Global Gateway

Cofinanciado por la Unión Europea

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

PROGRAMA EUROCLIMA

Informe de entrega de productos

Actividad 2: Modelación hidrológica

Nombre de la consultoría: Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná y modelo de detalle de calidad de agua en la Toma Hernández para distintos escenarios de clima futuro

Fecha: 11 de noviembre de 2025

País: Argentina

Producido: Instituto Nacional del Agua

Implementado por:

aecid
Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

INA
Instituto Nacional del Agua

Este informe se ha elaborado para el Programa EUROCLIMA de la Unión Europea,

Se enmarca en la acción Apoyo a la *Territorialización de la Acción Ambiental con foco en Adaptación al Cambio Climático*, que se desarrolla dentro del proyecto "Estudios para mejorar la gestión del agua en un contexto de cambio climático"

AUTORIDADES del INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA:

PRESIDENTE (A/C del despacho)
Lic. Bernardo Bartolomé HEREDIA

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS
-

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDRÁULICA
Dr. Ing. Pablo Ezequiel GARCÍA

SUBGERENTE LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS
Bioq. Yanina EL KASSISSE

SUBGERENTE LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS
Ing. Jorge COLLINS

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDROLOGÍA
Lic. Gustavo ALMEIRA

PERSONAL PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO:

SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Programa de Hidráulica Computacional

Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ
Dr. Ing. Pablo E. GARCIA
Ing. Martín SABAROTS GERBEC
Ing. Santiago GUIZZARDI
Mag. Ing. Martiano RE

SUBGERENCIA LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS

Laboratorio Experimental de Tecnologías Sustentables

Lic. Bárbara GOMEZ
Lic. Marisol REALE
Téc. Qca. Lorena MARQUINA
Sra. Silvia MOYANO
Lic. Valeria RODRIGUEZ SALEMI
Doc. Virginia ZAPLARA
Téc. Qco. Nelson DIAZ
Lic. Carolina MUJICA
Sr. Germán LOZA

SUBGERENCIA CENTRO REGIONAL LITORAL

Lic. Esteban COLLINS
Ing. Rosana MAZZON
Lic. Jorge COLLINS
Dra. Silvia RAFAELLI

SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDROLOGÍA

Programa de Sistemas de Información y Alerta Hidrológica en Cuenca del Plata

Lic. Juan BIANCHI
Dr. Lic. Leandro GIORDANO
Lic. Tomás CALVI

INFORME ELABORADO POR:

Lic. Juan BIANCHI
Ing. Santiago GUIZZARDI
Mag. Ing. Martiano RE
Lic. Tomás CALVI
Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ
Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 7
2. OBJETIVOS GENERALES 8
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 8
4. METODOLOGÍA 9
5. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA 11
   - 5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS 13
   - 5.2. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS 13
6. DATOS DE BASE 15
   - 6.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN 15
   - 6.2. PRECIPITACION 16
   - 6.3. EVAPOTRASPIRACION 17
   - 6.4. TIPO DE SUELO 18
   - 6.5. COBERTURA DE SUELO 19
   - 6.6. CAUDALES 20
7. ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN 23
   - 7.1. MODELO HIDROLÓGICO 23
   - 7.2. MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 31
8. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS 35
   - 8.1. DELIMITACIÓN DE SUBCUENCAS 35
   - 8.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO HIDROLÓGICO 36
   - 8.3. LIMITACIONES 39
9. CALIBRACION Y VALIDACION 44
   - 9.1. INDICADORES 44
   - 9.2. RESULTADOS 46
10. RESULTADOS DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 59
    - 10.1. FORZANTES 60
    - 10.2. CAUDALES 73
11. CONCLUSIONES 94
12. REFERENCIAS 98

Listado de acrónimos

AECID: Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (España)

ANA: Agencia Nacional de Águas (Brasil)

CPC: Climate Prediction Center (por su sigla en inglés)

ENSO: El Niño–Southern Oscillation (por su sigla en inglés)

GCM: Global Climate Model

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Brasil)

IGN: Instituto Geográfico Nacional

MDE: Modelo Digital de Elevación

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (por su sigla en inglés)

RCP: Representative Concentration Pathway (por su sigla en inglés)

RCM: Regional Climate Model (por su sigla en inglés)

SSP: Shared Socioeconomic Pathways (por su sigla en inglés)

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde al Producto 2 de la consultoría “Modelización Hidrológica e Hidrodinámica del Río Paraná y Modelo de Detalle de Calidad de Agua en la Toma Hernández para distintos Escenarios del Clima Futuro”, financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y coordinada por la Universidad Nacional de Quilmes.

Este Plan de Trabajo se enmarca en el segundo componente de la consultoría, “Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná”, cuyo objetivo es evaluar los impactos del cambio climático en la cuenca del río Paraná. Para ello, se desarrolla una modelación hidrológica e hidrodinámica del área de estudio.

Frente a los desafíos que plantean las variaciones hidrológicas y climáticas de mayor frecuencia sobre los sistemas de abastecimiento, resulta clave contar con información detallada sobre las condiciones actuales y proyectadas de la calidad del agua. En ese sentido, este componente integra tareas de relevamiento hidrométrico, muestreo intensivo, modelación ambiental y relevamiento de empresas prestatarias a fin de anticipar escenarios de riesgo para la operación de tomas de agua potable y aportar evidencia para la planificación de medidas de adaptación.

La modelación hidrológica de la cuenca constituye una herramienta básica para la evaluación de escenarios climáticos. En este sentido, resulta el insumo principal de las simulaciones hidrodinámicas posteriores que permiten cuantificar el efecto de condiciones hidrológicas a nivel regional en alturas de agua en los ríos y en particular en las tomas de agua.

2. OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general de este trabajo es el de realizar un estudio de modelización hidrológica e hidrodinámica de la cuenca del río Paraná para obtener una adecuada representación de la situación presente, así como también la evaluación de distintos escenarios de clima futuro.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se enmarcan en este Producto son: i) obtener una modelización hidrológica de la cuenca del río Paraná bajo diferentes escenarios de cambio climático, y ii) analizar los cambios en los caudales proyectados bajo los diferentes escenarios, así como la intensidad, frecuencia y duración de crecientes y bajantes.

4. METODOLOGÍA

La modelación hidrológica se lleva a cabo sobre la cuenca del río Paraná (Figura 1) utilizando una plataforma hidrológica ya implementada por el INA en el marco de sus actividades operativas respecto de la dinámica de la Cuenca del Plata, con capacidades de simulación distribuida y forzamiento climático. La metodología implementada incluye las siguientes tareas:

- Recolección y procesamiento de datos de entrada: series de precipitación y temperatura (observadas y proyectadas), mapas de topografía, cobertura del suelo, tipo de suelo y uso del suelo.
- Configuración del modelo hidrológico distribuido, representando los procesos de generación, infiltración, escorrentía superficial y subsuperficial, y su propagación en cauces.
- Calibración del modelo con datos históricos de caudales y niveles provenientes de estaciones hidrométricas disponibles, utilizando métricas estadísticas para evaluar el ajuste.
- Validación cruzada sobre períodos independientes.
- Análisis de sensibilidad e identificación de parámetros clave.

Para el tratamiento de los escenarios de Cambio Climático se toman como referencias estudios actualizados de la Argentina (MAyDS, 2023). Se destaca que como insumo para la evaluación de escenarios de Cambio Climático mediante el modelo hidrológico se requiere generación de series sintéticas para condiciones actuales y futuras a partir del forzamiento con escenarios de cambio climático (usando salidas de modelos

GCM/RCM bajo escenarios SSP1-2.6 (emisiones bajas), SSP2-4.5 (emisiones moderadas) y SSP5-8.5 (emisiones altas), en horizontes 2021-2040 (corto plazo), 2041-2060 (mediano plazo) y 2081-2100 (largo plazo). La información utilizada se encuentra reticulada a escala diaria sobre la cobertura de la cuenca del río Paraná y cuenta con corrección de sesgo y *reducción de escala* de las variables climáticas.

Los resultados de las simulaciones de las proyecciones climáticas incluyen la provisión de caudales y niveles en nodos de interés aguas abajo, los cuales serán utilizados como condiciones de borde en los modelos hidrodinámicos y de calidad de agua desarrollados en otras etapas del proyecto.

5. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del río Paraná constituye uno de los sistemas hidrográficos más extensos y relevantes de América del Sur. Se extiende por aproximadamente 2,6 millones de km^2, abarcando territorios de Brasil, Paraguay, Argentina y, en menor proporción, Bolivia. Su cauce principal nace en Brasil, en la confluencia de los ríos Grande y Paranaíba, y recorre cerca de 4.880 km hasta desembocar en el delta del Paraná, antes de desembocar en el estuario del Río de la Plata (ver Figura 1).

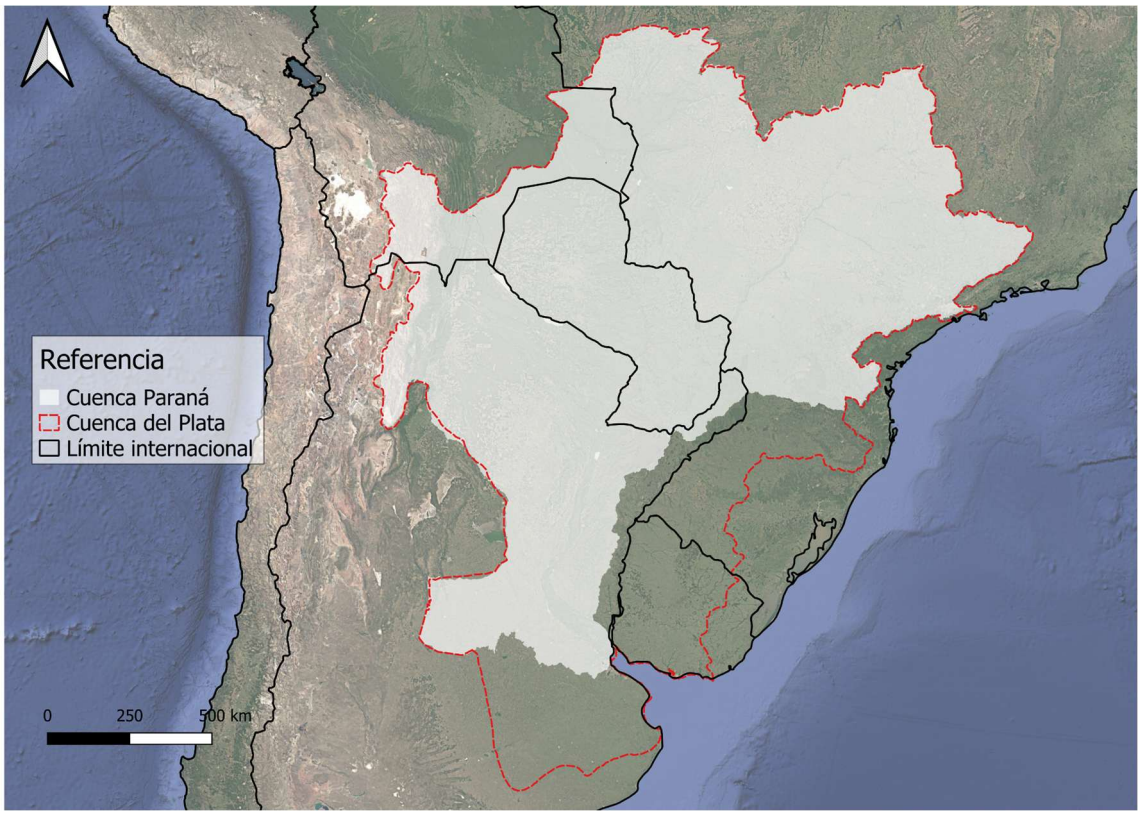


Figura 1. Cuenca del río Paraná y Cuenca del Plata.

El sistema Paraná integra a su vez una red de grandes subcuencas: Alto Paraná, Paraguay, Bermejo, Pilcomayo, Salado del Norte, Iguazú y Medio-Bajo Paraná, las cuales definen los principales aportes hidrológicos y sedimentarios al sistema.

La cuenca del Paraná alberga una población estimada en más de 60 millones de personas, concentradas en áreas urbanas y productivas de gran relevancia regional. Los principales centros urbanos vinculados al sistema son los siguientes:

- **Brasil**: São Paulo, Curitiba, Londrina, Maringá, Foz do Iguaçu.
- **Paraguay**: Asunción y área metropolitana.
- **Argentina**: Corrientes, Resistencia, Formosa, Santa Fe, Rosario, Paraná, y localidades del Delta.

El Paraná constituye una fuente estratégica de abastecimiento de agua potable, energía hidroeléctrica y transporte fluvial. En lo que respecta a los aprovechamientos hidroeléctricos, existen más de 130 represas en su curso principal y afluentes. Entre las más importantes se encuentran las presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales centrales hidroeléctricas de la cuenca del río Paraná.

Central	País/Países	Potencia (MW)	Observaciones
Itaipú	Brasil - Paraguay	14000	Segunda presa mundial por generación
Ilha Solteira	Brasil	3440	Una de las mayores de Brasil
Yacyretá	Argentina - Paraguay	3100	Incluye esclusa de navegación.
Porto Primavera	Brasil	1800	Controla caudales del Alto Paraná
Jupiá (Eng. Souza Dias)	Brasil	1551	Regula el tramo medio

El Paraná permite la navegación de convoyes desde Corumbá (Brasil) hasta Rosario y el Delta argentino (más de 3.400 km navegables). Este sistema sostiene el transporte de granos, combustibles y minerales desde el centro de Sudamérica al Atlántico. Entre las esclusas principales del sistema se cuentan las de Yacyretá, Itaipú (no operativa para tránsito comercial), Porto Primavera y esclusas menores en tramos brasileños.

5.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La cuenca del río Paraná presenta una diversidad física que se refleja en la transición desde las zonas elevadas de la meseta brasileña (*planalto*) hasta las extensas llanuras del Paraguay y el norte de la Argentina. La Figura 2 muestra la red hidrográfica con los principales cursos.

En su tramo superior predominan las mesetas y zonas serranas, con ríos encajonados que atraviesan rocas basálticas, originando saltos y rápidos como los del Iguazú o los que han sido aprovechados para construir embalses. Hacia el tramo medio e inferior, el relieve se suaviza progresivamente, dando lugar a amplias planicies aluviales con cauces meandriformes, islas, albardones y lagunas temporarias.

Los suelos presentan una amplia variedad, desde los más desarrollados y profundos en las zonas altas hasta los aluviales recientes en las llanuras bajas. En correspondencia, el uso del suelo también es diverso: las áreas más altas están intensamente aprovechadas para la agricultura y la ganadería, mientras que los sectores bajos conservan extensos humedales y formaciones boscosas.

5.2. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS

Algunas de las principales características hidráulicas del sistema de la cuenca del río Paraná en la Cuenca del Plata se enuncian a continuación:

- El clima de la cuenca varía de tropical húmedo en la cuenca alta (Brasil y Paraguay) a templado húmedo en el tramo medio y bajo (Argentina).
- Precipitación media anual: 1.000 a 1.800 mm, con máximos en verano y en la cuenca alta.

- Temperaturas medias: 20–26 °C en la cuenca superior, 16–22 °C en la cuenca baja.
- Evapotranspiración: elevada en el norte (>1.200 mm/año).
- Régimen de caudales: pluvial, con marcadas variaciones estacionales e interanuales, influenciadas por eventos ENSO (El Niño / La Niña).
- Caudal medio del Paraná en Corrientes: ~16.000 m^3/s; y en la desembocadura al Río de la Plata (Frente del Delta), ~22.000 m^3/s.

