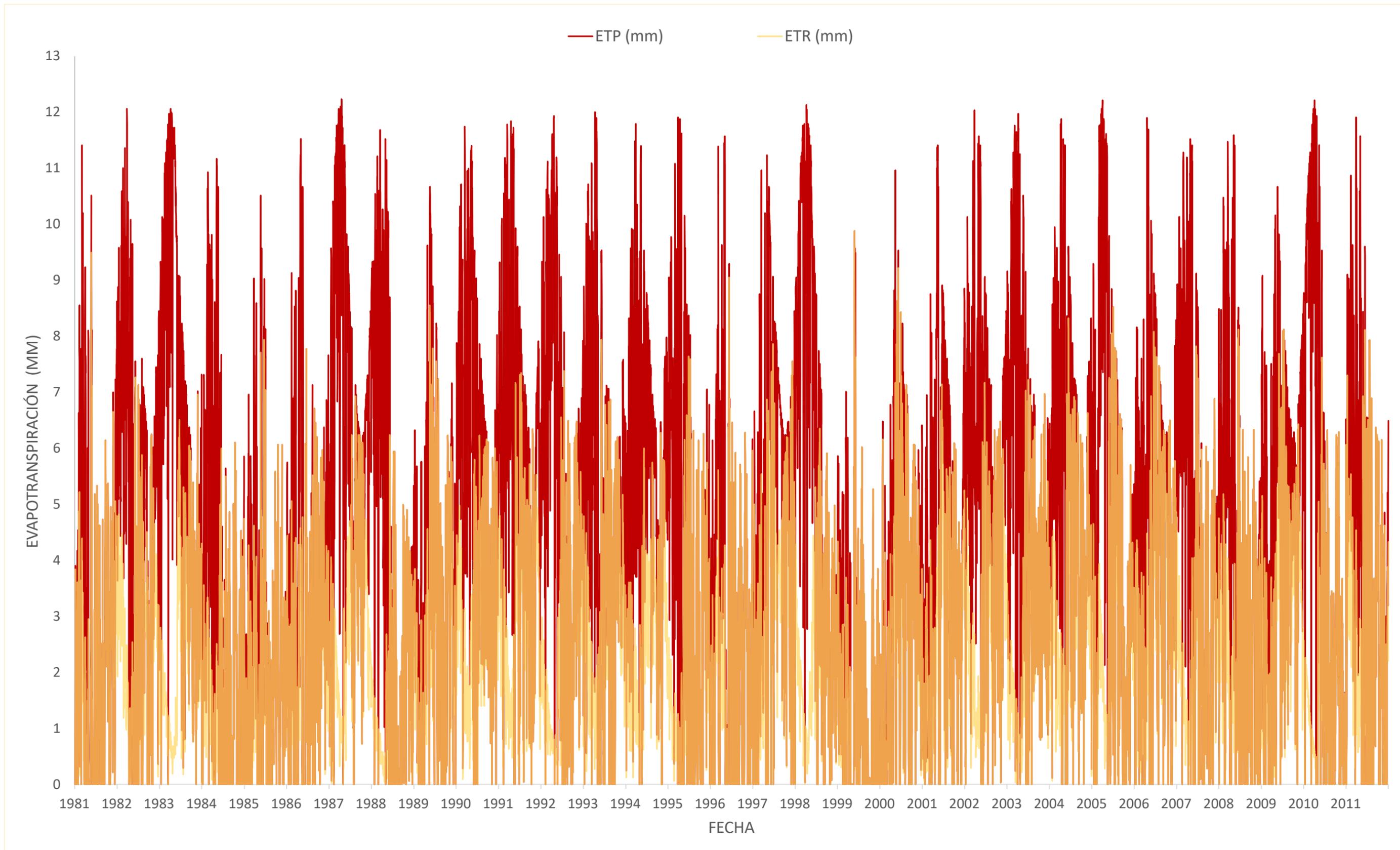


Figura 30. Resultados obtenidos para la evapotranspiración real y potencial para la simulación en la subcuenca del río Sardinal.

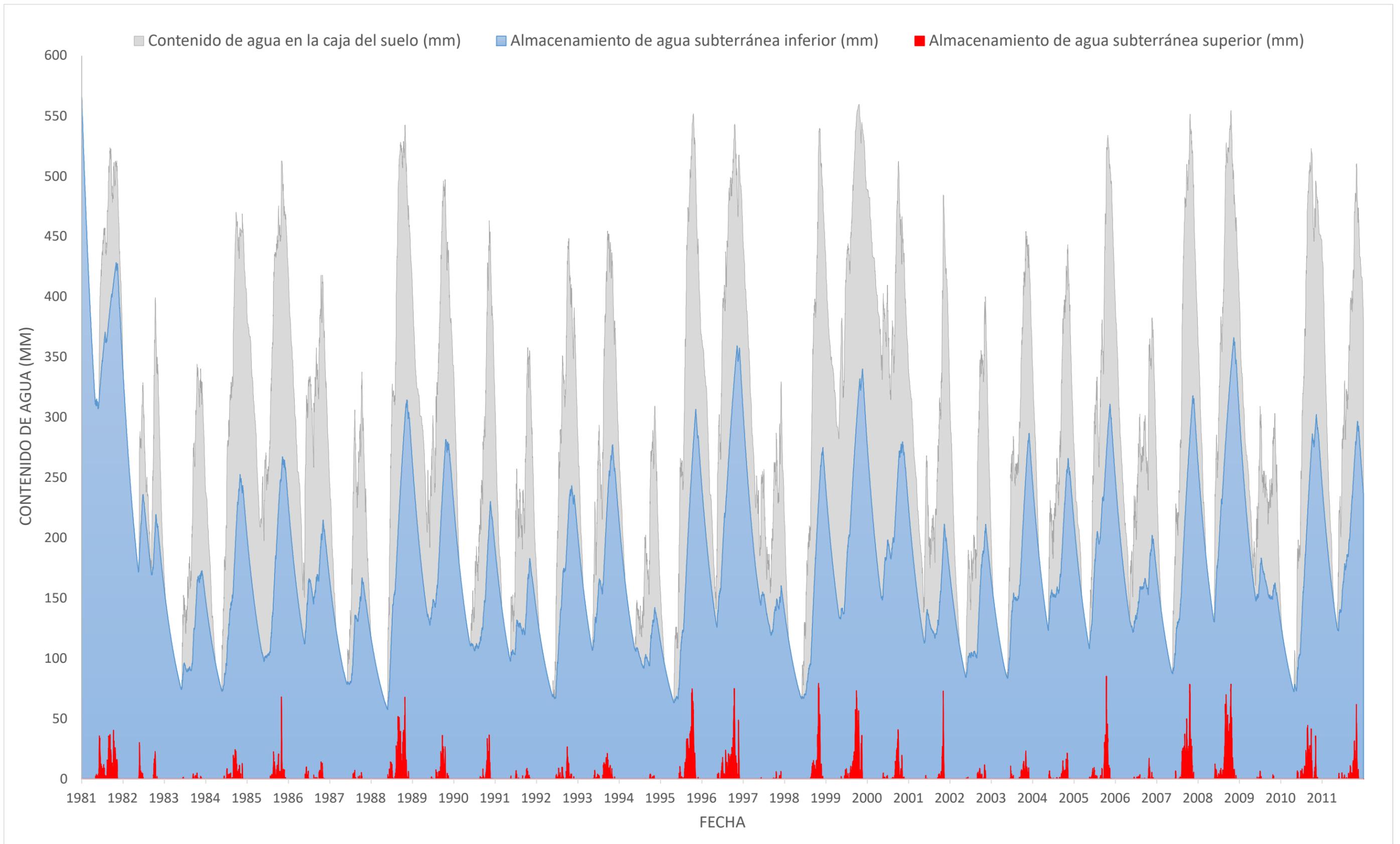


Figura 31. Resultados obtenidos para el nivel de agua subterránea en cada subnivel para simulación en la subcuenca del río Sardinal.

10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se utilizaron datos de entrada al modelo HBV-Light de diferentes fuentes y características, tal como los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración que son productos satelitales; la serie de caudales de la cuenca alta del río Tempisque corresponde a datos observados en sitio y también se emplearon como referencia los caudales simulados por Arciniega-Esparza et al. (2022) mediante el modelo HYPE para la comparación de resultados en la subcuenca del río Sardinal.

Los datos de precipitación estimados satelitalmente están sujetos a errores sistemáticos que generan incertidumbres en las simulaciones hidrológicas (Goshime et al., 2019; Grillakis et al., 2018; InfanteCorona et al., 2014; Wörner et al., 2019 citados por Arciniega-Esparza et al., 2022), por tanto, Arciniega-Esparza et al. (2022) presentan una corrección a partir de estaciones en sitio y estaciones virtuales mediante la aplicación de dos factores de corrección, los cuales se basan en la precipitación medida en sitio, caudales observados y ETR. También se aplicaron correcciones a la ETP y la temperatura según la elevación. Sin embargo, en dicho estudio determinan que el producto satelital empleado para la precipitación no captura eventos extremos, lo cual repercute en la simulación de los caudales pico. Además, la corrección realizada tanto sobre la precipitación como sobre la temperatura y evapotranspiración genera mejores desempeños a nivel mensual, no así a nivel diario, por lo que debe efectuarse una metodología más compleja en este caso, lo que permite identificar una fuente de incertidumbre que influye en la subestimación de los picos de caudal.

La descripción estadística de datos muestra poca variabilidad en las series de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial para ambas cuencas, condición esperable debido a la similitud en sus características geográficas y cercanía. Es una zona con bajos niveles de precipitación y temperaturas elevadas. La serie de caudal procedente de la estación Guardia presenta una alta desviación del promedio y amplio rango de valores, con un extremo de $903\text{m}^3/\text{s}$ de un evento en octubre del 2005, que también se ve reflejado en los valores máximos de las series de precipitación satelital, así como en los resultados de la simulación en la subcuenca del río Sardinal, tanto con el modelo HYPE como con HBV-Light. En la serie de los caudales simulada con el modelo HYPE se identifica que la subcuenca del río Sardinal presenta valores más bajos de caudal, congruentes con las características de la red hídrica y geomorfología de la cuenca. Se destaca que los valores promedio son la décima parte de los valores de la cuenca alta del río Tempisque.

Según Moriasi et al. (2015), la ventaja de la escogencia de las estadísticas de desempeño es que a partir de la NSE se puede determinar el ajuste del modelo a los patrones del caudal de respuesta en simulaciones continuas de largo plazo; no obstante, es sensible a los valores extremos, por lo que si los datos presentan en su distribución tanto picos como valores bajos, tal como las cuencas del río Tempisque y río Sardinal, se recomienda que se realice una separación de los datos para evitar el error de la simulación de valores bajos. En contraposición, este estudio incluye el uso de la estadística $\ln\text{NSE}$ para medir el desempeño del modelo en caudales bajos. Además, se incluye la métrica KGE que evalúa el ajuste de las simulaciones al periodo, forma y distribución del hidrograma.