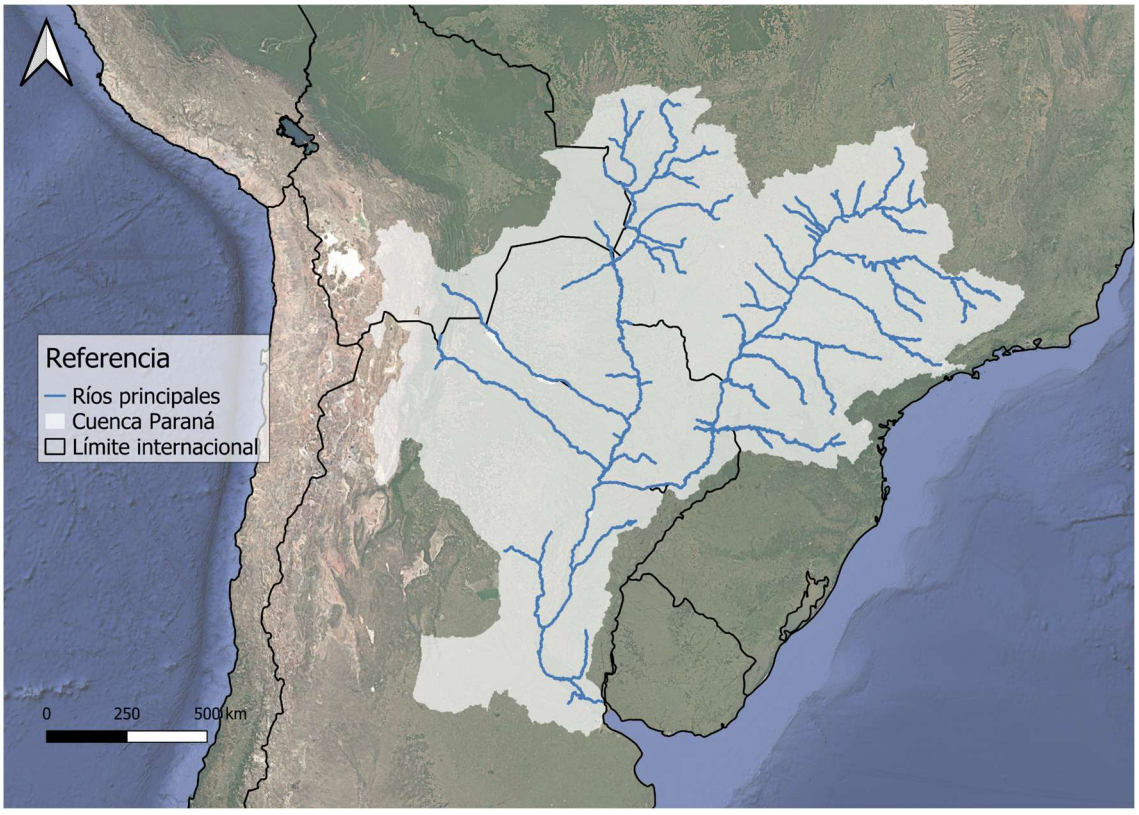


Figura 2. Cuenca del río Paraná y sus cursos principales.

6. DATOS DE BASE

El desarrollo del modelo hidrológico conlleva disponer de adecuada información de base, en particular referido a la topografía de la cuenca, que permitirá la delimitación de las cuencas y trazado de la red de drenaje; los forzantes de precipitación y evaporación, así como también series de caudales observados que permitan la calibración y validación del modelo y las características propias de la cuenca como el uso y tipo de suelo.

En este apartado se presentan las fuentes de datos que permitirán la posterior implementación del modelo hidrológico.

6.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El Modelo Digital de Elevación (MDE) constituye un insumo esencial para la modelación hidrológica, ya que define la topografía del terreno, la dirección del escurrimiento superficial y la delimitación de las subcuencas. Existen diferentes productos abiertos de modelos digitales de elevación, con cobertura global (ej SRTM, TANDEM-X, MERIT) y regional. Entre las opciones disponibles destacan el MDE del Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) y el MDE-AR del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Argentina.

En el presente trabajo se optó por utilizar el Modelo Digital de Elevación (MDE) MERIT (*Multi-Error-Removed Improved-Terrain DEM*; Yamazaki et *al.*, 2017) , que ha mostrado buenos resultados en trabajos previos (Guizzardi et *al.*, 2024). El MERIT DEM es un producto global que combina información de varios modelos (SRTM, AW3D, GDEM e IceSat) con un proceso de corrección sistemática de errores. Su principal ventaja radica en la eliminación de depresiones artificiales, el suavizado de ruido topográfico

y la corrección de sesgos por vegetación y errores radar. Como resultado, ofrece una superficie altimétrica continua, sin discontinuidades en los bordes, ideal para el análisis hidrológico regional. Su resolución es de aproximadamente 90 m (3 *arc-sec*) y cubre la totalidad del territorio de la cuenca del Paraná. La Figura 3 presenta el MDE en toda la extensión del área de estudio.

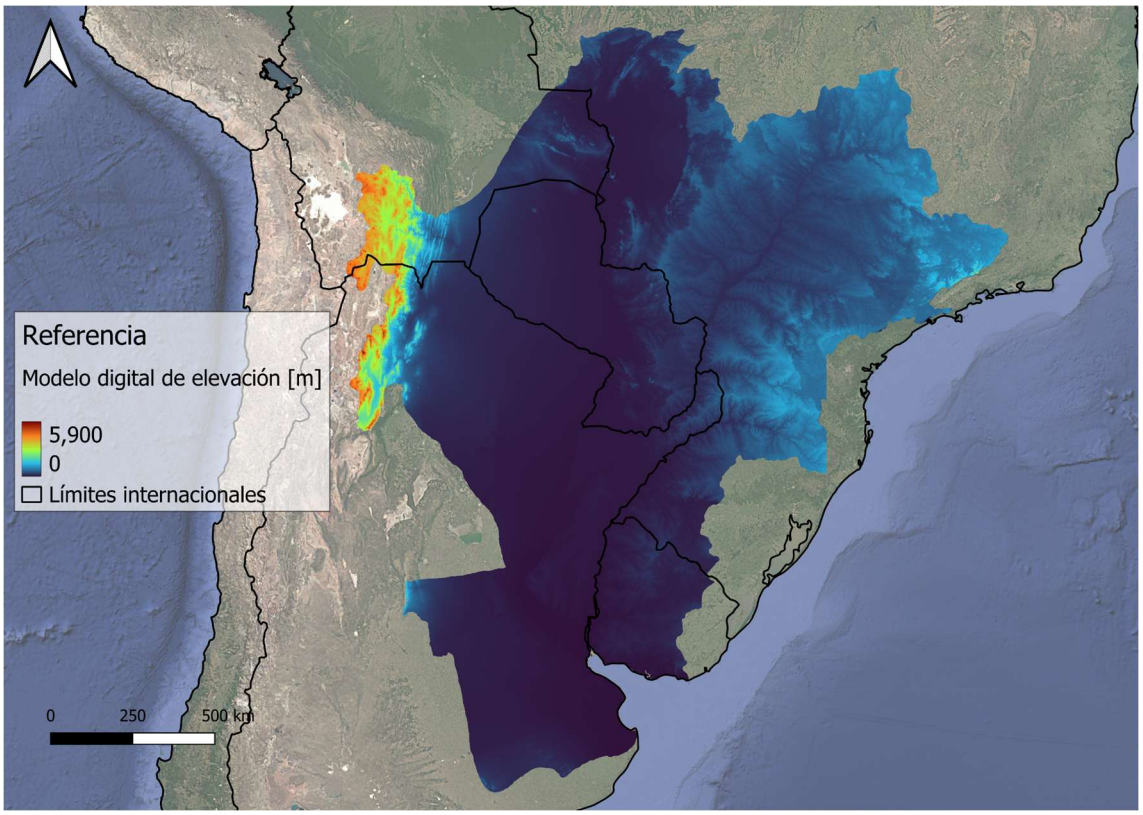


Figura 3. Topografía de la cuenca del río Paraná.

6.2. PRECIPITACION

La caracterización de la precipitación es una variable fundamental en el análisis hidrológico. Se utilizan el análisis global de la precipitación realizado por el Centro de Predicción Climática de NOAA sobre la base de la red sinóptica internacional, con una

resolución temporal de 1 día y espacial de 0,5 grados de latitud y longitud. Se descarga de ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/cpc_global_precip, luego se ingesta a base de datos y se recorta la grilla con los polígonos de interés y se calcula la media para cada paso temporal.

La principal ventaja de utilizar estos datos en lugar de registros puntuales medidos en campo radica en contar con una misma fuente de información, que responde a un proceso de homogeneización en el tratamiento de los datos y asegura la cobertura en la totalidad de la cuenca.

La Figura 4 presenta como es el pasaje de los datos de precipitación de una grilla regular a la discretización de subcuencas.

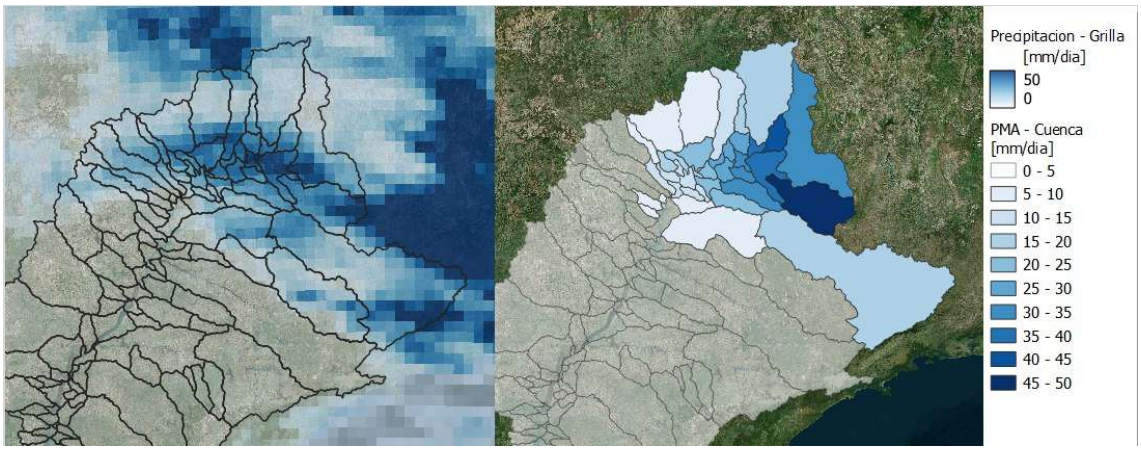


Figura 4. Ejemplo de conversión de la precipitación en formato grillado a precipitación media areal (PMA) por cuenca. Izq, distribución espacial de la lluvia diaria en celdas discretas; Der., PMA resultante para cada subcuenca obtenida mediante integración.

6.3. EVAPOTRASPIRACION

Se utilizan series de evapotranspiración para cada subcuenca a través de la aplicación de la fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), la cual necesita solo datos

de temperaturas y radiación solar para la estimación de evapotranspiración potencial:

$$\mathbf{ET_0} = 0{,}0135\ (t_{med} + 17{,}78)\ R_s$$

donde:

ET_0; evapotranspiración potencial diaria, mm/día

t_{med}; temperatura media, °C

R_s; radiación solar incidente, convertida en mm/día

La misma se calcula de la misma forma que la precipitación, se recorta la grilla con los polígonos de las subcuencas y se calcula la media para cada paso temporal. La grilla de evapotranspiración climatológica que se utiliza es la disponible en la base de datos del Alerta Hidrológico del INA (Giordano, L., 2019).

6.4. TIPO DE SUELO

Para estimar la capacidad de drenaje de cada cuenca, se utiliza la base de datos de suelos WISE30sec (Batjes, 2015), cuya cobertura sobre la cuenca se observa en la Figura 5. Esta base global proporciona información detallada sobre las propiedades del suelo, como la capacidad de retención de agua y la conductividad hidráulica, con una resolución de 30 segundos de arco (~1 km).

Estas estimaciones se presentan para intervalos de profundidad fija de 20 cm hasta una profundidad de 200 cm. Las respectivas estimaciones de propiedades del suelo se obtienen del análisis estadístico de datos para unos 21.000 perfiles de suelo.

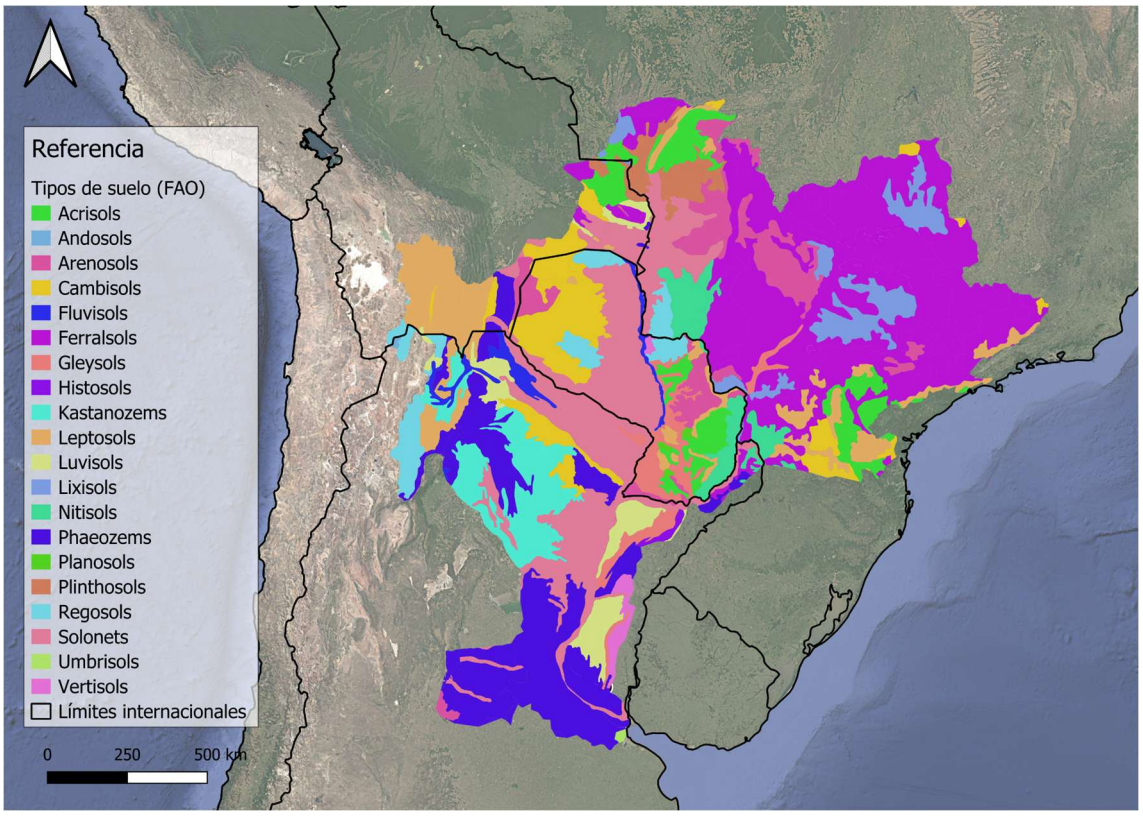


Figura 5. Tipos de suelo de la cuenca del río Paraná.

6.5. COBERTURA DE SUELO

Al igual que en el caso de tipos de suelo, para definir la cobertura de suelo en la cuenca del río Paraná se mapean los usos de suelo en toda su extensión utilizando un formato ráster. Esta información se utiliza para calcular el almacenamiento superficial (X^c_1) y subsuperficial (X^c_2) de cada una de las subcuencas. Se calcula la intercepción en vegetación y el espesor de la zona de raíces, ponderando por el área de cada tipo de uso. Para ello, se utilizó la base de datos de cobertura del suelo de ESRI (Sentinel-2, 10m Land Use/Land Cover; Karra, 2021). Las distintas coberturas de suelo son apreciadas en la Figura 6.

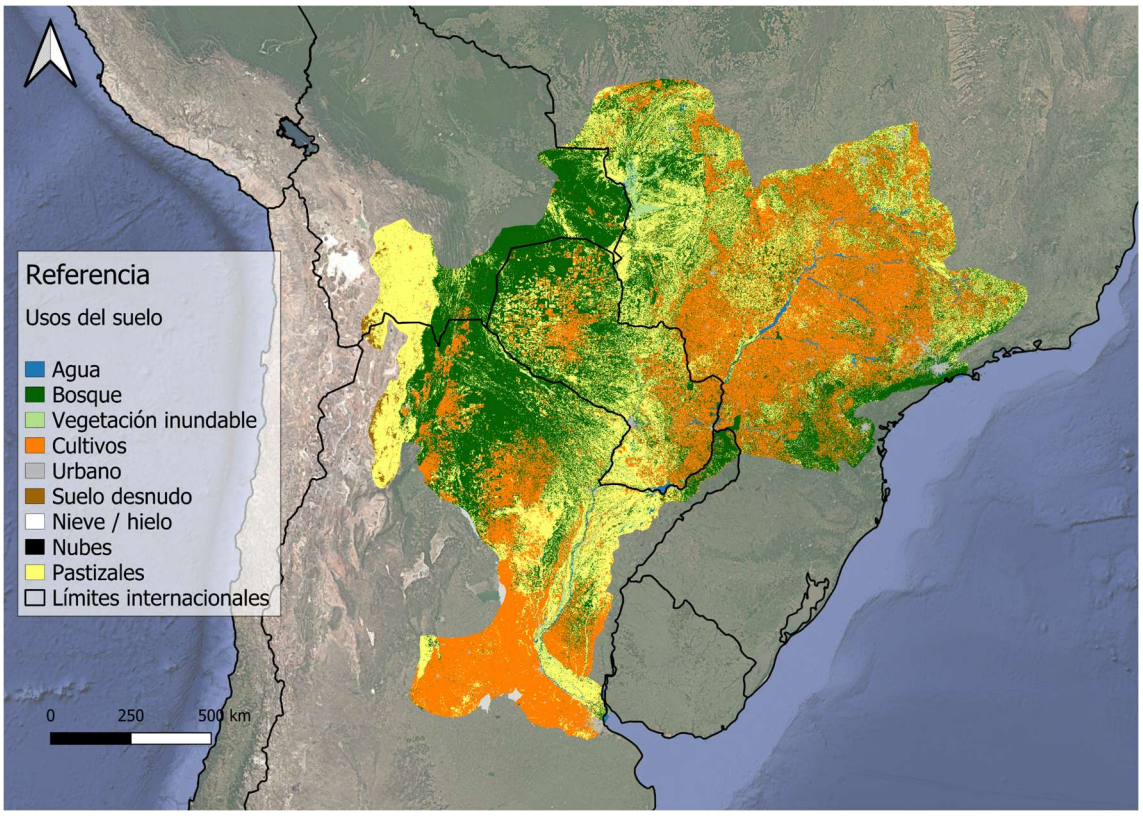


Figura 6. Usos de suelo de la cuenca del río Paraná.

6.6. CAUDALES

Los resultados de la modelación hidrológica son contrastados con mediciones de caudales. En este sentido se identificaron distintas fuentes de datos que permiten contar con series dentro de los últimos 40 años (Figura 7).

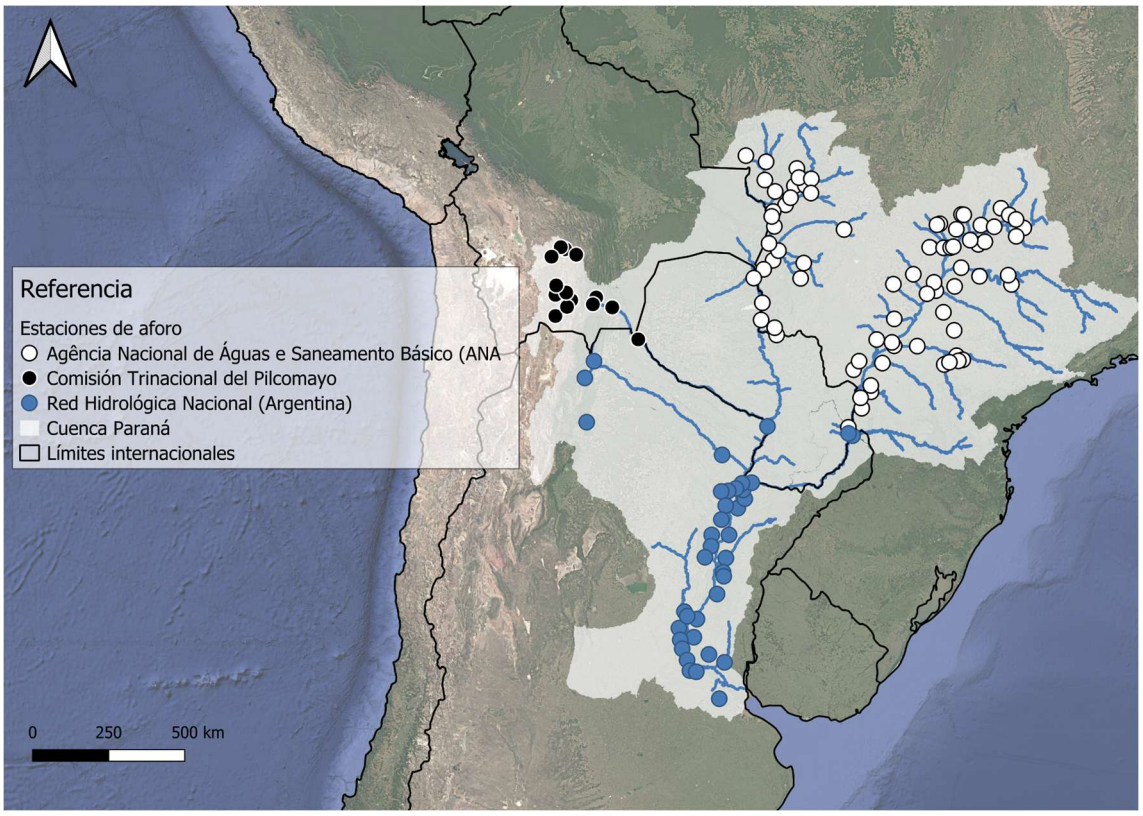


Figura 7. Fuentes de datos de caudales utilizadas según red de observación.

Para la cuenca del Alto Paraná y del río Paraguay, la principal fuente consultada es la Agencia Nacional de Águas (ANA) Brasil (https://www.snirh.gov.br/hidroweb). En muchos casos, las estaciones de medición coinciden con el emplazamiento de un aprovechamiento hidroeléctrico, por lo que el dato observado es el caudal erogado por la hidroeléctrica, lo cual tiene una fuerte modulación que afecta el régimen. Más adelante se detalla el tratamiento aplicado para esta situación.

Para el caso de la cuenca del río Pilcomayo, la Comisión Trinacional del río Pilcomayo, cuenta con series de niveles y aforos, a partir de las cuales se generaron las series de caudales diarios.

En territorio argentino, se utilizaron las series de caudales de la Red Hidrológica Nacional, las cuales no solo permiten evaluar los aportes laterales de caudal, sino también cuantificar el escurrimiento en distintos puntos del río Paraná entre Misiones y la desembocadura en el Río de la Plata.

7. ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN

El análisis hidrológico de la cuenca consta de dos etapas: i) implementación de los modelos hidrológicos que componen el sistema de la cuenca del río Paraná, y ii) la evaluación de escenarios futuros de Cambio Climático.

En primer lugar, se desarrolla un modelo hidrológico continuo a paso diario, para el cual se realiza una subdivisión de cuencas en función de los datos disponibles y se realiza una calibración y validación tomando una ventana temporal representativa de las condiciones actuales.

Luego, se toman los forzantes (temperaturas y precipitaciones) que surgen de distintos escenarios de Cambio Climático, definidos previamente en el Plan de Trabajo (Producto 1.A; Ortiz y Sabarots Gerbec, 2025) y se generarán las series a escala de subcuencas para poder de esa forma realizar las simulaciones futuras.

Esta sección describe conceptualmente cada una de estas etapas.

7.1. MODELO HIDROLÓGICO

7.1.1. Modelo matemático

Se emplea un modelo hidrológico de simulación continua de caudales en la sección de cierre de cada subcuenca modelada. El modelo hidrológico utilizado es una implementación del modelo Sacramento Soil Moisture Accounting, del cual se deriva una versión simplificada (Georgakakos et *al.*, 1996), un modelo conceptual muy utilizado para simular la respuesta hidrológica en una cuenca. Este modelo distribuye la precipitación en varias capas y reservorios, teniendo en cuenta procesos como la

percolación, evapotranspiración y flujo base.

La estructura del modelo consta de dos componentes con una formulación diferencial para modelar la secuencia de procesos de precipitación - escorrentía y traslación del hidrograma (Uriburu Quirno, 2011). El primer componente es el balance hídrico del suelo, que se divide en dos capas: una superior (X10), de respuesta más rápida, y una inferior (X20), de respuesta más lenta. La precipitación constituye el aporte de humedad a este componente, mientras que las pérdidas se deben a la evapotranspiración, el escurrimiento superficial y subterráneo, y la recarga del acuífero. El segundo componente simula el proceso de traslación y atenuación del hidrograma a lo largo de la red de drenaje mediante una cascada de dos embalses lineales conceptuales de igual tasa de recesión (α). La entrada al primer embalse es la suma de la escorrentía directa y la subterránea.

El hidrograma de salida de la cascada representa la salida final del modelo (Bianchi et al., 2012) En la Figura 8 se presentan de forma esquemática las relaciones funcionales que lo componen.

En esta aplicación, el modelo Sacramento —en su forma agregada— se ejecuta de manera independiente en cada subcuenca del sistema. Las subcuencas se modelan como unidades hidrológicas homogéneas, lo que permite representar adecuadamente el balance hídrico local sin introducir una discretización espacial interna. Sin embargo, el sistema conserva una estructura espacial explícita, ya que los caudales simulados en cada unidad se enlazan mediante modelos de propagación (retardos, funciones de traslación, sumatorias y esquemas de ruteo) que reproducen el transporte entre subcuencas. De este modo, la integración de las respuestas individuales permite obtener el hidrograma total en la sección de cierre del sistema.

Este enfoque corresponde a un modelo semi-distribuido, dado que combina la simplicidad del tratamiento agregado dentro de cada subcuenca con una representación explícita de la conectividad hidrológica y de la red de drenaje a nivel de cuenca.

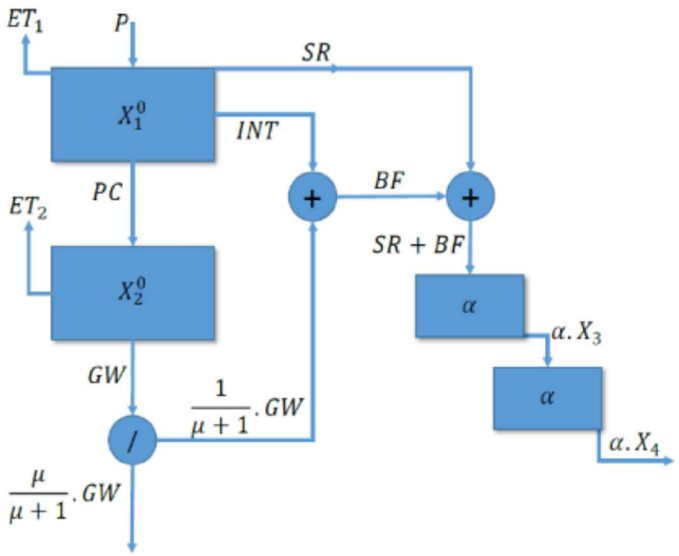


Figura 8. Representación esquemática del modelo Sacramento (Uriburu Quirno et al., 2011).

Se adopta el modelo Sacramento no sólo por su versatilidad y simplicidad relativa, sino también porque el Programa de Sistemas de Información y Alerta Hidrológica en Cuenca del Plata del Instituto Nacional del Agua cuenta con una vasta experiencia en su implementación (Uriburu Quirno et *al.*, 2006, 2011; Bianchi et *al.*, 2012; Guizzardi y Sabarots Gerbec, 2018).

Las ecuaciones que gobiernan los procesos, siguiendo la nomenclatura de Guetter (Guetter, 2000), son las siguientes:

$$\frac{dX_1}{dt} = P - SR - PC - ET_1 - INT$$

$$\frac{dX_2}{dt} = PC - ET_2 - GW$$

$$\frac{dX_3}{dt} = (SR - BF) - \alpha X_3$$

$$\frac{dX_4}{dt} = \alpha X_3 - \alpha X_4$$

donde:

dX_1 : Volumen de agua en la capa superior del suelo [L] (variable de estado)

dX_2 : Volumen de agua en la capa inferior del suelo [L] (variable de estado)

X_3 y X_4 : Almacenamientos en los reservorios lineales [L] (variables de estado)

P : Intensidad de la precipitación [L/T]

SR : Escurrimiento superficial [L/T]

PC : Tasa de percolación [L/T]

ET_1 : Tasa de evapotranspiración de la capa superior del suelo [L/T]

ET_2: Tasa de evapotranspiración de la capa inferior del suelo [L/T]

INT : Aporte al flujo base desde la capa superior del suelo [L/T]

GW : Aporte al flujo base y recarga del acuífero desde la capa inferior del suelo[L/T]

α : Inversa de la constante de recesión de los embalses lineales [1/T]

BF : Flujo base [L/T]

El escurrimiento superficial es una respuesta directa de la precipitación, producida solamente por la capa superior. Se calcula como:

$$SR = P.\left(\frac{X_1}{X_1^c}\right)^{m_1}$$

donde X^c_1 es la capacidad de la capa superior del suelo [L] y m_1 el exponente del escurrimiento superficial.

La evapotranspiración de la capa superior se calcula como el producto de la evapotranspiración potencial (PET) y la disponibilidad de agua:

$$ET_1 = PET.\left(\frac{X_1}{X_1^c}\right)$$

La percolación, como la transferencia de agua de la capa superior a la capa inferior, se calcula como una función no lineal de los almacenamientos en ambas capas:

$$PC = C_3.X_2^c.\left(1 + C_2.\left(1 - \frac{X_2}{X_2^c}\right)^{m_2}\right).\left(\frac{X_1}{X_1^c}\right)$$

donde:

X^c_2: Capacidad de la capa inferior del suelo [L]

C_3 : Tasa de recesión del flujo base [1/T]

C_2 : Coeficiente de la función de percolación [adimensional]

m_2: Exponente de la función de percolación [adimensional]

El aporte de la capa superior al flujo base se considera proporcional a la primera variable de estado a través del coeficiente de recesión C_1:

$$INT = C_!.X_1$$

La transpiración desde la capa inferior del suelo se calcula como:

$$ET_2 = (PET - ET_1).\left(\frac{X_2}{X_2^c}\right)^{m_3}$$

donde m_3 es un exponente de la función de transpiración [adimensional].

Luego, el aporte al flujo base y recarga del acuífero (GW) y el flujo base (BF) se calculan como:

$$GW = C_3.X_2$$

$$BF = (1-\mu)^{-1}.GW + INT$$

donde μ es un parámetro del modelo tal que GW/(1+μ) contribuye al flujo base mientras que GW.μ/(1+μ) es la recarga al acuífero.

Finalmente, el caudal de salida de la cuenca se calcula como una función lineal del almacenamiento en el segundo embalse de cascada:

$$Q_4 = \alpha.X_4$$

El código fuente de modelo hidrológico, se presenta en el **Error! Reference source not found.**.

7.1.2. Esquema de implementación

El ruteo de caudales aguas abajo de los cierres de cuenca se esquematiza teniendo en cuenta los tiempos de traslado y, en algunos casos, la laminación de los embalses (que puede llegar a ser intermensual). Este proceso de propagación de caudales entre subcuencas se define mediante una secuencia de operaciones encadenadas, en las cuales se combinan retardos temporales (*lag*), sumatorias de aportes (*sum*) y transformaciones hidráulicas simples que representan la laminación producida por

embalses o tramos de río (*reservoir_lamination*). A modo de ejemplo, la Figura 9 muestra la configuración del flujo hacia el punto de cierre en UHE Itumbiara del sistema Alto Paraná en Brasil.