Los parámetros del modelo HBV-Light son parámetros de los procesos, lo que implica que no se pueden obtener directamente, ya que no son medibles, es decir, deben ser calibrados (Bhattarai et al., 2018). Por lo tanto, se tomaron los rangos sugeridos por Beck et al. (2016) para una primera

aproximación de los parámetros del modelo utilizando el muestreo de Monte Carlo. Los parámetros arrojaron un valor inicial de KGE satisfactorio de 0.64 y valores más bajos de NSE y lnNSE de 0.36 y 0.56, lo que indica un buen ajuste a los caudales bajos y al comportamiento del hidrograma, manteniendo los periodos del flujo; sin embargo, subestima los picos registrados, evidenciado en la magnitud deficiente de NSE, según los criterios indicados por Nonki et al. (2021).

El análisis de sensibilidad complementa la calibración al proveer información sobre cómo se pueden variar ciertos parámetros para cambiar las métricas del modelo. Se enfoca en determinar en qué proporción cada parámetro es influyente en la incertidumbre de los resultados del modelo (Pianosi et al., 2016). Mediante el RSA se determinaron parámetros más influyentes en el modelo relacionados con las diferentes zonas de vegetación configuradas para las simulaciones en la cuenca alta del río Tempisque y ejecutando tres procesos de optimización con diferentes características en la variación de estos parámetros, se logró aumentar el desempeño del modelo basado en la FOP, la cual pondera la NSE, lnNSE y KGE en una razón de 0.3, 0.3 y 0.4, respectivamente. La última optimización ejecutada presentó métricas con valores de 0.442 para NSE, 0.639 para lnNSE, 0.646 de KGE y 0.583 para la FOP. El valor de NSE continúa siendo insatisfactorio; sin embargo, los parámetros KGE, lnNSE y la FOP son satisfactorios.

La configuración utilizada para el modelo es la configuración estándar con división por zonas de elevación y vegetación. Existen incertidumbres asociadas a la estructura del modelo que pueden ser analizadas probando la variación en los resultados que generan diferentes configuraciones (Seibert & Vis, 2012), así como la evaluación de la incertidumbre de los parámetros se puede determinar analizando la variabilidad en las salidas de las diferentes procesos de optimización. Según el procedimiento realizado, las diferentes modelaciones muestran mayor variabilidad en los valores de FC, LP y β en cada proceso, así como en UZL. Sin embargo, se considera que para realizar un análisis completo de las incertidumbres en los parámetros debe evaluarse una muestra más amplia que permita obtener estadísticas del comportamiento de cada uno.

Los periodos de calibración y validación presentan diferencias en sus estadísticas, ya que el periodo de validación incluye caudales más elevados en promedio y presenta un evento extremo importante, por lo que genera incertidumbre en el modelo realizar modelaciones en periodos con caudales mayores que los disponibles en el periodo de la calibración (Seibert, 1997).

En la modelación aplicada en la subcuenca del río Sardinal se observa un buen ajuste a los caudales estimados con el modelo hidrológico HYPE según el coeficiente de determinación r^2 , el cual tiene un valor de 0.728 y la eficiencia del modelo calculada a partir del NSE es 0.597, valor mayor que para la calibración del modelo en la cuenca alta del río Tempisque y similar al periodo de validación, donde se obtuvo una NSE de 0.6. La métrica lnNSE tiene un valor de 0.442, lo cual es menor a lo obtenido para la calibración y validación del modelo, de 0.638 y 0.639, respectivamente. En esta cuenca se espera conseguir mejores métricas del lnNSE con el fin de validar los caudales bajos; sin embargo, se obtuvieron buenos resultados en la simulación de picos. En el análisis detallado de los gráficos anuales se infiere que a pesar de que la comparación no se realiza con datos observados en sitio, debe mejorarse la simulación para los caudales bajos. Para esto, se puede considerar en futuras configuraciones del modelo, la inclusión de información de niveles de aguas subterráneas y evaluar el modelo con el fin de determinar si mejoran las métricas.

11 CONCLUSIONES

Se ejecutó el modelo HBV-Light en las cuencas del río Tempisque y río Sardinal. Para su implementación se requieren pocos datos de entrada y un procesamiento bajo de la información, que también implica un bajo costo computacional, a diferencia de otros modelos distribuidos. El software creado para el modelo es amigable con el usuario y presenta una completa documentación de apoyo para aprender sobre su uso y capacidades. Para este modelo en específico, a pesar de que HBV-Light tiene el potencial de ejecutarse de manera semidistribuida, es un modelo agregado debido a que la cuenca alta del río Tempisque se manejó como una sola cuenca dado que sólo se cuenta con un punto de registro de caudales, al igual que la subcuenca del río Sardinal.

Existen muchos tipos y metodologías para realizar análisis de sensibilidad, la literatura al respecto es amplia y se puede aprender sobre su implementación de múltiples casos de estudio. Para este modelo se utilizó el método de Análisis de Sensibilidad Regionalizado, con el cual, de una manera visual e inmediata, se efectúa una valoración de los parámetros más influyentes en los resultados del modelo hidrológico. Hay dos formas de implementarlo: seleccionando un criterio para la división de los datos entre conductuales y no conductuales y, tal como se implementó en este proyecto, realizando una división de los datos en segmentos de igual magnitud. La primera ofrece un análisis cuantitativo, al determinar la distancia de separación entre las curvas mediante el cálculo de la estadística de Kolmogórov-Smirnov (Pianosi et al., 2016) y la segunda es únicamente cualitativa.

Con ayuda del análisis de sensibilidad se alcanzó mejorar notablemente las métricas de desempeño del modelo (de NSE 0.36, lnNSE 0.56 y KGE 0.64 a 0.44, 0.64 y 0.65, respectivamente), utilizando la optimización de algoritmo genético para variar los parámetros que presentaron la mayor influencia según el análisis, que en este caso fueron los asociados a las zonas de vegetación: FC, LP y β ; específicamente para la primera y tercera zona, correspondientes a una cobertura de bosques y pasto, respectivamente, debido a la fracción de área representada para cada una de 0.31 y 0.65 del área total de la cuenca.

Los valores de los parámetros de desempeño pueden tener diferentes rangos de evaluación según las condiciones y objetivos de la modelación hidrológica (Moriasi et al. 2015; Knoben et al., 2019). En este trabajo se evalúa el modelo con base en una función objetivo ponderada a partir de NSE, lnNSE y KGE. La última tiene una mayor asignación de peso debido a que es un indicador de tres elementos esenciales en la simulación: forma, periodo y distribución del hidrograma. A partir de los valores obtenidos para la validación del modelo en la cuenca alta del río Tempisque, se considera que el modelo simula satisfactoriamente los caudales, ya que se obtuvo un valor de 0.64 para la FOP y valores de 0.60, 0.64 y 0.67 para las métricas NSE, lnNSE y KGE, respectivamente.

Los valores de eficiencia obtenidos para la subcuenca del río Sardinal con respecto a los caudales simulados en el modelo HYPE, son válidos para la determinación del comportamiento general del hidrograma y la simulación de picos. Sin embargo, la simulación de los caudales bajos es algo deficiente y se considera que debe mejorarse a partir de recopilación de información en campo para dar con un vector de parámetros que logre simular de una mejor manera las condiciones en la subcuenca del río Sardinal.

12 RECOMENDACIONES

El análisis de sensibilidad se realizó mediante un método sencillo y flexible, que presenta de manera gráfica una forma inmediata de obtener información relevante sobre los parámetros; sin embargo, se recomienda realizar la división de la muestra de cada parámetro según las categorías conductual y no conductual, basada tanto en la métrica KGE como en NSE y InNSE para determinar variaciones en los resultados y generar un análisis más profundo del comportamiento de los parámetros. De igual manera, tal como sugieren Wagener y Pianosi (2019), con el fin de comprender el impacto de las suposiciones realizadas a partir de los resultados del SA, se recomienda comparar varias metodologías para la estimación de la sensibilidad, incorporando análisis cuantitativo, ya que pueden arrojar distintos resultados.

Como parte del proceso de calibración se recomienda realizar múltiples experimentos en fomento del aprendizaje y aumento de experiencia en este campo, mediante al análisis de los resultados de las simulaciones y métricas de desempeño asociadas de las variaciones de los parámetros, realizando cambios graduales. Por ejemplo, iniciar variando un único parámetro influyente según el SA, realizando modificaciones en los pesos de las zonas de vegetación y estudiando la variabilidad del rango de valores del parámetro calibrado.

Es interesante realizar un análisis estadístico para conocer la distribución de los parámetros en las 100 simulaciones con el mejor desempeño de cada proceso de calibración, con el fin de identificar si corresponden a valores similares o hay cierta dispersión y dónde en cada rango se ubican los valores seleccionados por conseguir la mejor métrica de desempeño, tal como se realizó en Arciniega-Esparza et al. (2022).

Los productos satelitales de forzamientos, a pesar de que sean una muy buena fuente de información donde no se cuenta con registros en sitio, deben acompañarse de correcciones que se basan en información generada localmente, por lo tanto se destaca la importancia de la instrumentación meteorológica de las cuencas para contar con información clave en la gestión del recurso hídrico a medio y largo plazo, mediante la generación de registros que sean insumos para realizar estudios como el presente y venideros con datos de calidad que permitan tener mayor certeza para la toma de decisiones en materia de gestión de cuencas.

Se puede alimentar el modelo en la subcuenca del río Sardinal con información de aguas subterráneas, ya que la Dirección de Aguas mantiene un registro de los niveles de pozos, con lo cual se elaboran estudios hidrogeológicos para el monitoreo del recurso de aguas subterráneas en el acuífero Sardinal.

La generación de información hidrológica local es de suma relevancia debido a que constituye un insumo directo para la gestión del recurso hídrico, no sólo para abastecimiento de agua potable, si no para la conservación, monitoreo, estudio y protección de cuerpos de agua superficiales. Contar con datos de caudales medidos en campo es una entrada muy valiosa para la elaboración de modelos hidrológicos y permitiría realizar una calibración detallada en cuencas a nivel local. Por tanto, se reitera la necesidad del inicio del monitoreo de los cuerpos de agua superficiales en la subcuenca del río Sardinal y en subcuencas y microcuencas, con el fin de apoyar este tipo de estudios y futuros estudios que apoyen la gestión en la adaptación al cambio climático.

13 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarado, P. (2018). *Hidrogeología de la margen izquierda del río Tempisque, sector central del cantón de Liberia, Guanacaste*. Universidad de Costa Rica.

Araya, A. (2021). *Model-based analysis of Nature-based Solutions impacts on spatio-temporal hydrological extremes*. IHE Delft, Technische Universität Dresden, Universitat Politècnica de Catalunya, Univerza v Ljubljani.