El esquema de ruteo (*routing*) se describe en formato interoperable JSON, donde cada paso se define por un método ("lag", "sum", "reservoir_lamination") que opera sobre una o más fuentes de caudal (*sources*) y genera una serie de salida (*target*). El proceso se interpreta de la siguiente manera:

- Retardos unitarios (lag): se aplican desplazamientos temporales a las series de caudal simuladas de cada subcuenca expresados en horas. Por ejemplo, el paso: *{ "method": "lag", "sources": ["1"], "hours": 11, "target": "1_lag_64" }* indica que el caudal de la subcuenca 1 se retrasa 11 horas para representar el tiempo de viaje hasta el punto de control 64.

- Suma de aportes (sum): una vez aplicados los retardos, se combinan los caudales de diferentes subcuencas o tramos para formar un cauce principal. Por ejemplo: *{"method": "sum", "sources": ["2_lag_65", "3_lag_65", "4_lag_65", "65"], "target": "Paranaíba" }* representa la confluencia de los aportes de las subcuencas 2, 3 y 4 (ya retardados) junto con la contribución local del tramo 65, generando una nueva serie denominada Paranaíba.

- Laminación de embalses (reservoir_lamination): para representar el efecto de almacenamiento y atenuación de picos de crecida en grandes embalses, se aplica una transformación por convolución con un núcleo (kernel) de forma triangular. En el ejemplo: { "method": "reservoir_lamination", "source": "Itumbiara", "window": 300, "shape": "tri_inc" } se simula el comportamiento del embalse de Itumbiara mediante una laminación con ventana temporal de 300 días, utilizando un kernel triangular creciente (tri_inc). Este procedimiento atenúa las crecidas, reduciendo el caudal

máximo sin modificar el volumen total.

En conjunto, el proceso permite construir de forma flexible un modelo de propagación hidrológica–hidráulica simplificada, donde cada tramo o embalse se representa mediante reglas elementales, pero físicamente interpretables:

- Lags para los tiempos de viaje,
- Sums para la confluencia de aportes, y
- Reservoir_lamination para los efectos de regulación y almacenamiento.

Este enfoque modular facilita la calibración, el mantenimiento y la extensión del modelo, permitiendo representar redes complejas de ríos y sistemas de presas a partir de una descripción transparente y fácilmente modificable.

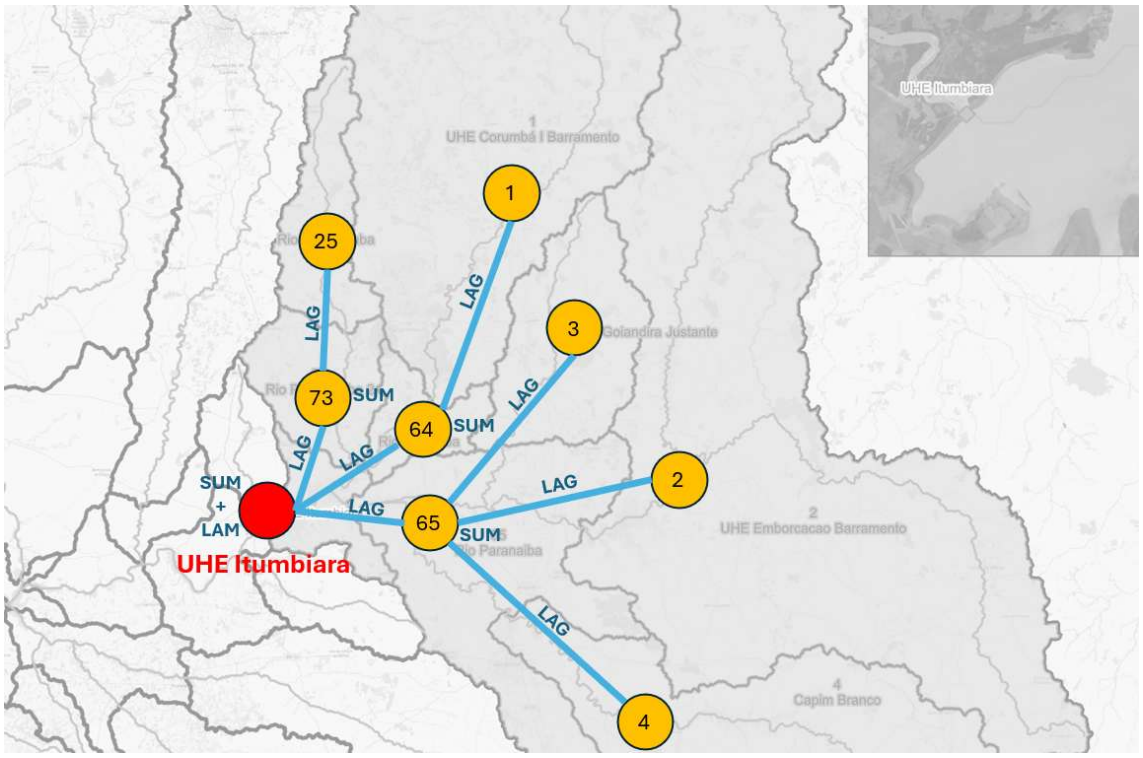


Figura 9. Ejemplo del esquema de ruteo

7.2. MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El principal antecedente de estudio de proyecciones de Cambio Climático en Cuenca del Plata remite al Análisis Diagnóstico Transfronterizo de la Cuenca del Plata (CIC-PLATA, 2016). En ese marco, se realizaron modelaciones según países, siendo que en Argentina, Bolivia, Paraguay y Uruguay se trabajó con el modelo Témez-CHAC, de paso de tiempo mensual, y en Brasil con el modelo MGB-IPH, con paso diario. Se forzaron los modelos con proyecciones de modelos climáticos globales (CMIP5, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*, IPCC AR5, Informe de Evaluación, 2013-2014) bajo los escenarios de emisiones (RCP, *Representative Concentration Pathway)* moderadas (RCP 4.5) y altas RCP 8.5 , para los períodos futuros 2030-2039, 2040-2069 y 2070-2099, que luego se compararon con una línea de base histórica (1961-1990). En general se presenta tendencia negativa en los caudales medios en la mayor parte de la cuenca; lo que se intensifica con el tiempo y es más severa bajo el escenario de altas emisiones (RCP 8.5), llegando a proyectarse disminuciones superiores al 20% en algunas subcuencas para fines de siglo.

En este trabajo la estrategia de modelación es integral, garantizando un abordaje metodológicamente consistente de toda la cuenca del río Paraná. El modelo utilizado es el presentado en el ítem 7.1 y los forzantes diarios se obtienen de las proyecciones de modelos climáticos globales actuales (CMIP6, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, Informe de Evaluación IPCC, 2021-2022). Los escenarios temporales futuros se corresponden con los periodos 2020-2040 (corto), 2041-2060 (mediano) y 2081-2100 (largo), mientras que la situación presente se considera el periodo 2005-2015.

Las proyecciones climáticas de los modelos climáticos globales del CMIP6 son

analizadas bajo distintas Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP por sus siglas en inglés) que describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico, incluyendo factores tales como la población, el crecimiento económico, la educación, la urbanización y el ritmo de desarrollo tecnológico. Las trayectorias SSP pueden combinarse con trayectorias de RCP que implican diferentes niveles de mitigación, con consecuencias para la adaptación.

El escenario SSP1-2.6 (emisiones bajas) sigue una trayectoria de forzamiento global bajo RCP2.6 (forzamiento radiativo alcanza 2.6 W/m2 en 2100). Con respecto a otras trayectorias, este presenta un nivel bajo de desafío tanto de mitigación como de adaptación (es decir, alta capacidad de adaptación). Por otra parte, el escenario SSP2-4.5 (emisiones medias) sigue aproximadamente la trayectoria de forzamiento global medio RCP4.5 (forzamiento radiativo alcanza 4.5 W/m2 en 2100) con condiciones socioeconómicas SSP2 (que presenta un nivel medio de desafíos de mitigación y un nivel medio de desafíos de adaptación). Por otro lado, el escenario SSP5-8.5 (emisiones muy altas) sigue aproximadamente la trayectoria de forzamiento global alto RCP8.5 con condiciones socioeconómicas SSP5 (que presenta un nivel alto de desafíos de mitigación, pero un nivel bajo de desafíos de adaptación).

Las series de variables climáticas que describen los escenarios futuros se obtienen de las simulaciones disponibles en la base de datos NEX-GDDP-CMIP6 (*NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*). Este dataset está compuesto por escenarios climáticos globales de escala reducida (*downscaled*), derivados de las simulaciones contempladas en CMIP6 y a través de los cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SSP) (Thrasher et *al.*, 2021, 2022). El propósito de esta

base de datos es proporcionar un conjunto de proyecciones de cambio climático globales, de alta resolución y corregidas por sesgo que puedan utilizarse para evaluar los impactos del cambio climático en procesos que son sensibles a gradientes climáticos de alta resolución y a los efectos topográficos locales en las condiciones climáticas. Queda fuera del alcance correcciones adicionales sobre los modelos climáticos sobre la base de observaciones.

Para el presente análisis de proyecciones climáticas en la cuenca del río Paraná, se seleccionaron cinco modelos globales acoplados de la fase CMIP6: ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0, MIROC-ES2L y NorESM2-MM. En el estudio realizado por el MAyDS (2023), estos cinco modelos seleccionados demostraron el mejor desempeño en el ámbito de la Argentina, de acuerdo a los valores del Índice Único de Validación de Modelos Climáticos (IUVM), un indicador de la representación del clima observado. A continuación, se detallan las nomenclaturas de cada modelo:

- **ACCESS-CM2**: Australian Community Climate and Earth-System Simulator – Coupled Model version 2 (Australia
- **BCC-CSM2-MR**: Beijing Climate Center – Climate System Model version 2 – Medium Resolution (China)
- **INM-CM5-0**: Institute of Numerical Mathematics – Climate Model version 5.0 (Rusia)
- **MIROC-ES2L**: Model for Interdisciplinary Research on Climate – Earth System version 2 for Long-term simulations (Japón)
- **NorESM2-MM**: Norwegian Earth System Model version 2 – Medium resolution, Medium complexity (Noruega)

En la Tabla 2 se presentan las series obtenidas.

Tabla 2. Series históricas y de proyecciones utilizadas.

Modelo	Escenario	Fecha de inicio	Fecha de finalización
ACCESS-CM2	Historical	1990-01-01	2014-12-31
ACCESS-CM2	SSP1-2.6	2015-01-01	2100-01-31
ACCESS-CM2	SSP2-4.5	2015-01-01	2100-01-31
ACCESS-CM2	SSP5-8.5	2015-01-01	2100-01-31
BCC-CSM2-MR	Historical	1990-01-01	2014-12-31
BCC-CSM2-MR	SSP1-2.6	2015-01-01	2100-01-31
BCC-CSM2-MR	SSP2-4.5	2015-01-01	2100-01-31
BCC-CSM2-MR	SSP5-8.5	2015-01-01	2100-01-31
INM-CM5-0	Historical	1990-01-01	2014-12-31
INM-CM5-0	SSP1-2.6	2015-01-01	2100-01-31
INM-CM5-0	SSP2-4.5	1990-01-01	2100-01-31
INM-CM5-0	SSP5-8.5	1990-01-01	2100-01-31
MIROC-ES2L	Historical	1990-01-01	2014-12-31
MIROC-ES2L	SSP1-2.6	1990-01-01	2100-01-31
MIROC-ES2L	SSP2-4.5	1990-01-01	2100-01-31
MIROC-ES2L	SSP5-8.5	1990-01-01	2100-01-31
NorESM2-MM	Historical	1990-01-01	2015-01-01
NorESM2-MM	SSP1-2.6	1990-01-01	2100-01-31
NorESM2-MM	SSP2-4.5	1990-01-01	2100-01-31
NorESM2-MM	SSP5-8.5	1990-01-01	2100-01-31

8. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS

8.1. DELIMITACIÓN DE SUBCUENCAS

La delimitación de subcuencas se hizo en primera instancia a partir de características topográficas del sistema y en segunda instancia a partir de la disposición de datos de caudal. En aquellos sistemas que no responden estrictamente a una dinámica horizontal predominante se consideraron criterios morfológicos y ambientales para su definición (pantanal, abanicos fluviales, entre otros).

Se trabajó con agrupamientos por zonas de acuerdo a características físicas de las cuencas y presencia de grandes presas o confluencias de grandes ríos. Para ello se definieron 6 sistemas de interés (Figura 10).

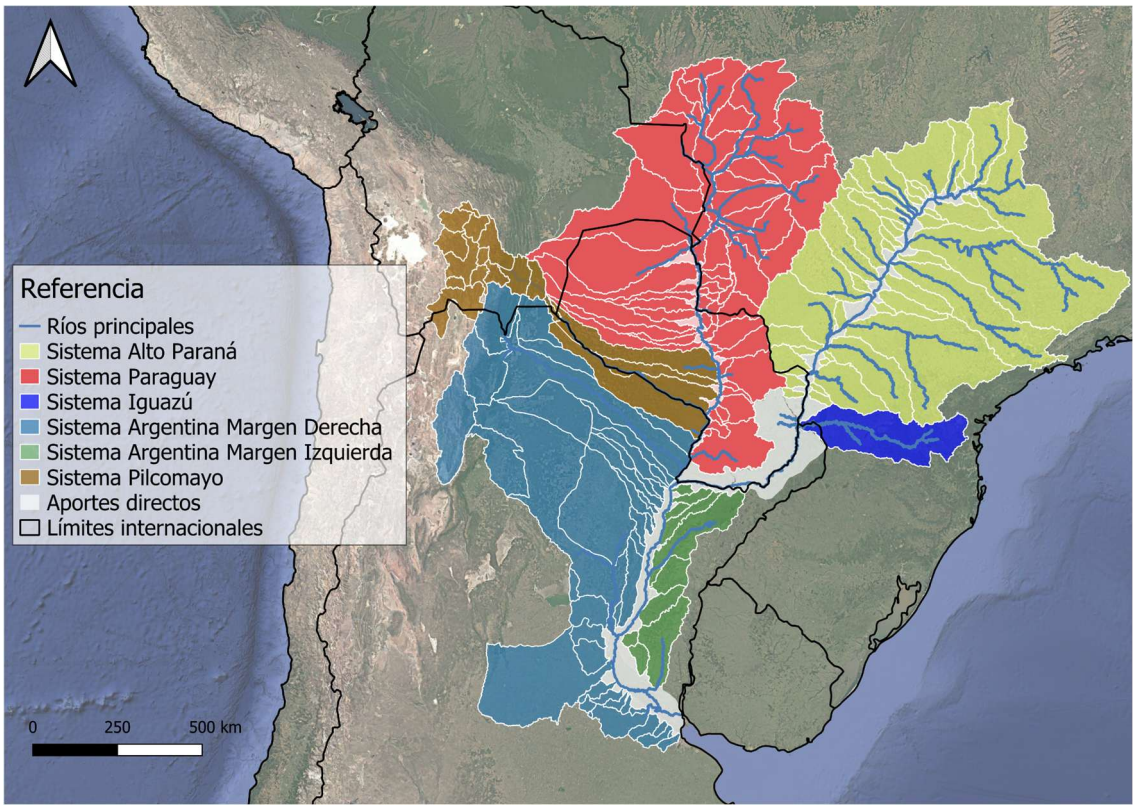


Figura 10. Principales sistemas dentro de la cuenca del río Paraná.

8.2. PARÁMETROS DEL MODELO HIDROLÓGICO

Esta sección se centra en la caracterización de la topografía, el suelo y los usos del suelo de cada subcuenca. Este análisis detallado permite definir parámetros del modelo hidrológico en función de las características físicas específicas de cada cuenca. La integración de estos datos reduce significativamente la cantidad de parámetros del modelo a calibrar, pasando de 10 a 5 (C_1, m_1, m_2, m_3 y m_u), lo que simplifica considerablemente su complejidad. Esta reducción es particularmente beneficiosa para cuencas sin series observadas de caudales, donde la calibración directa no es posible.