Arciniega-Esparza, S., & Birkel, C. (2020). *Hydrological simulations for Costa Rica from 1985 to 2019 using HYPE CR 1.0* [dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4029572>

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>

Beck, H.E., van Dijk, A. I. J. M., de Roo, A., Miralles, D.G., McVicar, T.R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L.A. (s/f). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. 2016, 52, 3599–3622. <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>

Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Soci, C., Villaume, S., Bidlot, J.-R., Haimberger, L., Woollen, J., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186–4227. <https://doi.org/10.1002/qj.4174>

Beven, K. J. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2nd ed). Wiley-Blackwell.

Bhattarai, S., Zhou, Y., Shakya, N. M., & Zhao, C. (2018). Hydrological Modelling and Climate Change Impact Assessment Using HBV Light Model: A Case Study of Narayani River Basin, Nepal. *Nature Environment and Pollution Technology*, 17(3).

Calvo, J., Jackson, J., Guzman, I., Calvo-Obando, A. J., Jiménez-Rodríguez, C., Carvajal-Vanegas, D., & Arias-Rodríguez, O. (2013). *Valoración y Planificación del Recurso Hídrico en la cuenca alta y canal principal del río Tempisque*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3137>

Camino, M. A., Bó, M. J., & Cionchi, J. L. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Universidad Nacional del Sur Argentina*, 27(1), 19.

Campolongo, F., Saltelli, A., & Cariboni, J. (2011). From screening to quantitative sensitivity analysis. A unified approach. *Computer Physics Communications*, 182(4), 978–988. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2010.12.039>

Carvajal Vanegas, D. (2017). *Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del Río Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8705>

D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Devak, M., & Dhanya, C. T. (2017). Sensitivity analysis of hydrological models: Review and way forward. *Journal of Water and Climate Change*, 8(4), 557–575. <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.149>

Faustino, J. (1996). *Gestión Ambiental para el Manejo de Cuencas Municipales*. Área de Capacitación. Curso corto. Honduras. 136p.

Fernández, R. (2010). *DIAGNÓSTICO DEL USO ACTUAL DEL SUELO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO TEMPISQUE*. Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC).

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), Article 1. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Gan, Y., Duan, Q., Gong, W., Tong, C., Sun, Y., Chu, W., Ye, A., Miao, C., & Di, Z. (2014). A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. *Environmental Modelling & Software*, 51, 269–285. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.031>

Gobierno de Costa Rica. (2018). *POLÍTICA NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE COSTA RICA 2018-2030*. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/01/Politica-Nacional-de-Adaptacion-al-Cambio-Climatico-Costa-Rica-2018-2030.pdf>

González, J., Guerra, F. (2002) Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza* [en línea]. 2002, 7(1-2), 88-108 [fecha de Consulta 16 de septiembre de 2022]. ISSN: 1316-6077. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36070208>

Government of New South Wales (NSW) Department of Industry. (2018). Determining stream order. *Fact sheet*, INT18/100855, 2.

Guerra, F., & González, J. (2002). CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA BERMEJA, SAN CRISTÓBAL, ESTADO TÁCHIRA, VENEZUELA. *Geoenseñanza*, 7–2002(1–2), 88–108.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Guzman, I. (2014). Recurso Hídrico Superficial en la Cuenca del río Tempisque, Costa Rica: Escenarios de Disponibilidad y Demanda. *Tecnología en Marcha*, 27(Extra 5), 9.

Hadjimichael, A. (2020, marzo 23). Determining the appropriate number of samples for a sensitivity analysis. *Water Programming: A Collaborative Research Blog*. <https://waterprogramming.wordpress.com/2020/03/23/determining-the-appropriate-number-of-samples-for-a-sensitivity-analysis/>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2023): ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), [DOI: 10.24381/cds.adbb2d47](https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47)

HORTON, R. E. (1945). EROSIONAL DEVELOPMENT OF STREAMS AND THEIR DRAINAGE BASINS; HYDROPHYSICAL APPROACH TO QUANTITATIVE MORPHOLOGY. *GSA Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)

Instituto de Desarrollo Rural (Inder). (2016). *Caracterización del Territorio Santa Cruz—Carrillo*.

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL. (2000). *Primera Comunicación Nacional Ante La Convención Marco De Cambio Climático* (p. 177). GOBIERNO DE COSTA RICA MINISTERIO DEL AMBIENTE Y ENERGÍA. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/cornc1.pdf>

Iooss, B., & Lemaître, P. (2015). A Review on Global Sensitivity Analysis Methods. En G. Dellino & C. Meloni (Eds.), *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems* (Vol. 59, pp. 101–122). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7547-8_5

Jara, L. (2022). En primer semestre del año, Costa Rica recibió 1.2 millones de turistas. *Instituto Costarricense de Turismo | ICT*. <https://www.ict.go.cr/es/noticias-destacadas/2070-en-primer-semestre-del-ano,-costa-rica-recibio-1-2-millones-de-turistas.html>

Käser, D., Seibert, J., & Vis, M. (2012). HBV light—A user-friendly catchment-runoff-model software. 14.

Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>

Lux Cardona, B. (2015). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala*, 8.

Madrigal, J. E. (s/f). *Los efectos de las amenazas naturales y antropogénicas en las cuencas hidrográficas de Costa Rica*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias.

Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). (2008). Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. D., & Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Nonki, R. M., Lenouo, A., Tshimanga, R. M., Donfack, F. C., & Tchawoua, C. (2021). Performance assessment and uncertainty prediction of a daily time-step HBV-Light rainfall-runoff model for the Upper Benue River Basin, Northern Cameroon. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100849. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100849>

Ortiz-Malavasi, E. (2014). *Atlas de Costa Rica 2014* [dataset]. Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6749>

Pascual, J. A., & Díaz, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelación hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Instituto IMDEA Agua.

Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>

Quesada, L. E. (2019). *Respuesta de la hidrología superficial de la cuenca del río Tempisque a la variabilidad climática y cambio de cobertura de la tierra* [Universidad de Costa Rica]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22256.20485>

Rojas, N. (2011). *Estudio de las Cuencas Hidrográficas de Costa Rica* (p. 728). Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), Instituto Meteorológico Nacional (IMN). <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/EstudioCuencas/EstudioCuencas-cuencaRioTempisque.pdf>

Saltelli, A. (Ed.). (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. John Wiley.

Seibert, J. (1997). Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model. *Nordic Hydrology*, 28, 247–262. <https://doi.org/10.2166/nh.1998.15>

Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 215–224. <https://doi.org/10.5194/hess-4-215-2000>

Seibert, J. (2005). *HBV light version 2 User's Manual*. Stockholm University Department of Physical Geography and Quaternary Geology.

Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>

Solis, H., Oreamuno, R., Murillo, W., & Chacón, J. J. (1993). *Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en Centroamérica* (Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales, p. 76) [Publicaciones del Proyecto Renarm/Manejo de Cuencas]. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, 523, 739–757. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>

Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI). (s/f). *HypeWeb Scientific estimates of past, present and future Water Resources*. HypeWeb. Recuperado el 29 de septiembre de 2022, de <https://hypeweb.smhi.se/>

Tang, T., Reed, P., Wagener, T., & Van Werkhoven, K. (2006). Comparing Sensitivity Analysis Methods to Advance Lumped Watershed Model Identification and Evaluation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11. <https://doi.org/10.5194/hess-11-793-2007>

Universidad de Costa Rica. (2022). *OACG-Hidrologia* [Investigación]. Observatorio del Agua y Cambio Global. Recuperado el 12 de septiembre de 2022, de <https://oacg-hydrology-costarica.herokuapp.com/>

Wagener, T., Boyle, D., Lees, M., Wheater, H., Gupta, H., & Sorooshian, S. (2001). A framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5. <https://doi.org/10.5194/hess-5-13-2001>

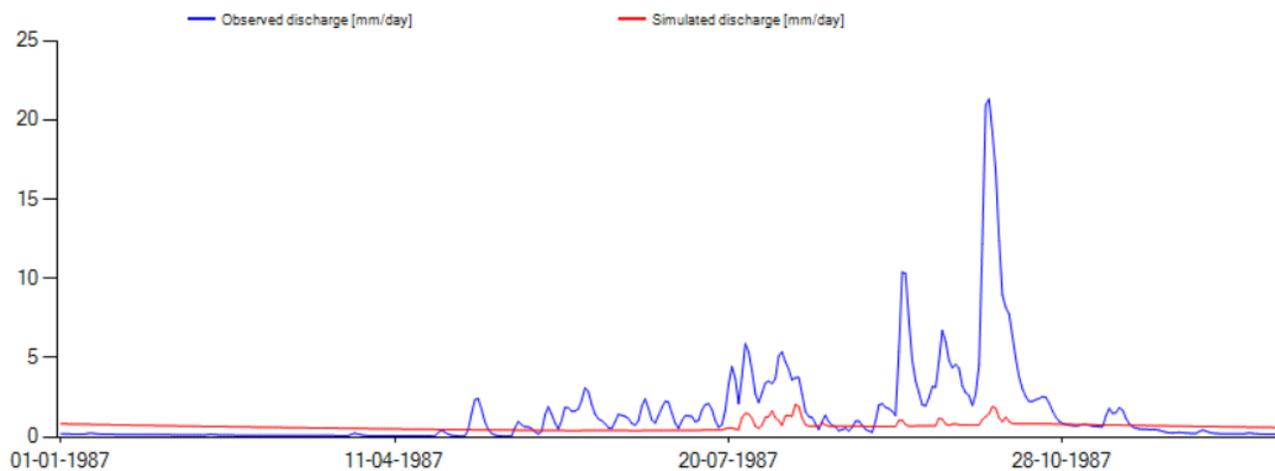
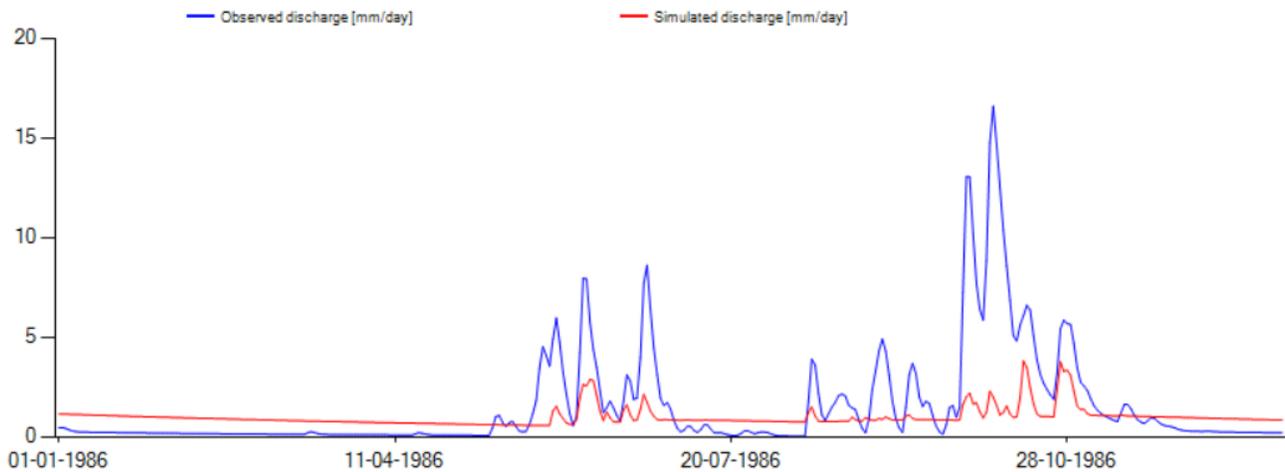
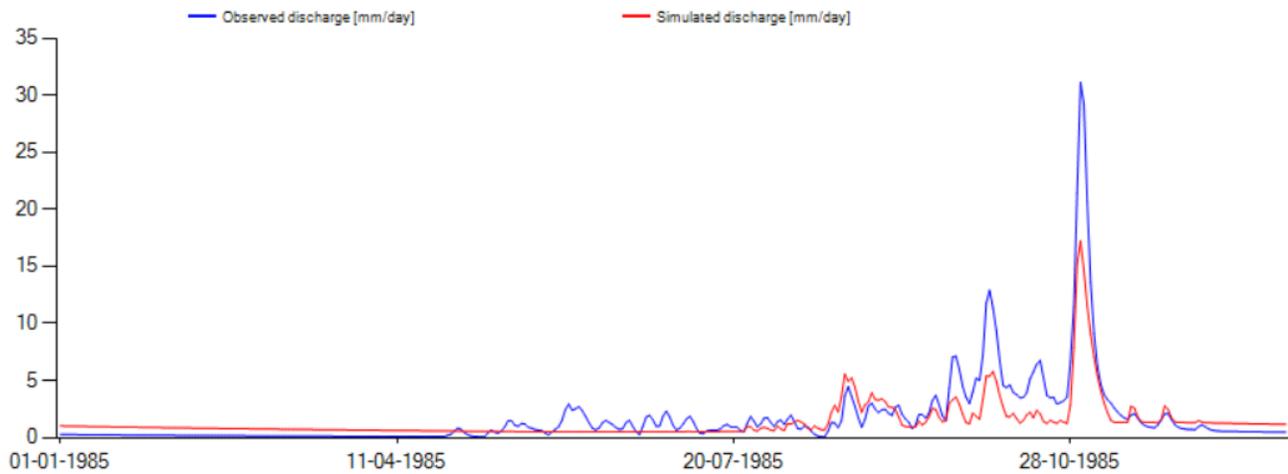
Wagener, T., & Pianosi, F. (2019). What has Global Sensitivity Analysis ever done for us? A systematic review to support scientific advancement and to inform policy-making in earth system modelling. *Earth-Science Reviews*, 194, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.006>

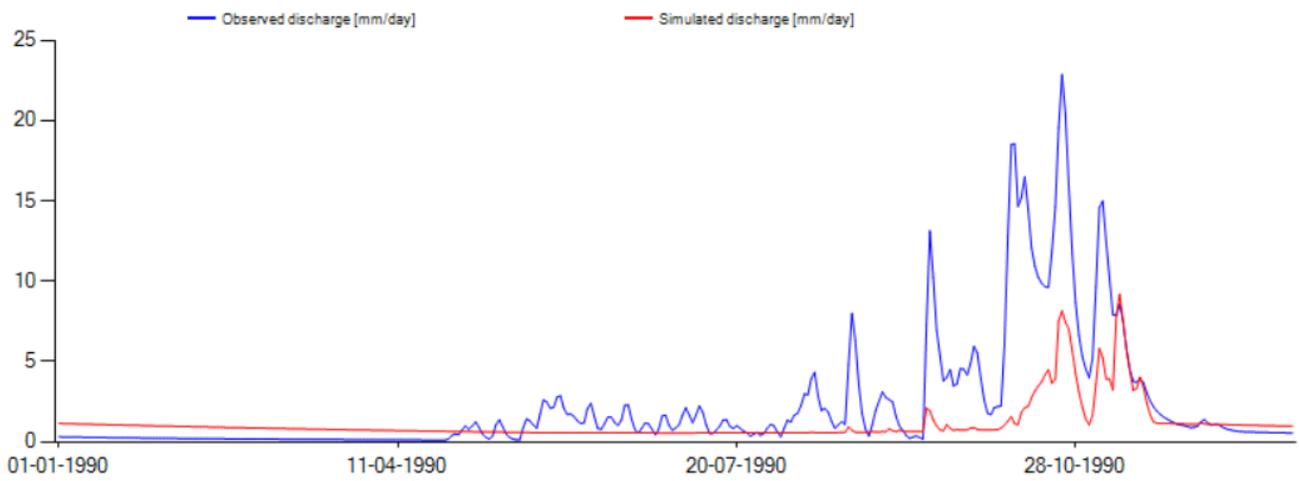
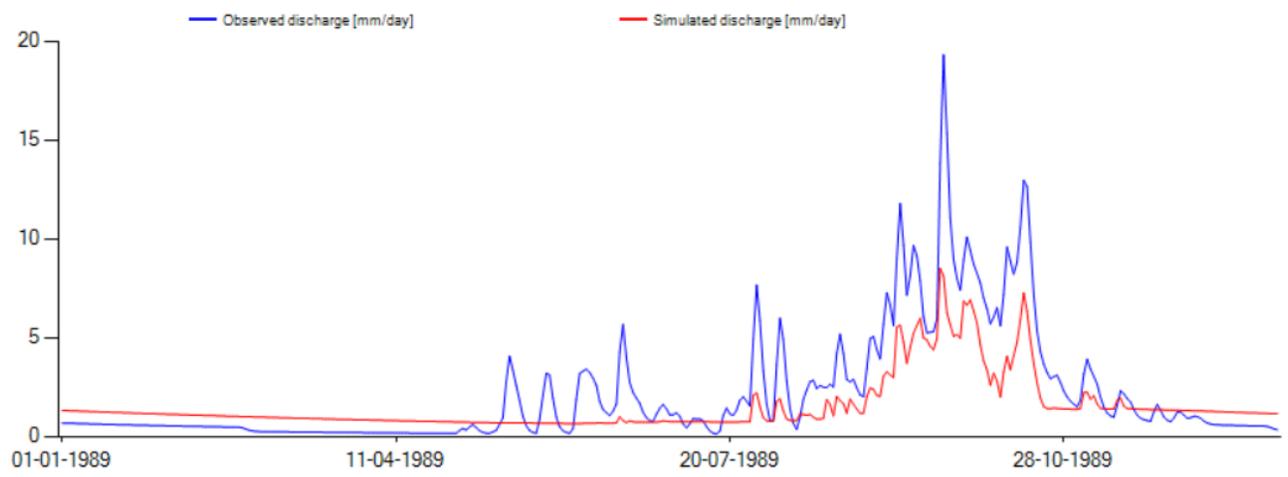
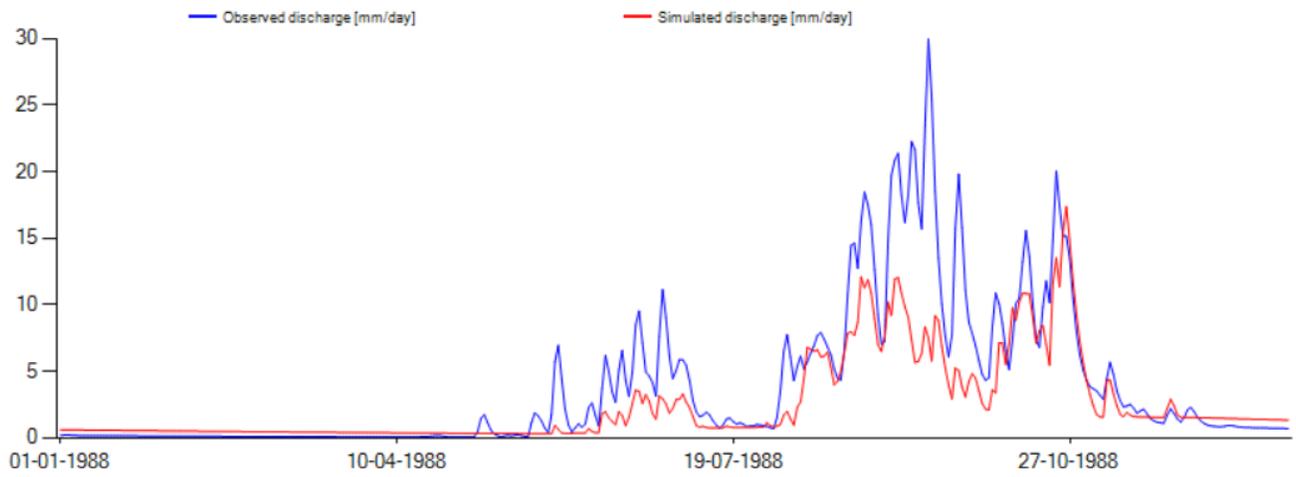
Wan, H., Xia, J., Zhang, L., She, D., Xiao, Y., & Zou, L. (2015). Sensitivity and Interaction Analysis Based on Sobol' Method and Its Application in a Distributed Flood Forecasting Model. *Water (Switzerland)*, 7, 2924–2951. <https://doi.org/10.3390/w7062924>