A partir del MDE, se calcula el área de cada subcuenca y se obtienen la altura mínima, máxima y la variación de altura del terreno. A su vez se calcula la pendiente media de cada cuenca y se estima el almacenamiento superficial usando una relación lineal basada en la pendiente (Figura 11).

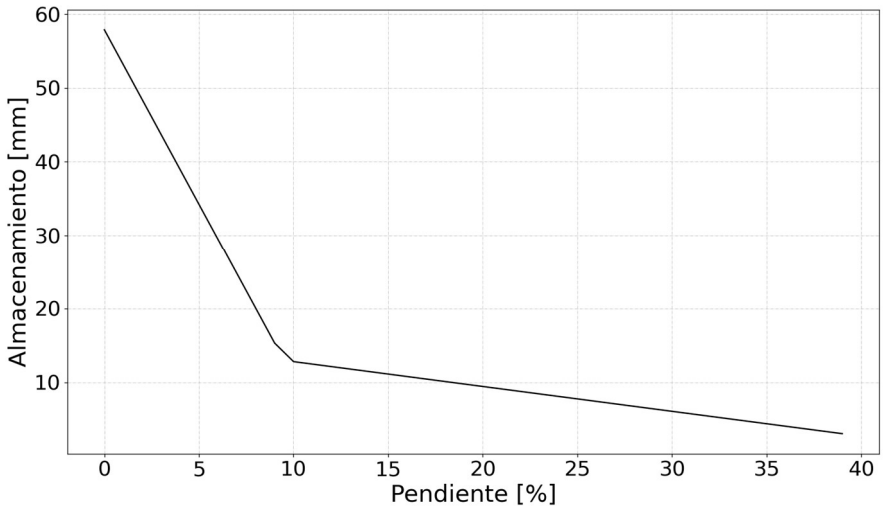


Figura 11. Almacenamiento máximo ilustrativo en depresiones por pendiente.

El ráster de tipos de suelo se superpone con los polígonos de las cuencas, obteniendo así la distribución espacial de las clases de suelo. A cada clase de suelo se le asigna una capacidad de drenaje predefinida en milímetros por día, y se calcula un promedio ponderado por el área de cada clase, obteniendo la capacidad de drenaje global de la cuenca (Tabla 3). De manera similar, se mapean los tipos de uso del suelo a través de un ráster y se calcula la intercepción en vegetación y el espesor de la zona de raíces, ponderando por el área de cada tipo de uso (Tabla 4).

Tabla 3. Permeabilidad del suelo y rangos de conductividad hidráulica (adaptado de FAO (2015) y Schoeneberger et al. (2012).

ID	Clase	Conductividad hidráulica mínima (cm/día)	Conductividad hidráulica máxima (cm/día)
1	V - Muy baja (Very slow)	0.00	0.09
2	P - Lenta (Slow)	0.09	0.86
3	I - Moderadamente lenta (Moderately slow)	0.86	3.89
4	M - Moderada (Moderate)	3.89	38.9
5	W - Moderadamente rápida (Moderately rapid)	38.9	86.4
6	S - Rápida (Rapid)	86.4	864
7	E - Muy rápida (Very rapid)	864	960

Tabla 4. Intercepción de la vegetación (mm) y espesor de la zona de raíces (m) (Guinzburg et al., 2014 y Guizzardi y Sabarots Gerbec, 2018) .

Cobertura	Intercepción (mm)	Espesor (m)
agua	0	0
árboles	9	2.9
humedales	0	0
pastizales	3	0.81
cultivos	1	0.61
área construida	0	0
desnuda	0	0

El almacenamiento superficial (X^c_1) se calcula combinando la intercepción de la vegetación y el almacenamiento por pendiente, mientras que el almacenamiento subsuperficial se basa en el espesor de la zona de raíces y la porosidad del suelo.

La estimación de los parámetros C_2 y C_3 se realiza a partir de la ecuación de infiltración del modelo, asumiendo que, bajo condiciones de máxima infiltración, esta es igual al drenaje máximo estimado anteriormente según los datos de suelo. Esta condición se da cuando el almacenamiento superior (X_1) se encuentra en su capacidad máxima y el almacenamiento inferior (X_2) completamente vacío. La ecuación resultante es la siguiente:

$$PC = C_3 . X_2^c . (1 + C_2)$$

El valor de C_2 se fija en 100, mientras que el valor de C_3 se optimiza para ajustar la ecuación objetivo para cada subcuenca.

Para la estimación del flujo máximo se utiliza la herramienta SAGA GIS, aplicando el módulo "Fill Sinks" (Wang y Liu) al MDE para eliminar depresiones, y luego calculando la longitud máxima de flujo con el módulo de hidrología.

El cálculo de la pendiente y los tiempos de concentración del curso principal de la cuenca se basan en la diferencia de altura entre los puntos más altos y bajos y la longitud de flujo obtenida. Se emplean tres métodos para estimar el tiempo de concentración: SCS (*Soil Conservation Service*), Kirpich y Témez. Dependiendo de la pendiente y el área de la cuenca, se obtiene un valor promedio ponderado que se convierte en el parámetro alfa (α), clave para la estimación de la respuesta hidrológica de la cuenca.

8.3. LIMITACIONES

Si bien el modelo propuesto se ajusta a los requerimientos del proyecto, existen algunos aspectos propios de la cuenca que resultan en una menor performance en la comparación entre caudales simulados y observados, en especial cuando se analiza a paso diario.

8.3.1. Aprovechamientos hidráulicos y regulación

Como se mencionó en la sección 6.6, debido a la presencia de aprovechamientos hidroeléctricos, en especial en la alta cuenca del río Paraná, algunas de las series de caudales observados no reflejan el régimen hidrológico. En cambio, muestran la modulación que surge de la operación de las centrales. Esto se observa fuertemente a paso diario manifestándose especialmente en la operación diaria (ver Figura 12). Inclusive, dependiendo de la capacidad de las presas, la modulación de los caudales puede afectar el régimen hidráulico en una escala trimestral (Figura 13).

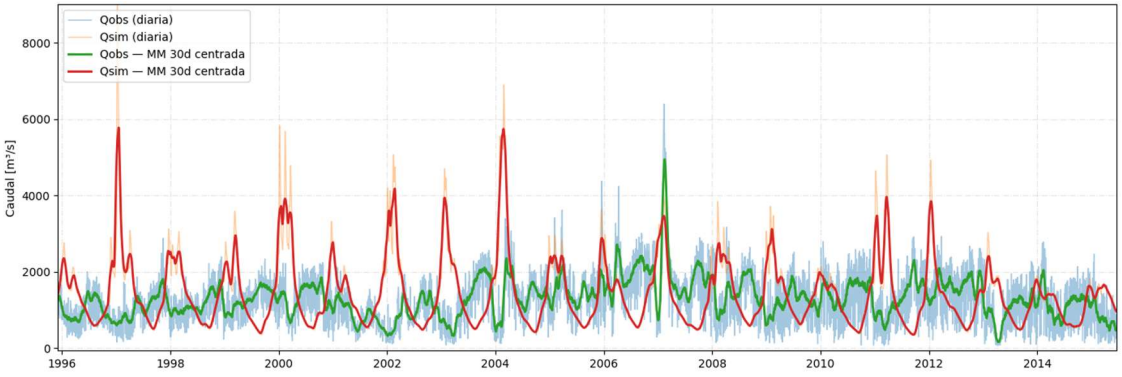


Figura 12. Medias mensuales y desvíos de las series Qsim (sin laminación) vs Qobs:

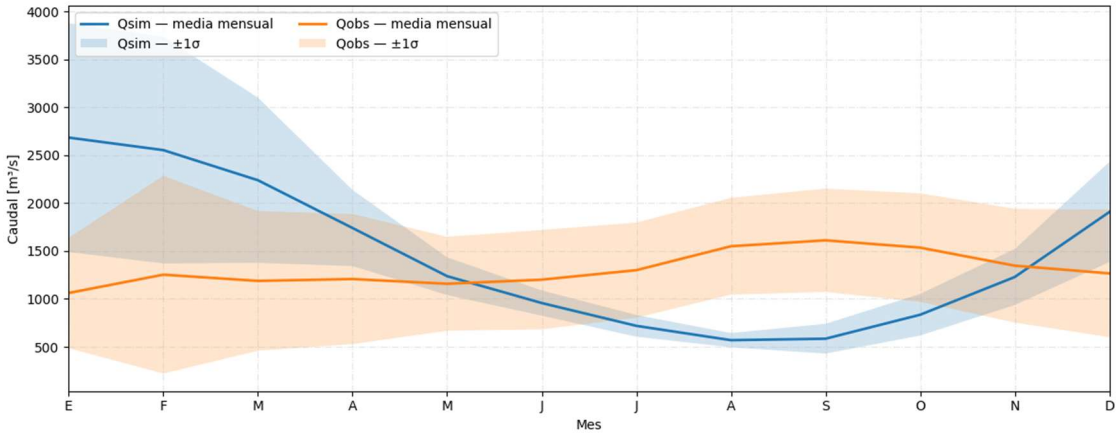


Figura 13. Serie Qsim (sin laminación) vs Qsim luego de la laminación:

Dada la complejidad en la simulación de las políticas de operación y siendo que el estudio se enfoca en la evaluación de escenarios futuros a largo plazo, para poder cuantificar la performance del modelo hidrológico en estos casos se realizó una agregación temporal y se obtuvieron comparaciones interanuales entre los volúmenes escurridos observados y simulados.

8.3.2. Cuencas de baja pendiente y balance vertical

Aunque la estructura conceptual del modelo Sacramento es flexible, presenta limitaciones cuando se aplica en cuencas cuya respuesta está dominada casi exclusivamente por el balance vertical con escasa generación de escorrentía rápida (precipitación – infiltración – almacenamiento – evapotranspiración). Esto se manifiesta en subcuencas de margen derecha del río Paraguay (abanico aluvial del río Pilcomayo) o las de margen derecha en territorio argentino, como los Bajos Submeridionales.

Entre las limitaciones principales que generan una respuesta hidrológica deficiente, se encuentran:

1. Sensibilidad limitada a procesos verticales y recarga profunda. En cuencas donde la percolación domina, el modelo tiene poca flexibilidad para representar la recarga lenta y puede presentar poca precisión en la simulación del flujo base.

2. Dificultad para representar evapotranspiración asociada a reservas profundas. El modelo Sacramento usa una formulación estándar de evapotranspiración, por lo que no captura bien situaciones donde la vegetación extrae agua de capas profundas o controladas por el nivel freático.

3. Representación insuficiente de la heterogeneidad vertical del suelo. Suelos estratificados o con grandes contrastes de conductividad requieren más detalle vertical del que el modelo Sacramento puede ofrecer.

4. Limitaciones en cuencas con escasa escorrentía superficial. En sistemas de infiltración dominante, donde casi toda el agua se almacena o evapotranspira, el modelo tiende a sobreestimar la escorrentía o a necesitar calibraciones poco realistas.

5. Falta de una representación explícita del nivel freático somero. El modelo no incluye un módulo que simule la fluctuación del nivel freático, por lo que no reproduce bien respuestas asociadas a zonas saturadas superficiales.

8.3.3. Datos de caudal observados

Si bien estas limitaciones son inherentes al modelo hidrológico y a la representación conceptual adoptada, es importante señalar que la calidad de los datos observados constituye un factor decisivo en el desempeño de cualquier esquema de modelación hidrológica. En particular, la falta de series confiables de caudales observados restringe significativamente la capacidad de evaluar la respuesta simulada y ajustar adecuadamente los parámetros del modelo. La disponibilidad de registros consistentes, continuos y representativos es un requisito fundamental para validar la dinámica hidrológica.

En varias de las subcuencas analizadas (en particular en el río Pilcomayo y Paraguay), la principal limitación no proviene del modelo en sí, sino de la ausencia de relaciones altura–caudales consistentes, o de aforos que permitan construirlas y actualizarlas con confianza. Sin estos insumos, resulta difícil calibrar las componentes más sensibles del modelo, lo que introduce incertidumbre adicional en los resultados.

8.3.4. Precipitaciones

El uso de datos de precipitación del *Climate Prediction Center* (CPC) en lugar de mediciones en campo presenta varias limitaciones para la modelación hidrológica mediante el modelo Sacramento. En primer lugar, la resolución espacial de los productos CPC, generalmente de 0.25° o 0.5° (aproximadamente 25 a 50 km), puede resultar insuficiente para representar la variabilidad de la lluvia dentro de una cuenca, especialmente en regiones con fuertes gradientes orográficos o alta heterogeneidad espacial de las precipitaciones. Esta falta de detalle espacial puede afectar la estimación de los aportes efectivos de agua al sistema, generando errores en la simulación de los procesos de escorrentía superficial y subterránea.

Además, la resolución temporal de los productos CPC suele ser diaria, lo cual limita la capacidad del modelo para reproducir eventos intensos y de corta duración, como tormentas convectivas, que son relevantes para la formación de picos de caudal y la respuesta hidrológica rápida. El modelo Sacramento, en sus configuraciones más detalladas, puede requerir información de precipitación subdiaria para representar adecuadamente los procesos de almacenamiento y liberación de agua en los distintos compartimientos del suelo.

Otro aspecto relevante es la presencia de sesgos sistemáticos en las estimaciones CPC, derivados de la combinación de datos satelitales y observaciones terrestres. En regiones con baja densidad de estaciones, los algoritmos tienden a subestimar las lluvias intensas y sobreestimar las de baja magnitud, lo que introduce incertidumbres en el balance hídrico del modelo. En zonas montañosas, estos errores se amplifican debido a la limitada capacidad de los sensores satelitales para captar los efectos orográficos. En consecuencia, los parámetros del modelo Sacramento calibrados con lluvias CPC pueden compensar estos errores de entrada, resultando en ajustes no representativos de las condiciones físicas reales y con baja capacidad predictiva fuera del periodo de calibración.

9. CALIBRACION Y VALIDACION

La evaluación de la performance de los modelos hidrológicos se realizó mediante el análisis conjunto de indicadores estadísticos y volumétricos, con el objetivo de cuantificar la capacidad del modelo para reproducir las condiciones observadas en las cuencas calibradas.

Durante la etapa de calibración, se ajustaron los parámetros del modelo hasta alcanzar una adecuada representación de los caudales observados. Para evaluar el grado de ajuste entre las series simuladas y observadas, se calcularon los siguientes indicadores de desempeño: Error Cuadrático Medio (RMSE), Error Medio Absoluto (MAE), Coeficiente de Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) y Coeficiente de Determinación (R^2). Adicionalmente, se calcularon los caudales medios observados y simulados durante el período de simulación, a fin de evaluar el comportamiento volumétrico global del modelo.

Posteriormente, se realizó una calibración de volúmenes anuales, analizando los volúmenes observados y simulados para cada año del período de estudio. En esta etapa, la evaluación de desempeño se efectuó mediante el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Sesgo Porcentual Mediano ($Bias_{med}$), a fin de evitar la influencia de valores anómalos en el cálculo del sesgo promedio.

9.1. INDICADORES

Error cuadrático medio (RMSE): este indicador establece cuán alejados están los puntos en el plano Q_{OBS} VS Q_{SIM} de una recta de pendiente unitaria que pasa por el origen.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{n}} \qquad [RMSE] = L^3T^{-1}$$

Donde n es el número de etapas de tiempo del período de simulación, i es el índice de tiempo tal que Q_{OBS} y Q_{SIM} son las descargas observadas y simuladas en el paso i.

Error medio absoluto (MAE): Cuantifica, en promedio, cuán alejadas están las descargas simuladas Q_{SIM} de las observadas Q_{OBS}:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Q_{obs,i} - Q_{sim,i}|$$

Donde n es el número de etapas de tiempo del período de simulación, i es el índice de tiempo tal que Q_{OBS} y Q_{SIM} son las descargas observadas y simuladas en el paso i.

Nash-Sutcliffe (E): Parte de una función objetivo (F) basada en la suma de los cuadrados de las diferencias entre los caudales simulados y observados. La calibración busca minimizar esta función, es decir, reducir el error entre ambas series. Como F depende de las unidades de caudal y del período analizado, Nash y Sutcliffe (1970) propusieron un índice adimensional que expresa la proporción de la varianza observada explicada por el modelo, definido como:

$$E = 1 - \frac{\sum(Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Error volumétrico: es la diferencia entre el volumen total simulado y el volumen total observado:

$$Error\ Volumétrico = V_{sim} - V_{obs}$$

El indicador que se utilizó divide esta diferencia por el volumen observado y la multiplica por 100, a fin de obtener un porcentaje.

Error porcentual mediano (Bias): evalúa la tendencia sistemática del modelo a sobreestimar o subestimar los volúmenes anuales observados, considerando la mediana de los errores relativos para evitar la influencia de valores anómalos. Un valor positivo indica que el modelo tiende a sobreestimar el volumen anual, mientras que un valor negativo refleja una subestimación:

$$Bias_{med} = \text{Mediana}\left(\frac{V_{sim,i} - V_{obs,i}}{V_{obs,i}} \times 100\right)$$

$$[Bias_{med}] = \%$$

9.2. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de calibración en los distintos subdominios de análisis (ej. Alto Paraná, Iguazú, Paraguay, Pilcomayo, etc.). La ventana de tiempo para el proceso de calibración fue entre 2000 y 2025, pero no en todas las cuencas se dispuso de una extensión de datos tal, por lo que se realizó el ajuste del modelo hidrológico en función de los datos disponibles.

Por otra parte, cabe destacar que no todas las cuencas han tenido el mismo tratamiento en el proceso de implementación, ya que en algunos casos no se dispone de datos medidos, o los mismos son inconsistentes.

En este sentido, la Figura 14 presenta el estado de modelación hidrológica al momento del presente informe, en el cual se ha priorizado concentrar el esfuerzo de modelación sobre las áreas de mayor aporte de caudal: Alto Paraná, Iguazú, Paraguay y Pilcomayo.

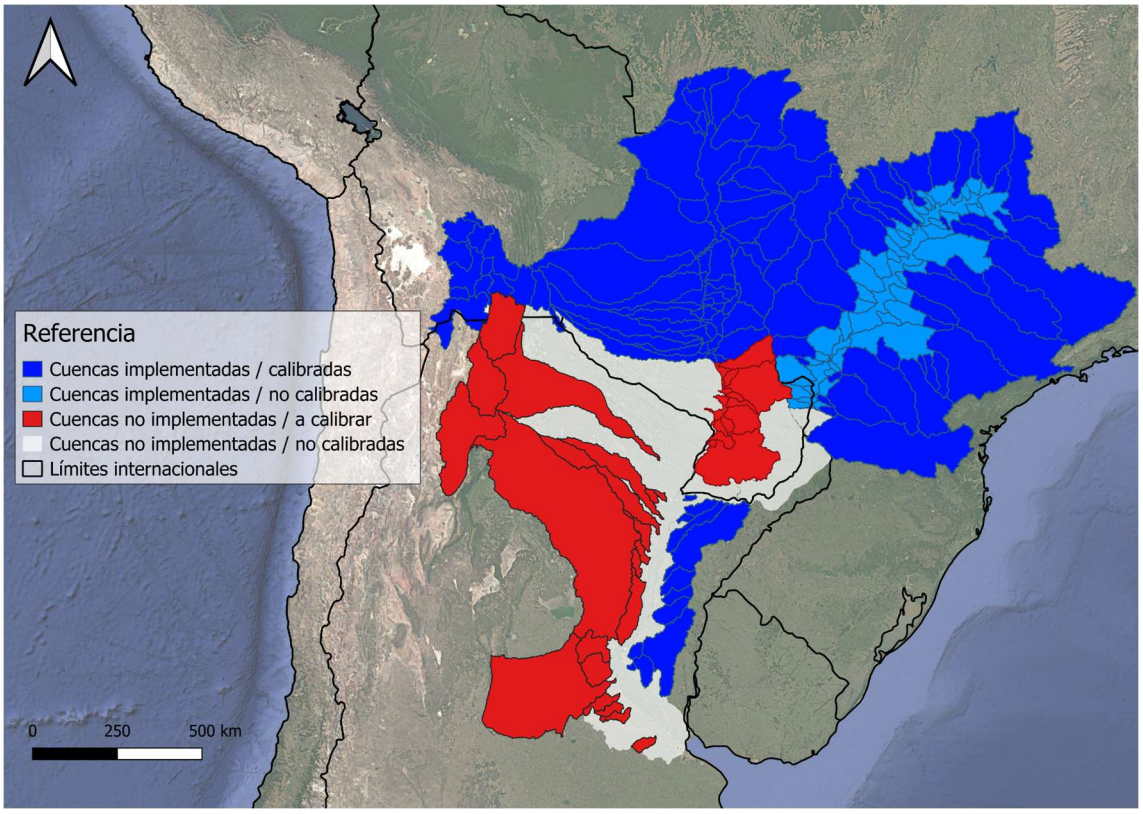


Figura 14. Situación actual del esquema de modelación hidrológica: cuencas implementadas (calibradas y no calibradas) y no implementadas.

Se presentan a continuación las series de caudales y volúmenes anualizados según el ciclo hidrológico para las principales cuencas de aporte. En la Figura 15 se muestra la ubicación de los cierres de cuenca con los que se comparan los resultados de la modelación hidrológica.

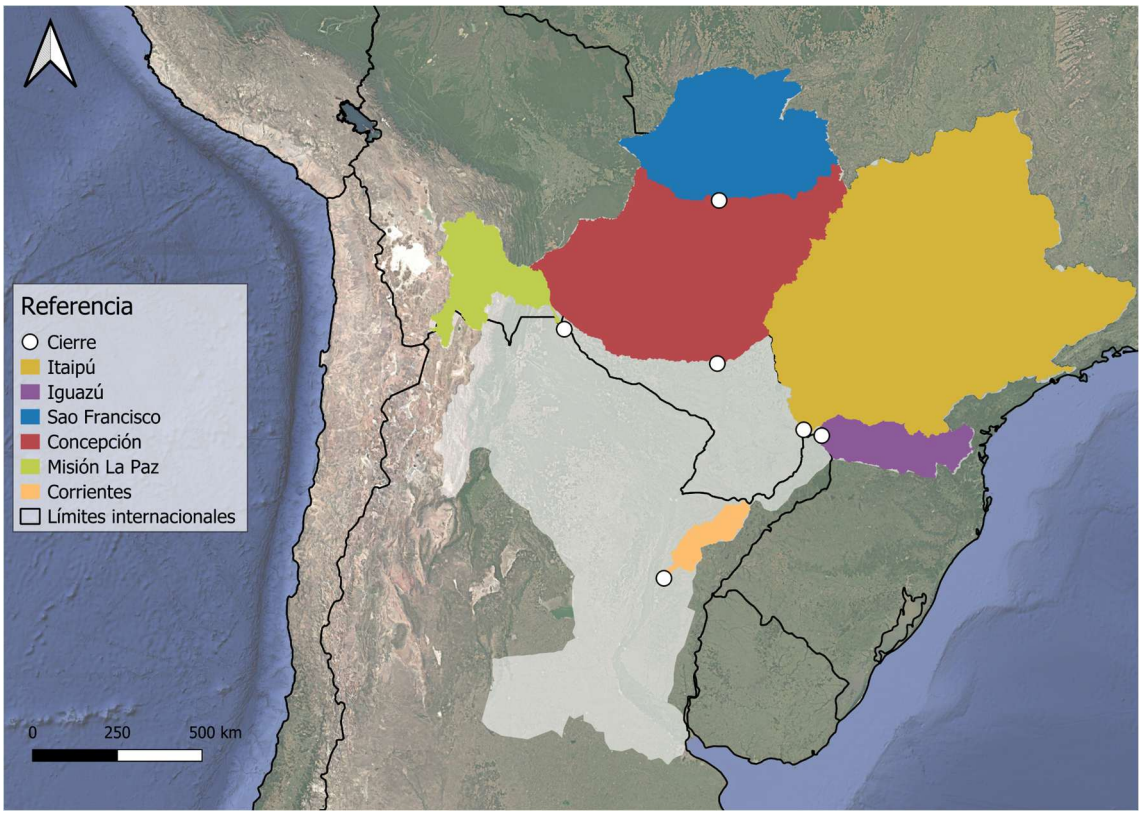


Figura 15. Estaciones de control de la modelación hidrológica de acuerdo a la subdivisión en sistemas.

9.2.1. Alto Paraná

Se toma el cierre en Itaipú, que constituye una condición de borde del modelo hidrodinámico, y los caudales y volúmenes se muestran a continuación. Para facilitar filtrar la operación diaria de la central, se incorpora la media móvil con una ventana de 30 días. Se destaca un acuerdo satisfactorio teniendo en cuenta el grado de agregación (Figura 16), ya que la salida de caudales en Itaipú tiene en cuenta no solo procesos hidrológicos y ruteo de caudales, sino también la regulación de la cuenca producto del manejo de los embalses. La **Figura 17** muestra la comparación en volúmenes anuales, que permite visualizar una escala mayor donde la regulación de los embalses no se ve reflejada.

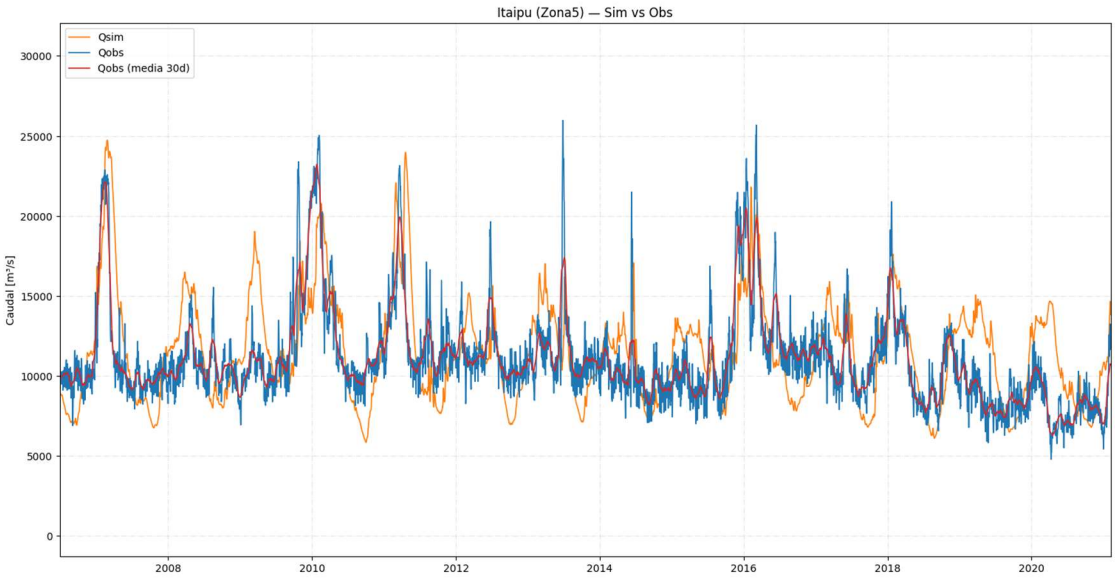


Figura 16. Caudal medio diario simulado y observado en la estación de control Itaipú (Alto Paraná) para el período 2007-2020.

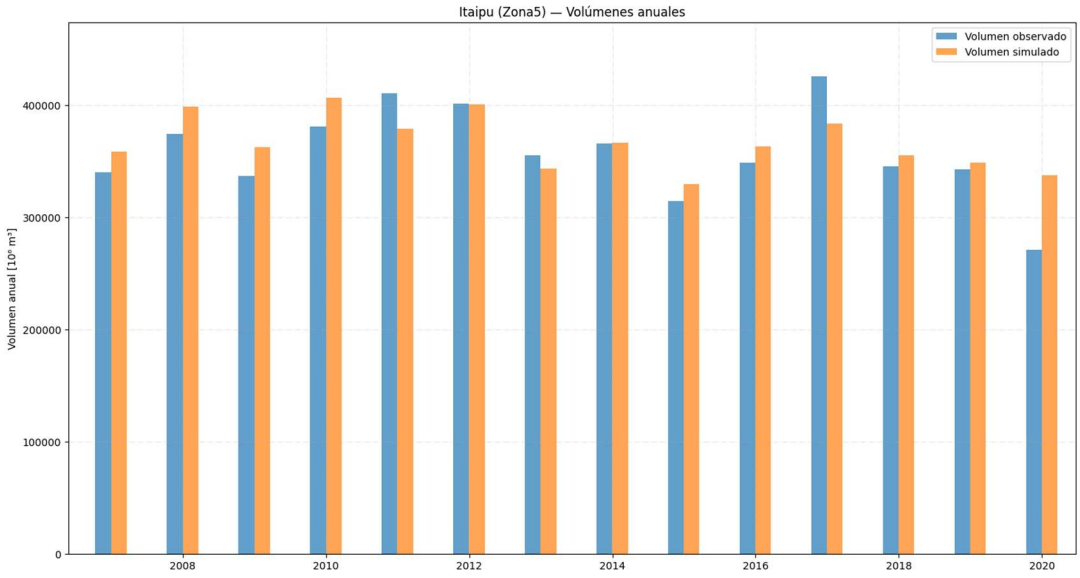


Figura 17. Volúmenes anuales simulados y observados en la estación de control Itaipú (Alto Paraná) para el período 2007-2020.

9.2.2. Iguazú

En el caso de la cuenca del río Iguazú, se tiene una topología de modelación simplificada, no solo por la extensión de la cuenca, sino también por la respuesta de la misma. Se observa que pese a que la cuenca está regulada (seis hidroeléctricas sobre el curso principal), por las pendientes de la cuenca, la característica de las crecidas, el modelo hidrológico tiene un buen desempeño en relación a los datos observados. La Figura 18 presenta los caudales en el cierre coincidente con la estación Andresito.

La **Figura 19**, presenta la comparación en términos de volúmenes anuales, observándose buen acuerdo entre simulado y observado, con excepción del período 2013-2016, con una subestimación de volúmenes por parte de la modelación.

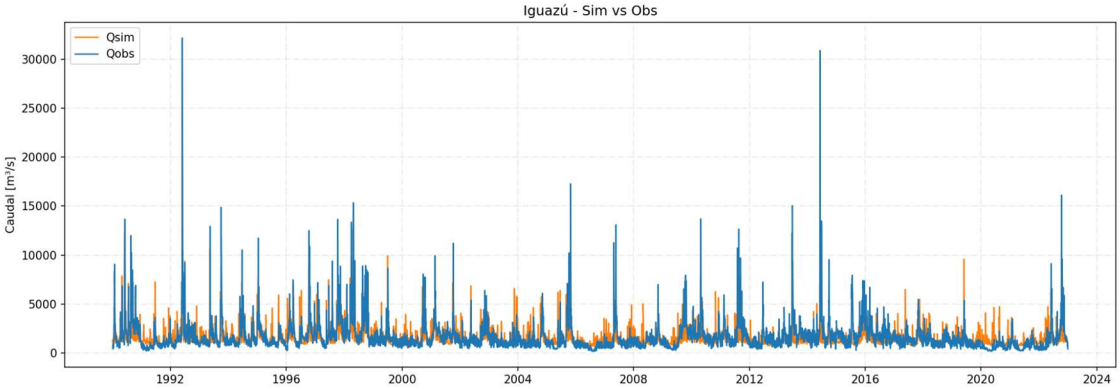


Figura 18. Caudal medio diario simulado y observado en la estación de control Andresito (Iguazú) para el período 1992-2023.