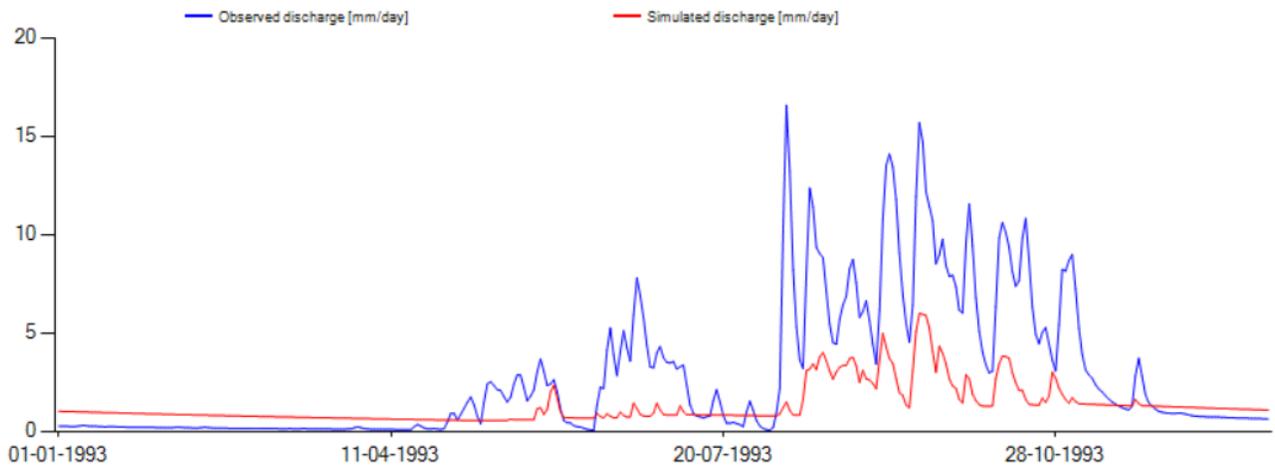
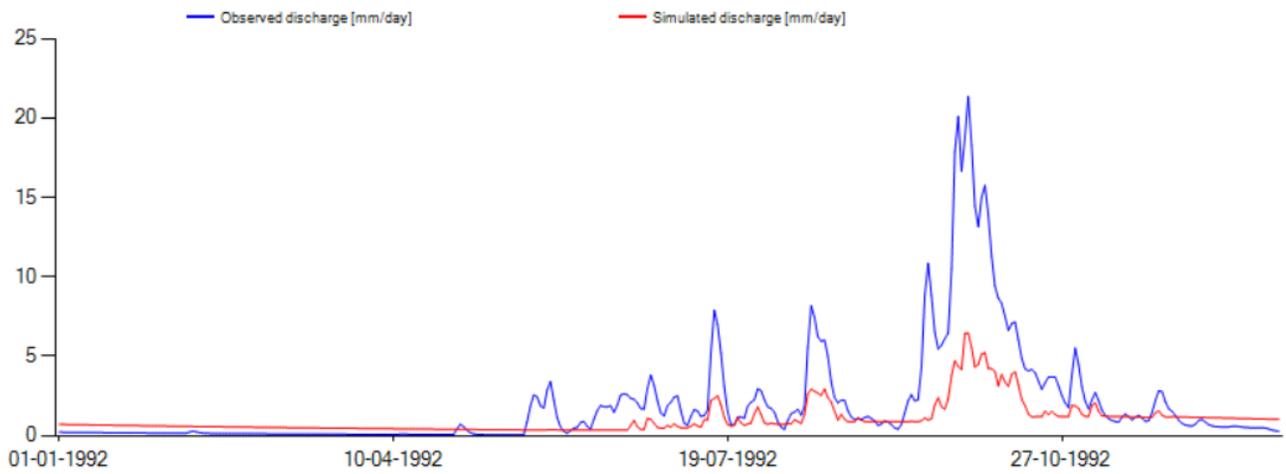
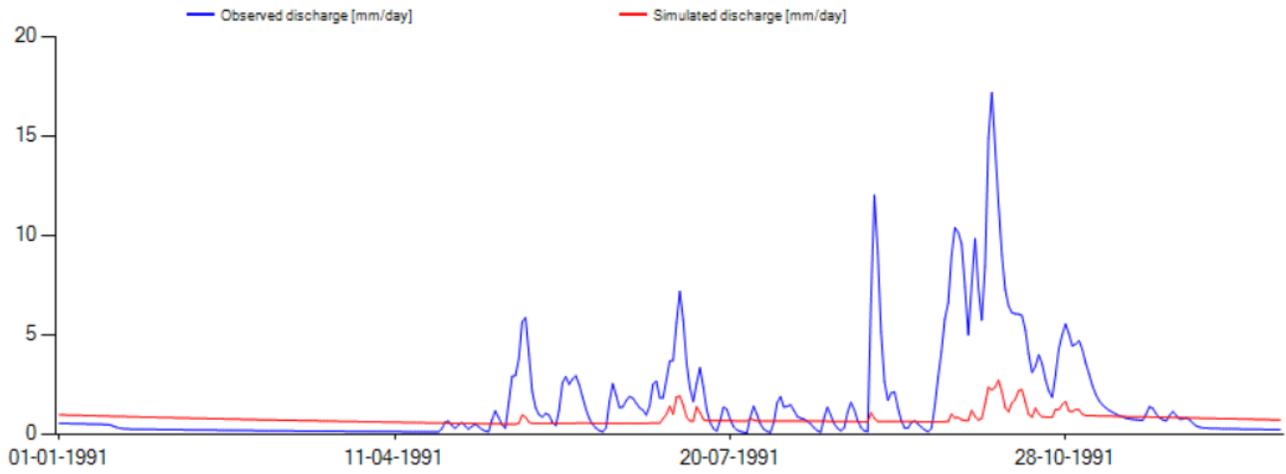
Wang, A., & Solomatine, D. P. (2019). Practical Experience of Sensitivity Analysis: Comparing Six Methods, on Three Hydrological Models, with Three Performance Criteria. *Water*, 11(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w11051062>

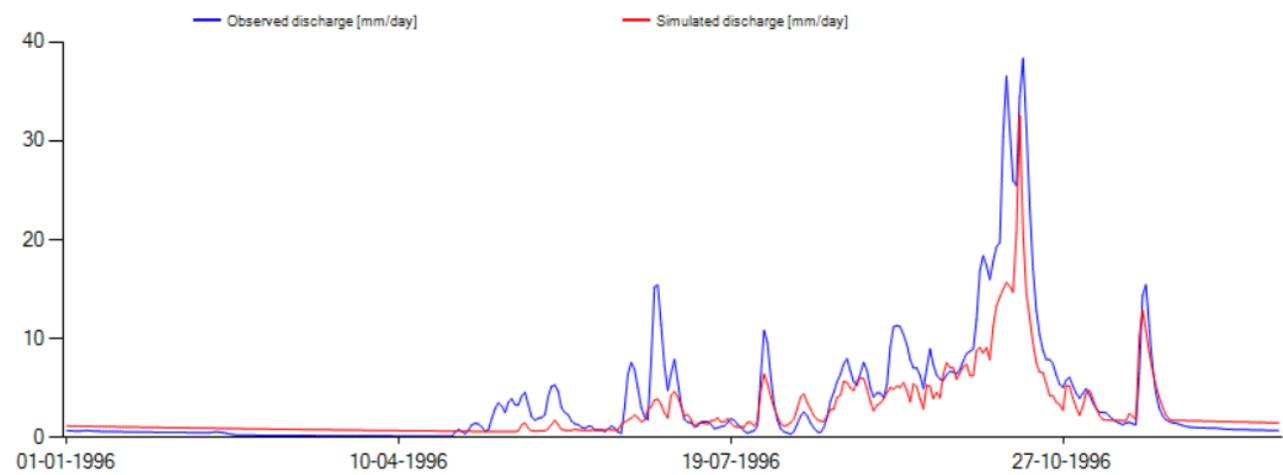
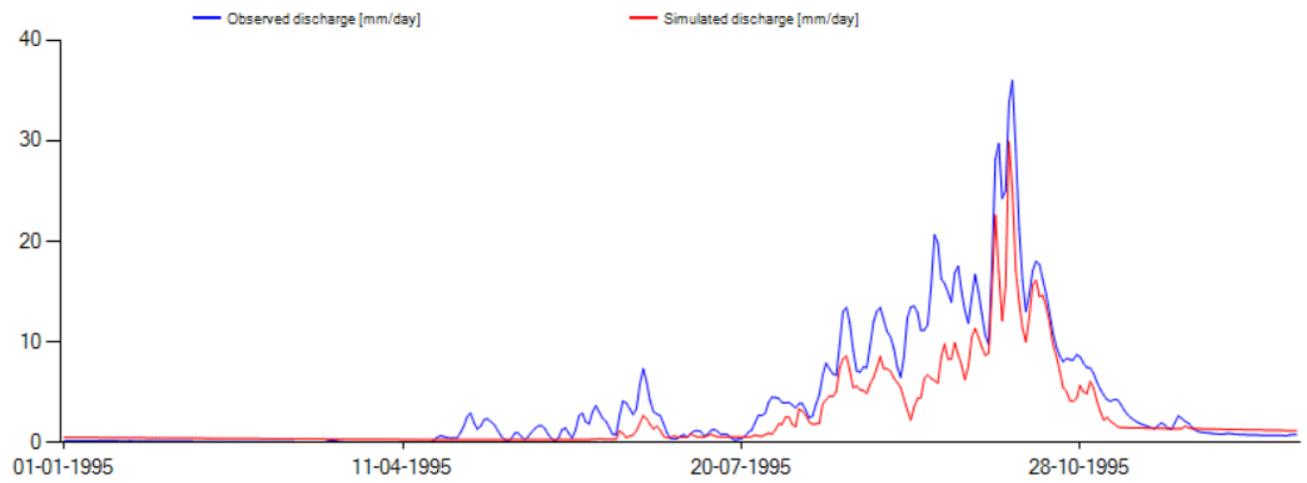
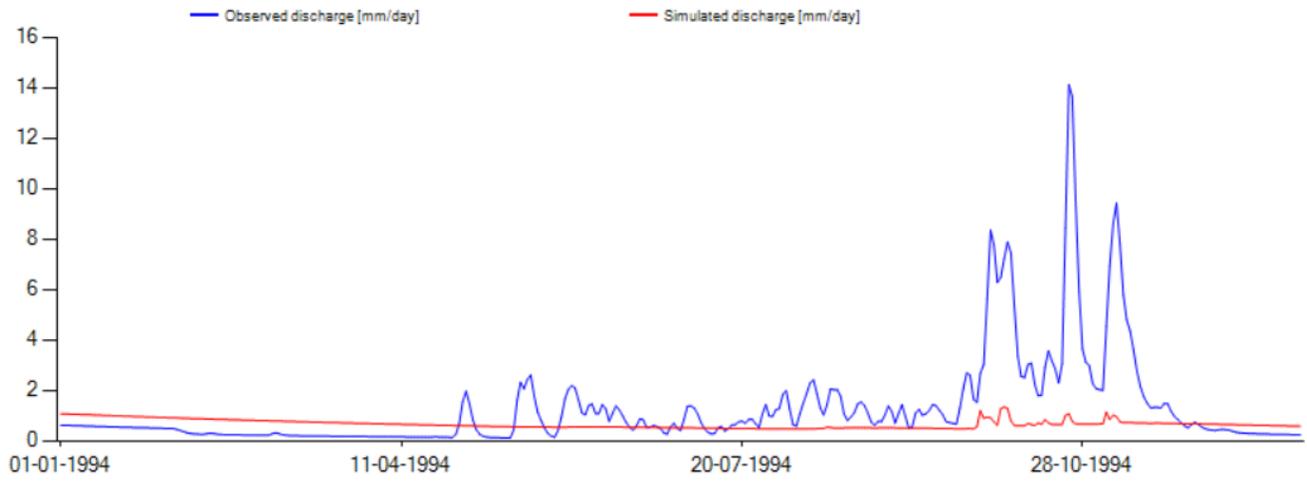
14 ANEXOS