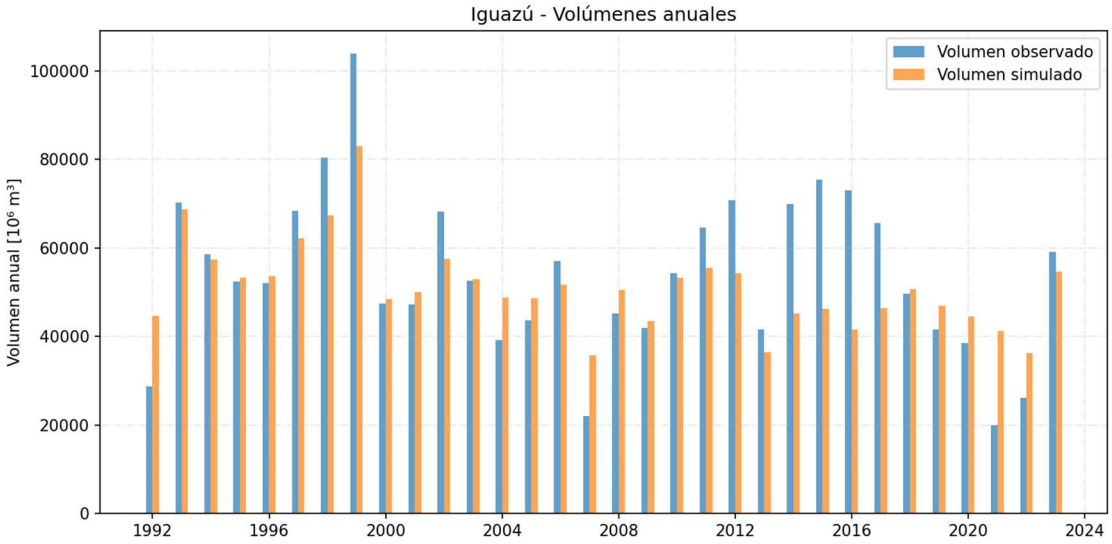


Figura 19. Volúmenes anuales simulados y observados en la estación de control Andresito (Iguazú) para el período 1992-2023.

9.2.3. Paraguay

En el río Paraguay se tiene dos señales marcadas, la primera a la salida del Pantanal, que funciona como un reservorio natural que regula los caudales de la alta cuenca, y la segunda, aguas abajo, donde además del traslado de los caudales del Pantanal, se incorpora el aporte en ruta de distintas cuencas a ambas márgenes.

Para el primer caso, se presenta la comparación entre caudales simulados y observados para la estación de control de Porto São Francisco, en Brasil, a la salida del Pantanal (Figura 20). Tanto en caudales como en volúmenes (Figura 21), se observa una buena correlación entre simulado y los registros.

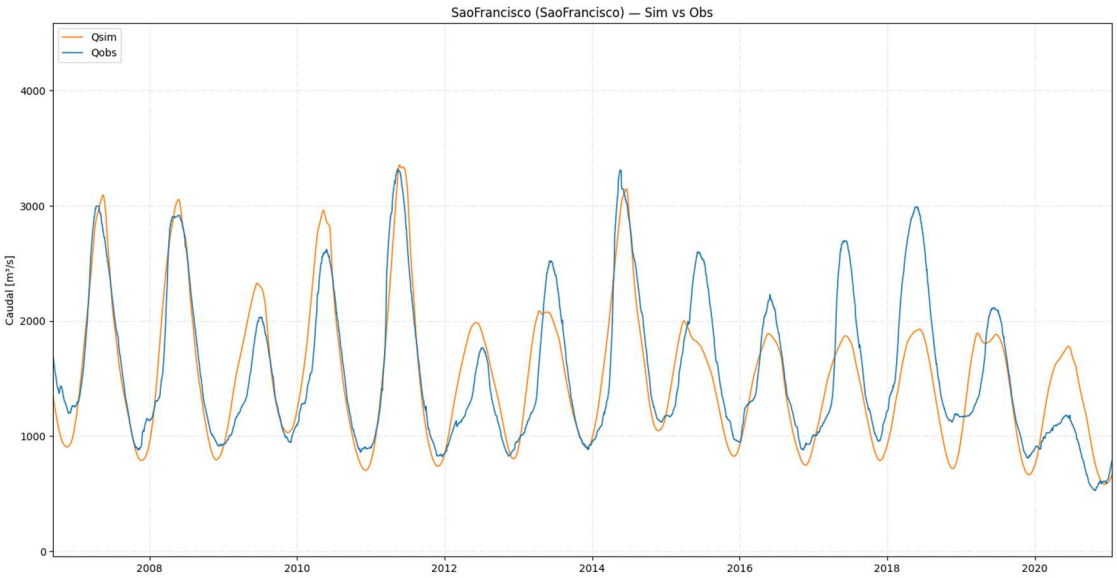


Figura 20. Caudal medio diario simulado y observado en la estación de control Porto São Francisco (Paraguay) para el período 2007-2020.

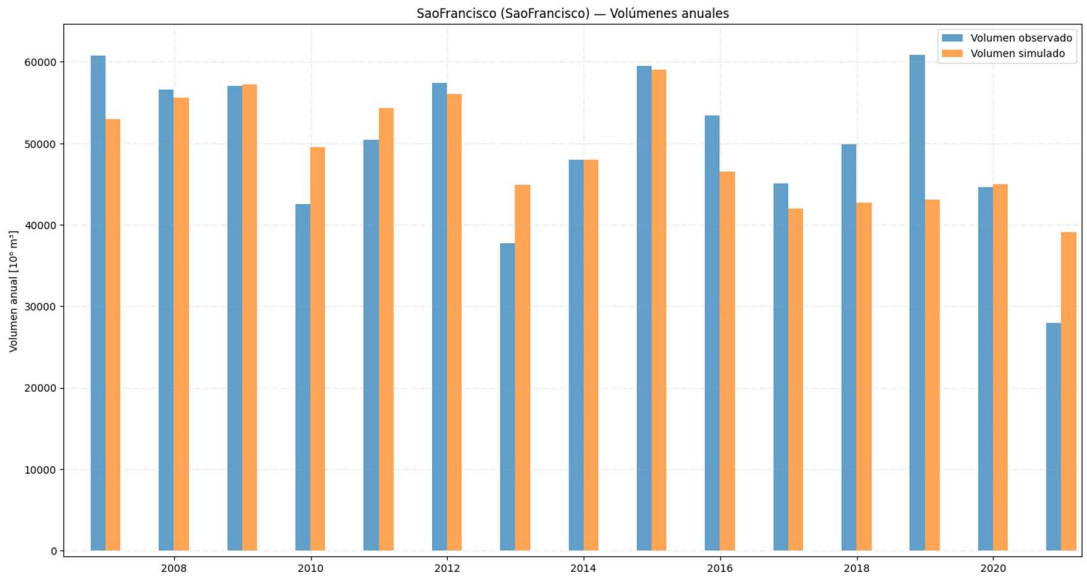


Figura 21. Volúmenes anuales simulados y observados en la estación de control Porto São Francisco (Paraguay) para el período 2007-2020.

Luego, aguas abajo, las Figura 22 y Figura **23** presentan los resultados obtenidos en la estación de Concepción, en Paraguay. Si bien sería conveniente obtener la comparación en la sección correspondiente a Asunción, por ser condición de borde del modelo hidrodinámico, se detectaron inconsistencias en los datos de caudales observados sobre el último tramo del río Paraguay. Por otra parte, teniendo en cuenta que en ese tramo (Concepción - Asunción) el aporte en ruta es menor, en comparación con el resto de la cuenca, se toman los resultados de la modelación como representativos y con buen acuerdo en relación a lo observado.

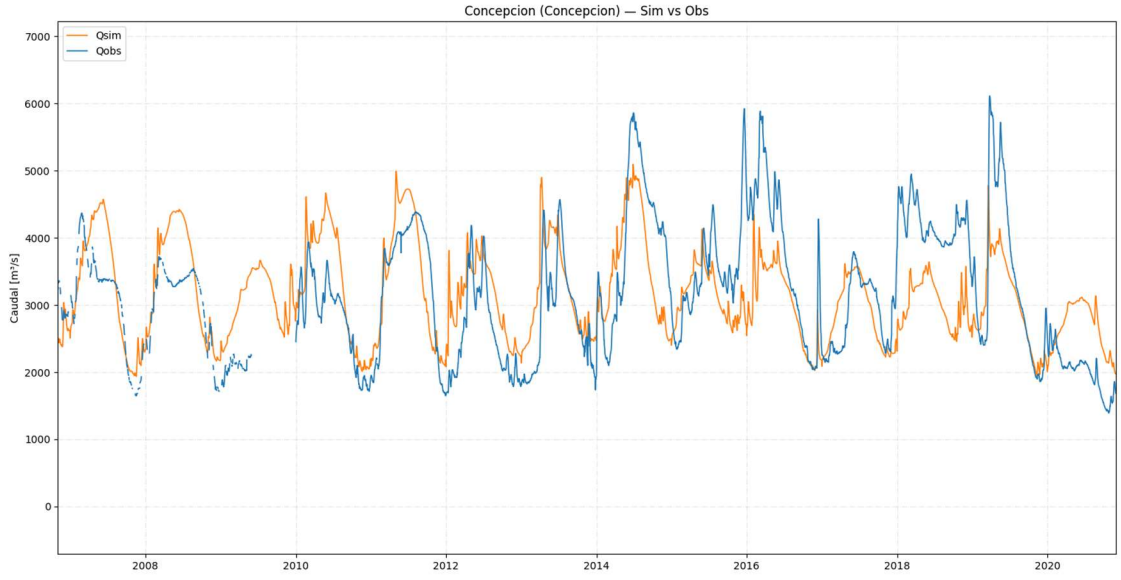


Figura 22. Caudal medio diario simulado y observado en la estación de control Concepción (Paraguay) para el período 2007-2020.

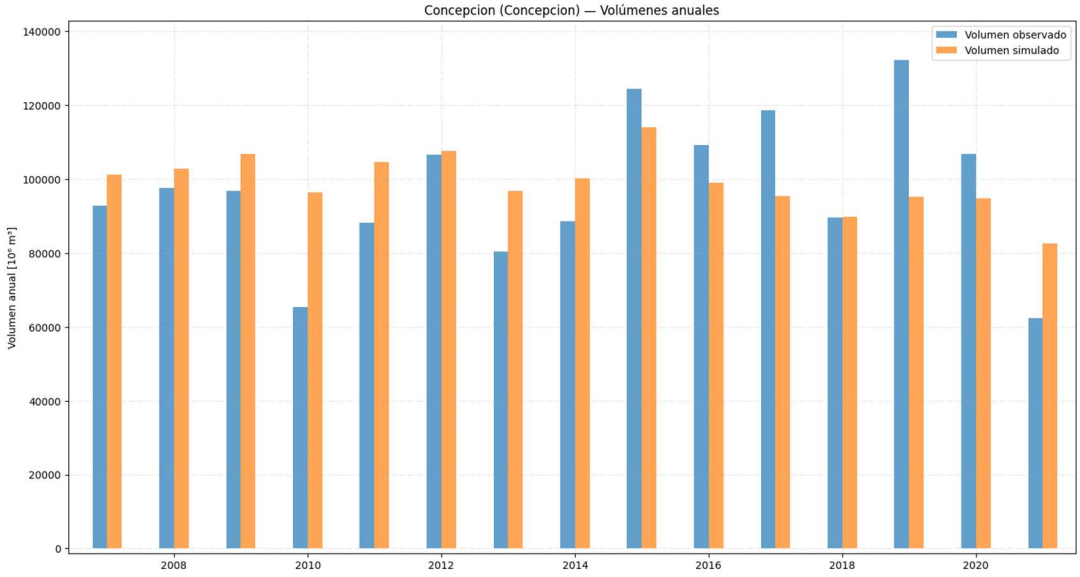


Figura 23. Volúmenes anuales simulados y observados en la estación de control

9.2.4. Pilcomayo

La Figura 24 presenta los caudales en Misión La Paz, que como las características geomorfológicas de la cuenca resulta la última sección de aforo previa a la apertura del abanico aluvial y un tramo de bajas pendientes del río que dificulta cuantificar un único caudal de salida de la cuenca. Los volúmenes anuales muestran un buen desempeño global del modelo (Figura 25).

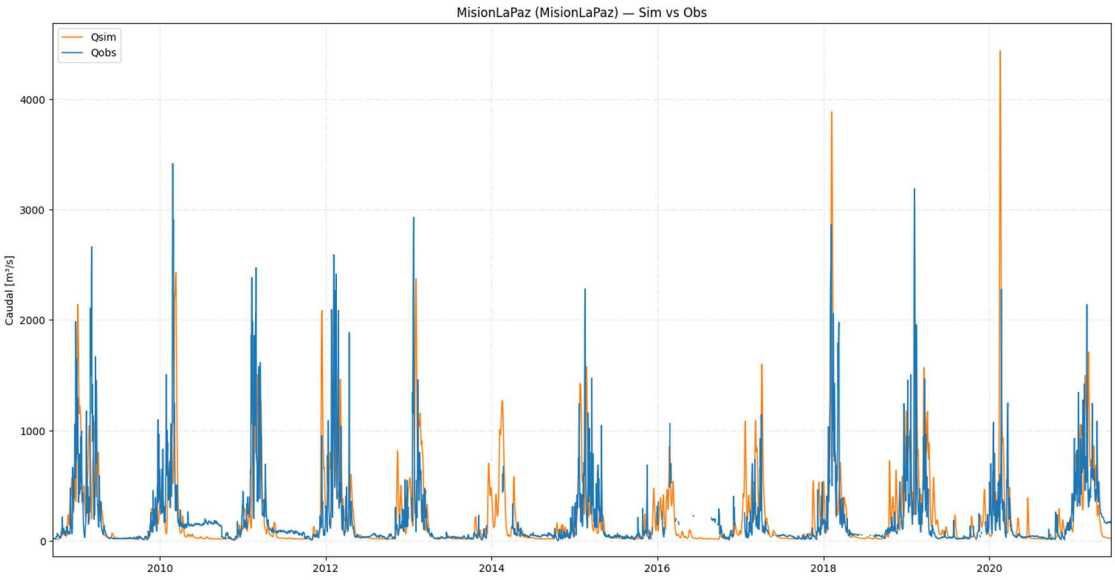


Figura 24. Caudal medio diario simulado y observado en la estación de control Misión La Paz (Pilcomayo) para el período 2009-2020.

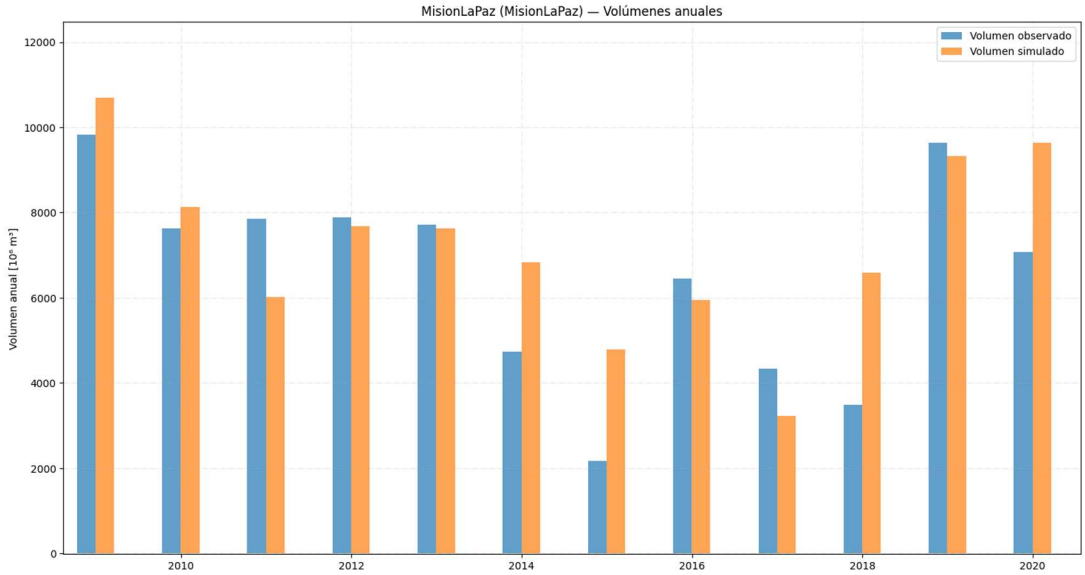


Figura 25. Volúmenes anuales simulados y observados en la estación de control

9.2.5. Corriente

Si bien las cuencas de margen izquierda y derecha del tramo argentino no aportan volúmenes significativos respecto de las cuencas previamente presentadas, se presenta el caso del río Corriente, punto de descarga de los Esteros del Iberá sobre el río Paraná. Las Figura 26 y Figura **27** presentan los resultados obtenidos.