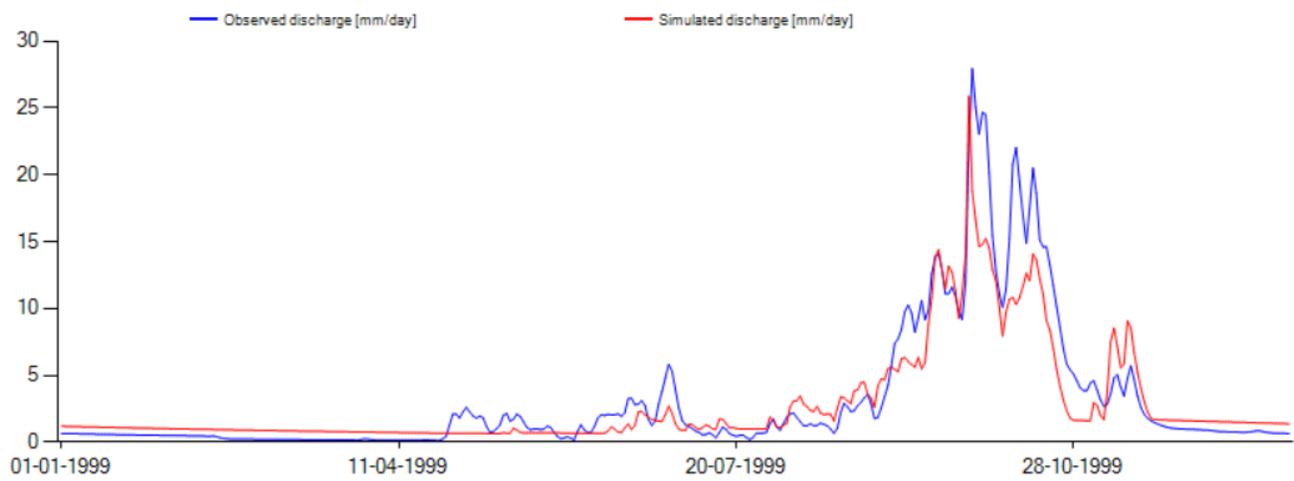
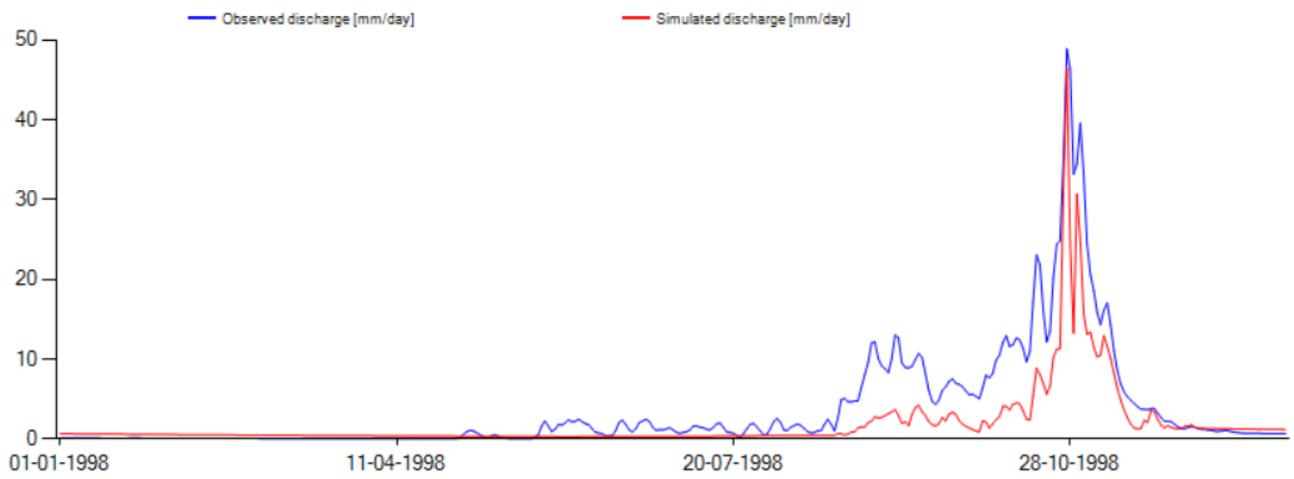
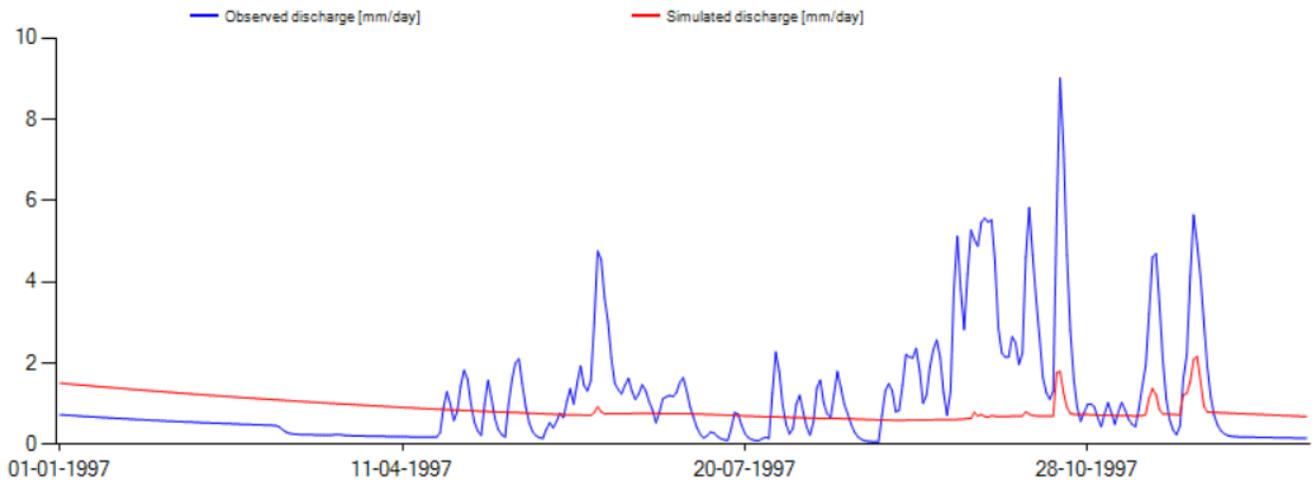
14.1 RESULTADOS POR AÑO PARA LA SIMULACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO SARDINAL.

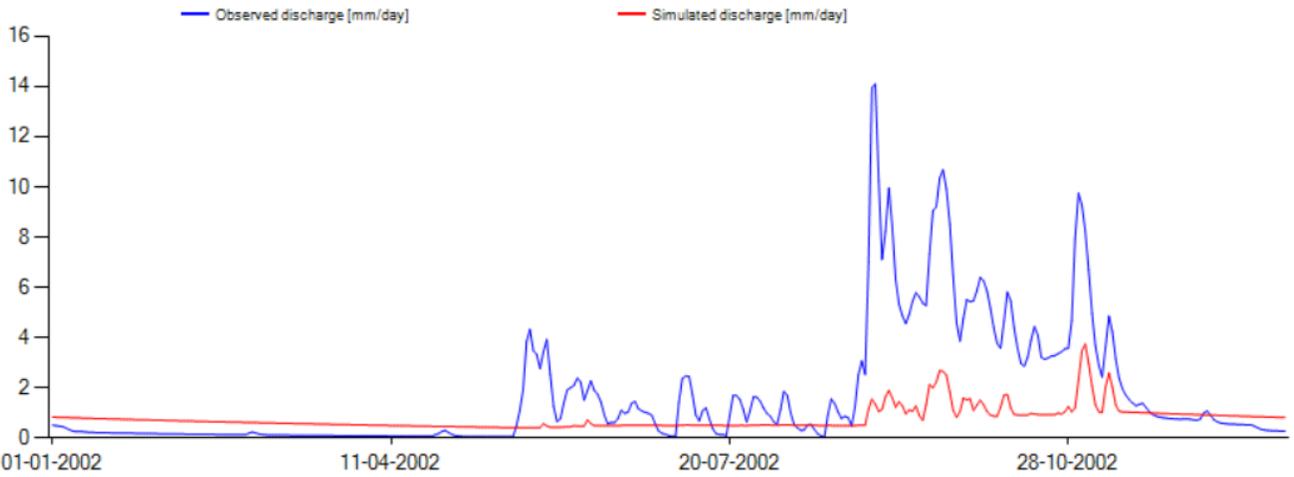
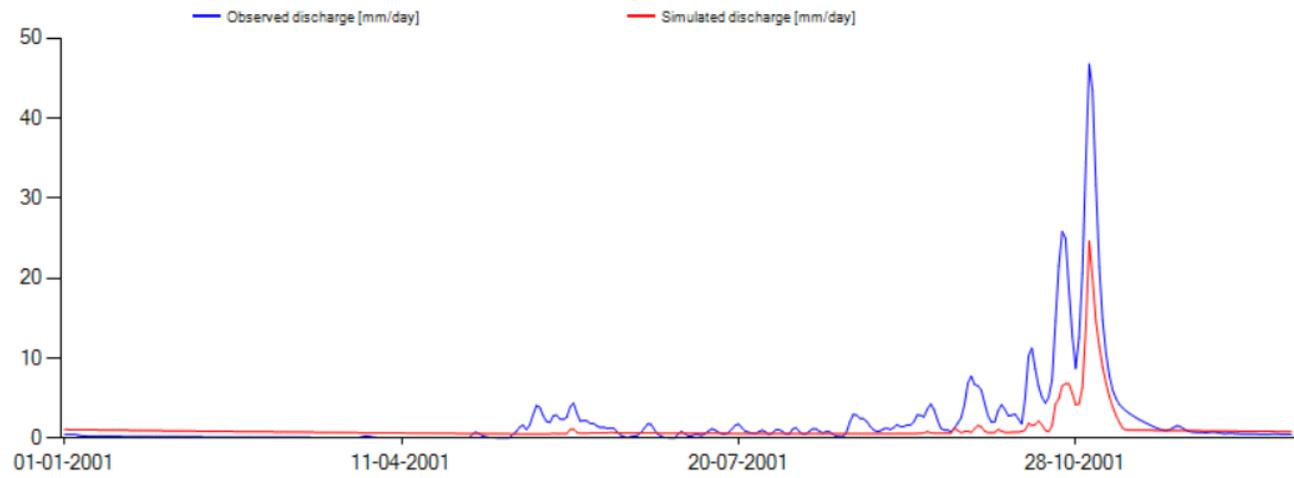
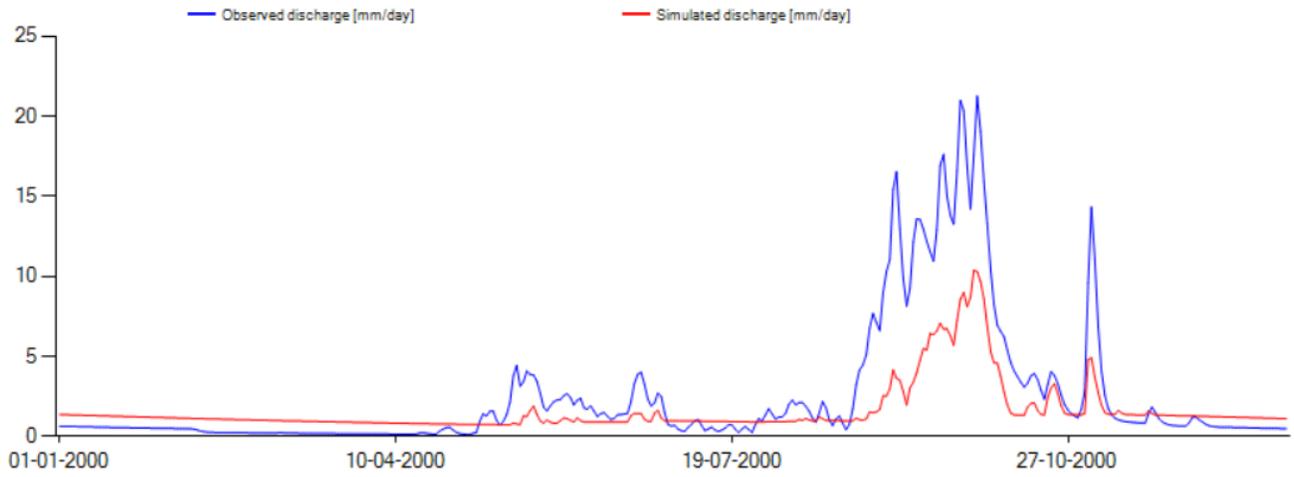


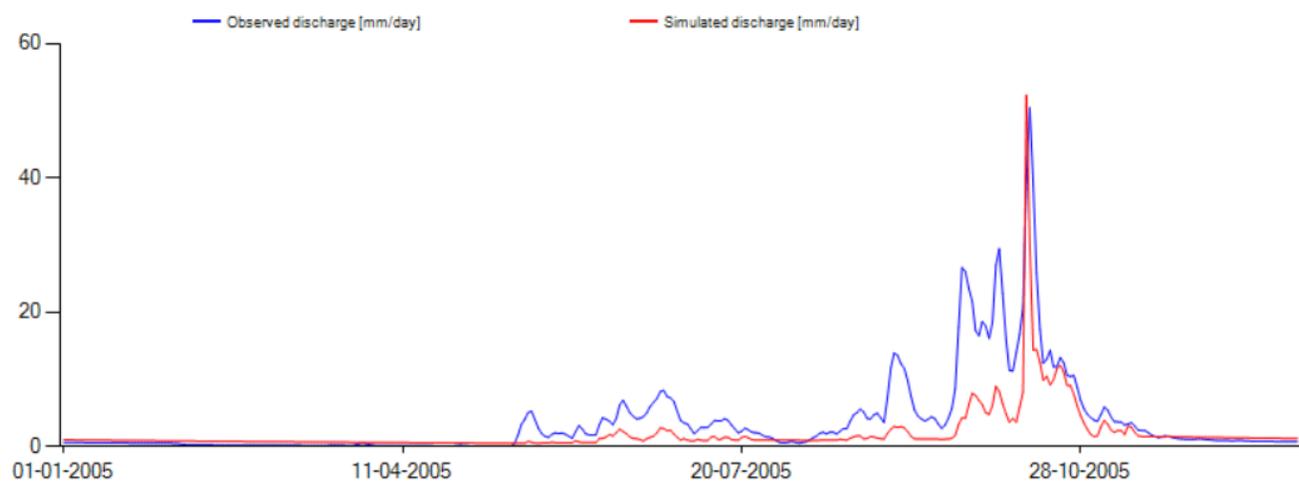
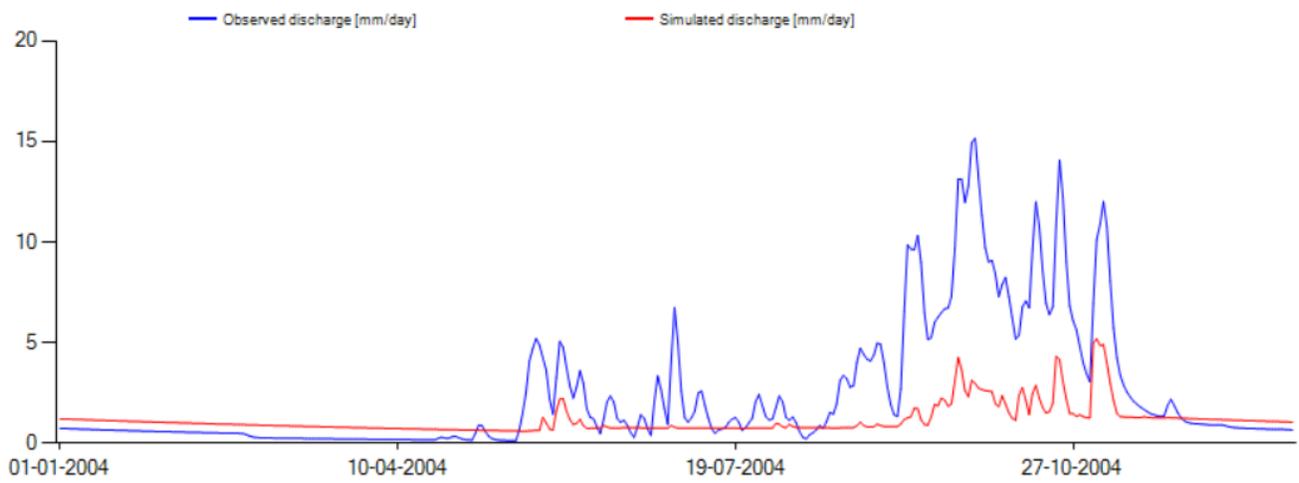
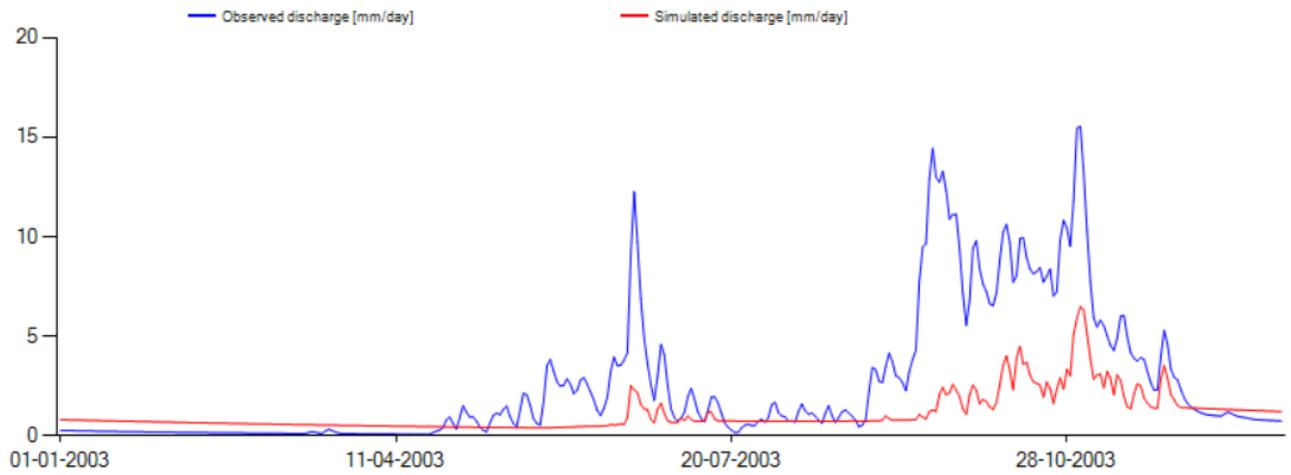


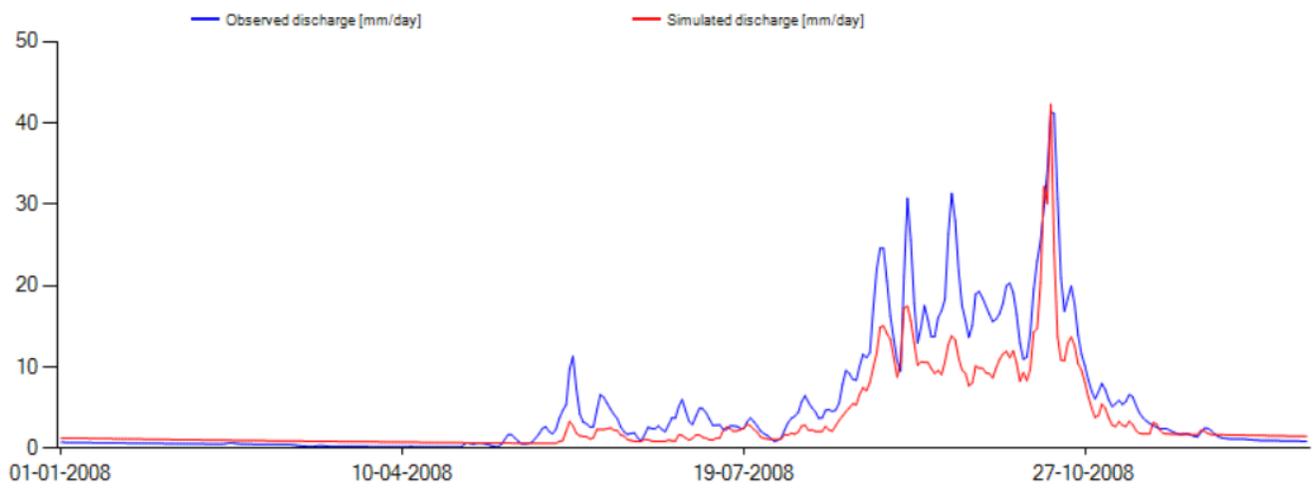
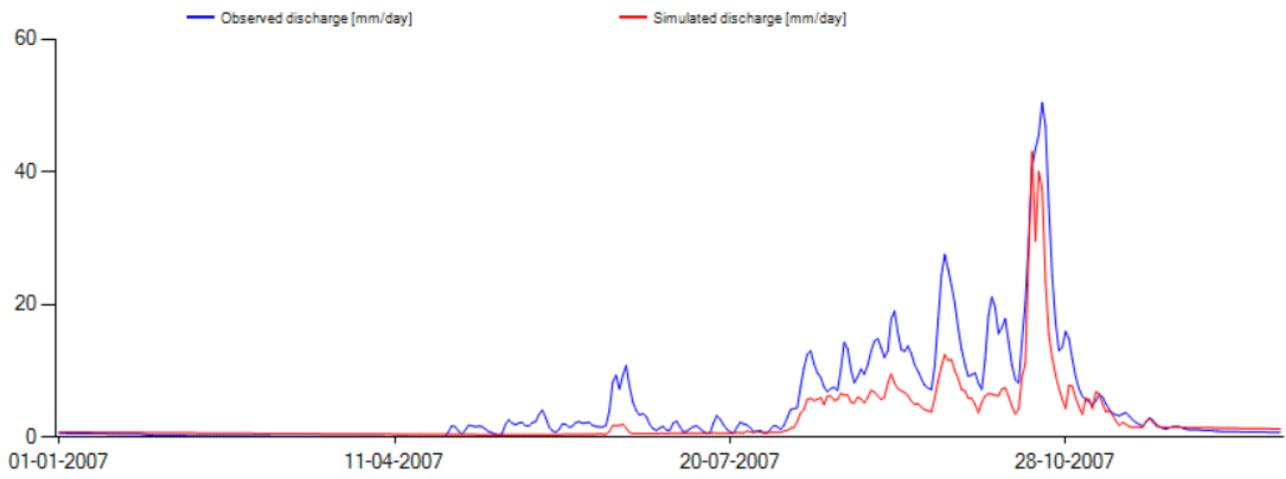
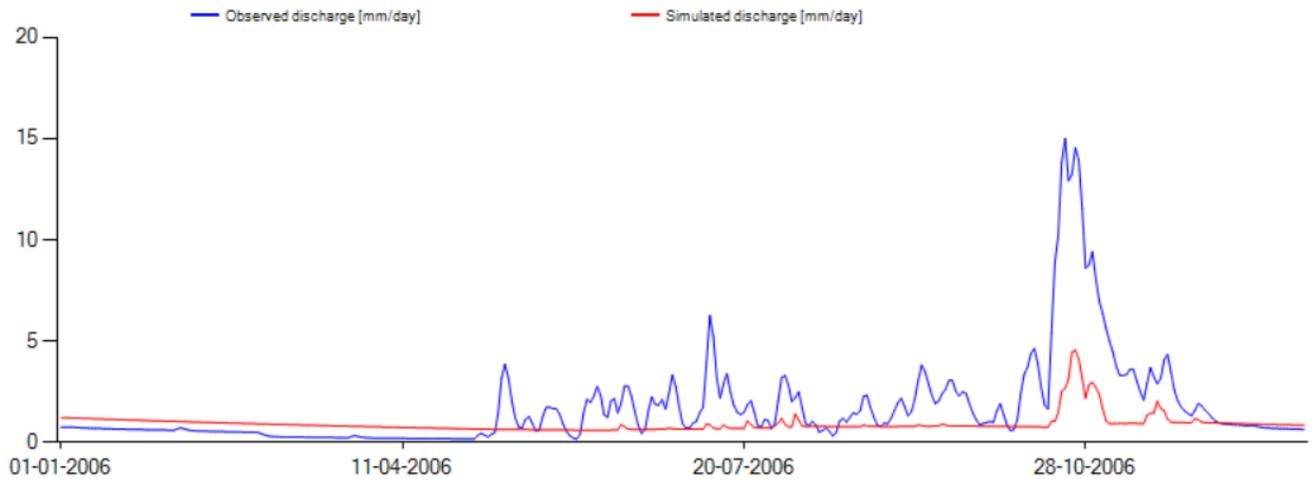


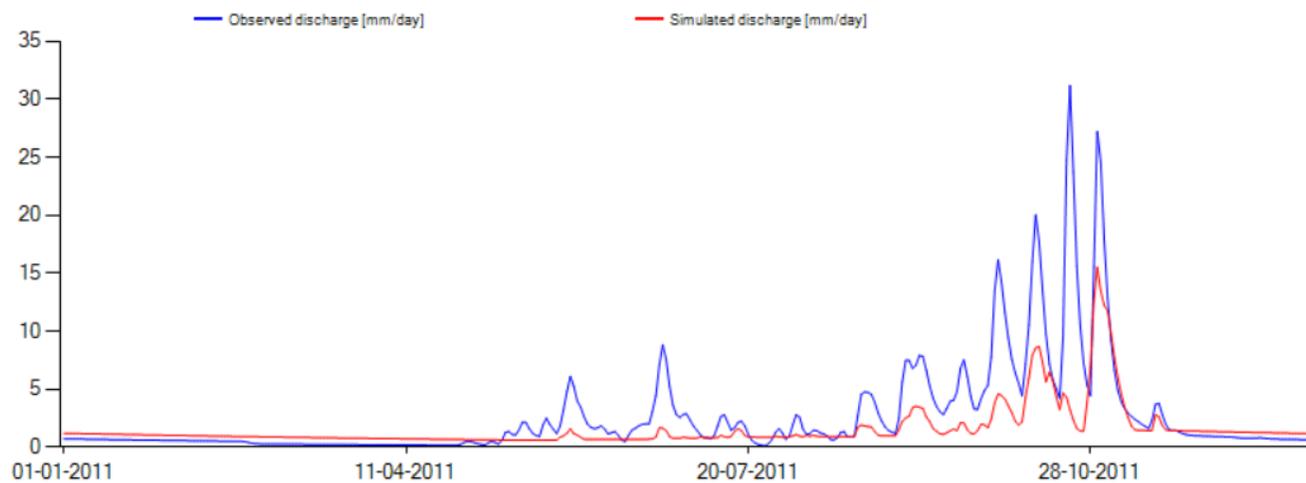
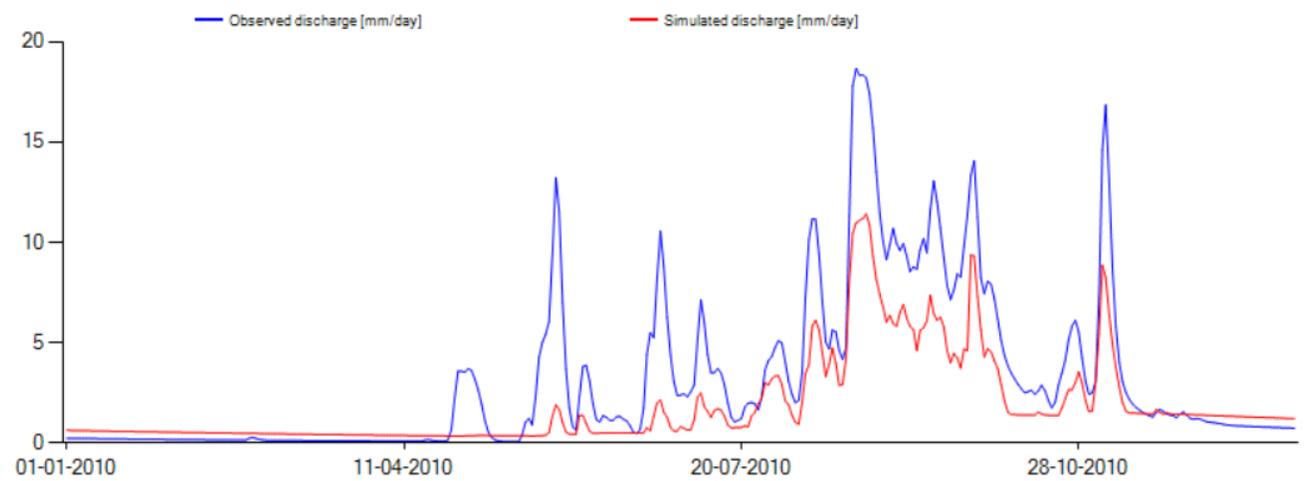
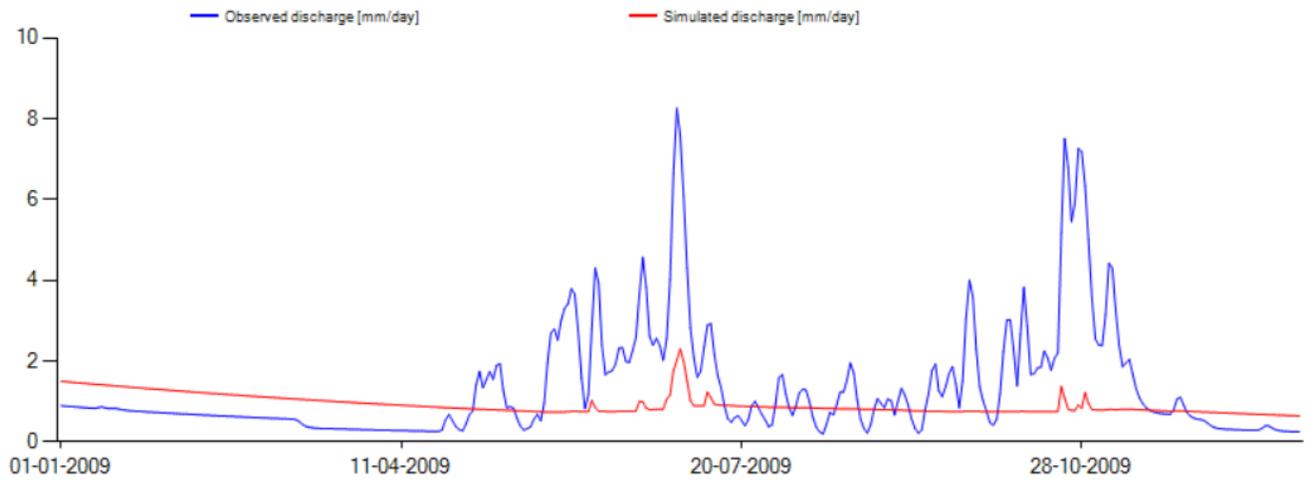












14.2 PERFIL DE INSTRUMENTOS: FICHA TÉCNICA DE MODELO HIDROLÓGICO HBV-LIGHT

Nombre del modelo	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV-Light)
Creado por	SMHI
Código	Python
Clasificación	Distribuido
Parámetros de entrada	Información estática: Zonas de elevación – vegetación, subcuencas Información dinámica: precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial.
Requerimientos calibración	Series de caudales observados
Procesos	Rutina de nieve
	Rutina de humedad del suelo
	Función de respuesta
	Enrutamiento
Aplicaciones	Amplificación de las series de datos sobre escorrentía (o llenar vacíos)
	Control de calidad de los datos
	Estudios de balance hídrico
	Previsión de escorrentías (advertencia de inundaciones y funcionamiento del embalse)
	Cálculo de las inundaciones de diseño para la seguridad de las presas
	Investigación de los efectos de los cambios dentro de la cuenca
	Simulación de la descarga de cuencas no calibradas
Simulación de los efectos del cambio climático	
Escala de aplicación	Cuenca
	Subcuenca
	Resolución diaria

Fuente: Seibert, 2005.