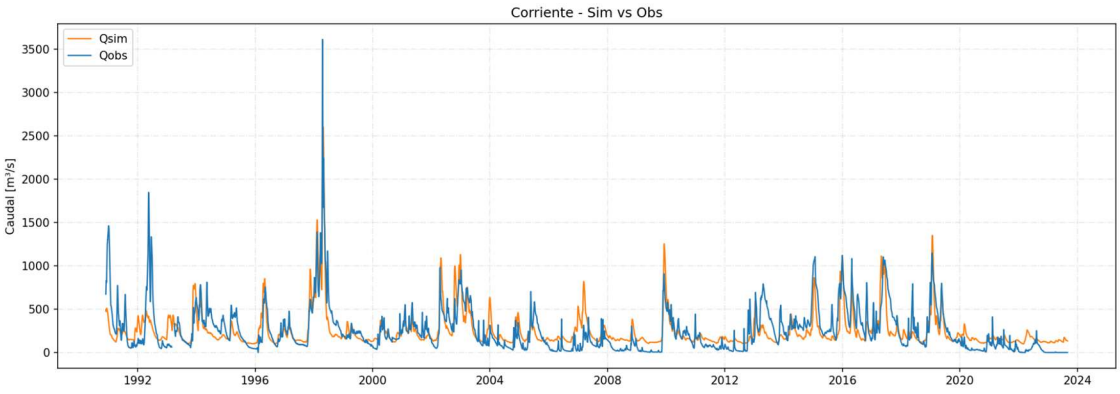


Figura 26. Caudal medio diario simulado y observado en la estación de control Santa Lucia (Corriente) para el período 1991-2015.

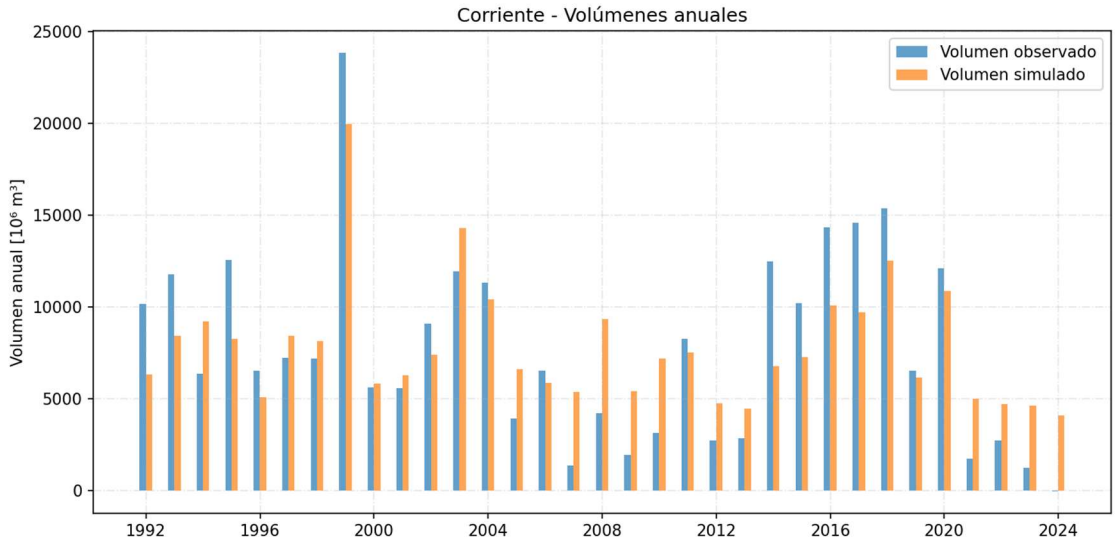


Figura 27. Volúmenes anuales simulados y observados en la estación de control

A modo de resumen, las **Tabla 5** y **Tabla 6** presentan la comparación de caudales y volúmenes para las principales cuencas modeladas.

Tabla 5. Indicadores de calibración en las principales cuencas modeladas - Caudales

Sistema	Caudales diarios[m^3/s]				
	RMSE [m^3/s]	MAE [m^3/s]	E [-]	Qmed obs [m^3/s]	Qmed sim [m^3/s]
Alto Paraná - Itaipú	3199	2489	0.02	10417	11301
Iguazú - Andresito	1191	729	0.42	1743	1633
Paraguay - São Francisco	375	291	0.68	1472	1511
Paraguay - Concepción	966	753	0.14	2890	2915
Pilcomayo – Misión La Paz	405	188	–0.13	218	246
Argentina MI - Corriente	176	121	0.56	257	251

Tabla 6. Indicadores de calibración en las principales cuencas modeladas - Volúmenes

Sistema	Volúmenes anuales [m^3]	
	RMSE [10^6 m^3]	BIAS [%]
Alto Paraná - Itaipú	49504.2	7.98
Iguazú - Andresito	12627.1	1.38
Paraguay - São Francisco	8973.8	0.44
Paraguay - Concepción	20140.5	13.15
Pilcomayo – Misión La Paz	2342.8	11.63
Argentina MI - Corriente	2948.5	1.18

Para un detalle completo del desempeño de todas las subcuencas modeladas, en el ***Error! Reference source not found.*** se presentan los resultados vinculados al proceso de calibración y la performance de la simulación hidrológica de cada una de ellas.

10. RESULTADOS DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

En esta sección se presentan los resultados de evaluar los escenarios de cambio climático con los modelos hidrológicos implementados. En este sentido, el primer paso consiste en la obtención de los forzantes de precipitación y evapotranspiración en cada cuenca, en formato de series temporales sobre cada una de las subcuencas analizadas. Las series comprenden la totalidad del período 2005-2100 y se analizan de la siguiente forma:

- 2005-2015: período denominado “Histórico”, que sirve para evaluar los modelos climáticos sobre la misma ventana en la que se tienen simulaciones a partir de observaciones.
- 2020-2100: periodo de proyección sobre el que se evalúan tres ventanas temporales (“Horizontes futuros”): corto, mediano y largo plazo.

Respecto del procesamiento de resultados, en este informe se presenta un análisis estadístico de las series, las cuales debido a la cantidad de simulaciones (5 modelos, para cada uno de los 3 escenarios y analizados en 4 ventanas temporales distintas), se presentan sólo los percentiles característicos. Además, se complementa con un análisis de duraciones, intensidad y frecuencia.

Para el análisis en detalle de las simulaciones se presentan solo dos casos, cuenca del Alto Paraná en el cierre en Itaipú y cuenca del río Paraguay, con cierre en Asunción, que resultan los más relevantes por el caudal aportado al sistema.

10.1. FORZANTES

10.1.1. ALTO PARANÁ

En la **Figura 28**, presenta la precipitación media areal de la cuenca del Alto Paraná, agregado a medias mensuales para los tres escenarios de cambio climático. No se observa una tendencia de incremento o disminución de las precipitaciones, a diferencia de lo que muestra el mismo análisis realizado para la evapotranspiración (**Figura 29**).

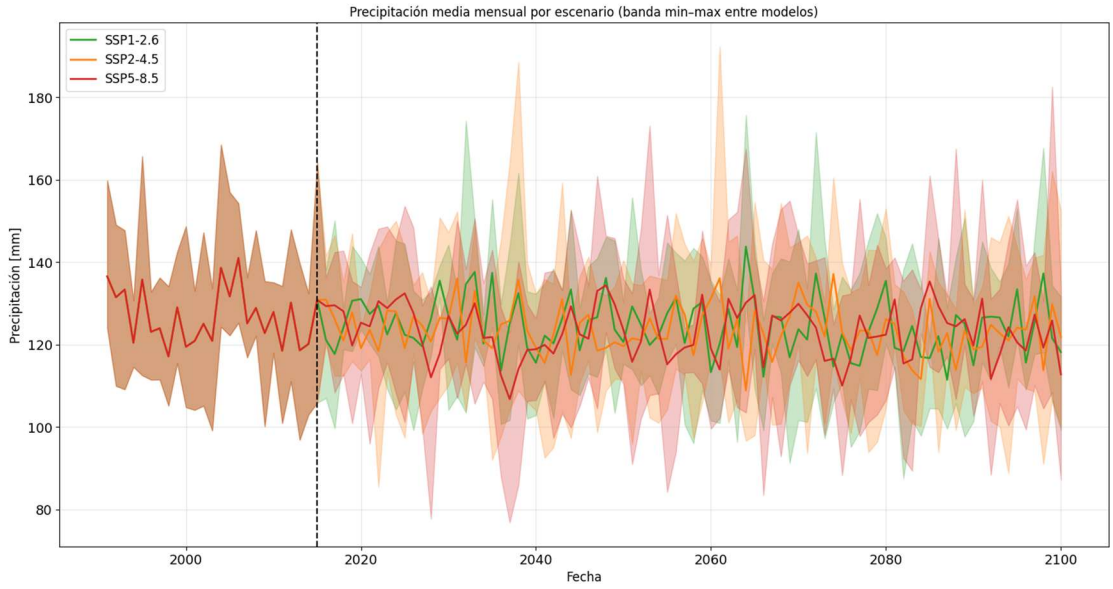


Figura 28. Precipitación media mensual por escenario – Alto Paraná

Respecto de la evapotranspiración, que es una variable directamente relacionada a la temperatura, se observa cómo el escenario SSP5-8.5 presenta los mayores incrementos y variabilidad a futuro.

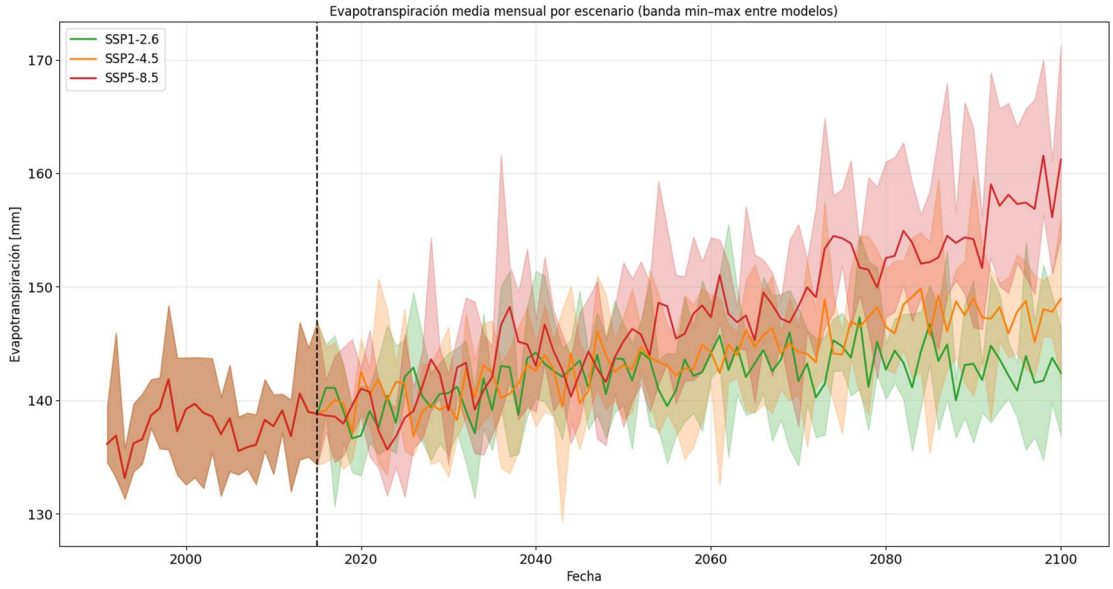


Figura 29. Evapotranspiración media mensual por escenario – Alto Paraná

Las tablas que sintetizan los percentiles P10, P50 y P90 se presentan en el Anexo, mientras que una interpretación gráfica a modo de resumen se muestra a continuación. Tomando los valores del P50 para cada uno de los 5 modelos en los 3 escenarios (ver **Figura 30**), se observa lo siguiente:

En todos los horizontes, los valores de precipitación media mensual se encuentran entre los 110 y 140mm, con una mayor dispersión entre modelos para el horizonte del largo plazo

- En el horizonte de mediano plazo, todos los modelos climáticos coinciden con mayores precipitaciones respecto de los otros horizontes, con valores por encima de los 120 mm.
- La **Figura 31** presenta además de los valores P50, los rangos de variación computados a partir de los percentiles P10 y P90. En términos generales se observa una dispersión similar en todos los escenarios y modelos.

El mismo análisis se presenta para la evapotranspiración en las **Figuras 32** y **33**, donde se observa:

- Una mayor consistencia en la que para horizontes más lejanos, donde los valores de evapotranspiración media mensual son mayores.
- En la comparación entre escenarios, todos los modelos muestran una respuesta más pareja, evidenciando mayor evapotranspiración para el escenario SSP5-8.5
- En comparación con la precipitación, en rango de variación (P90-P10), es menor en la evapotranspiración.

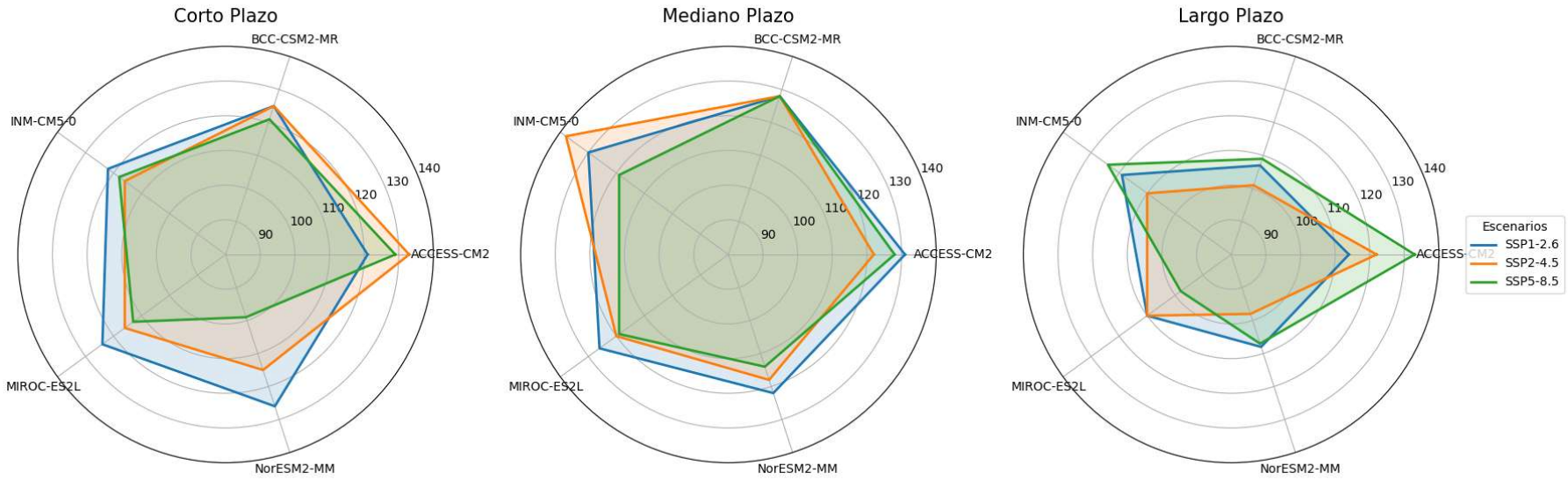


Figura 30. Percentil 50% de la precipitación para los distintos modelos climáticos globales – Alto Paraná

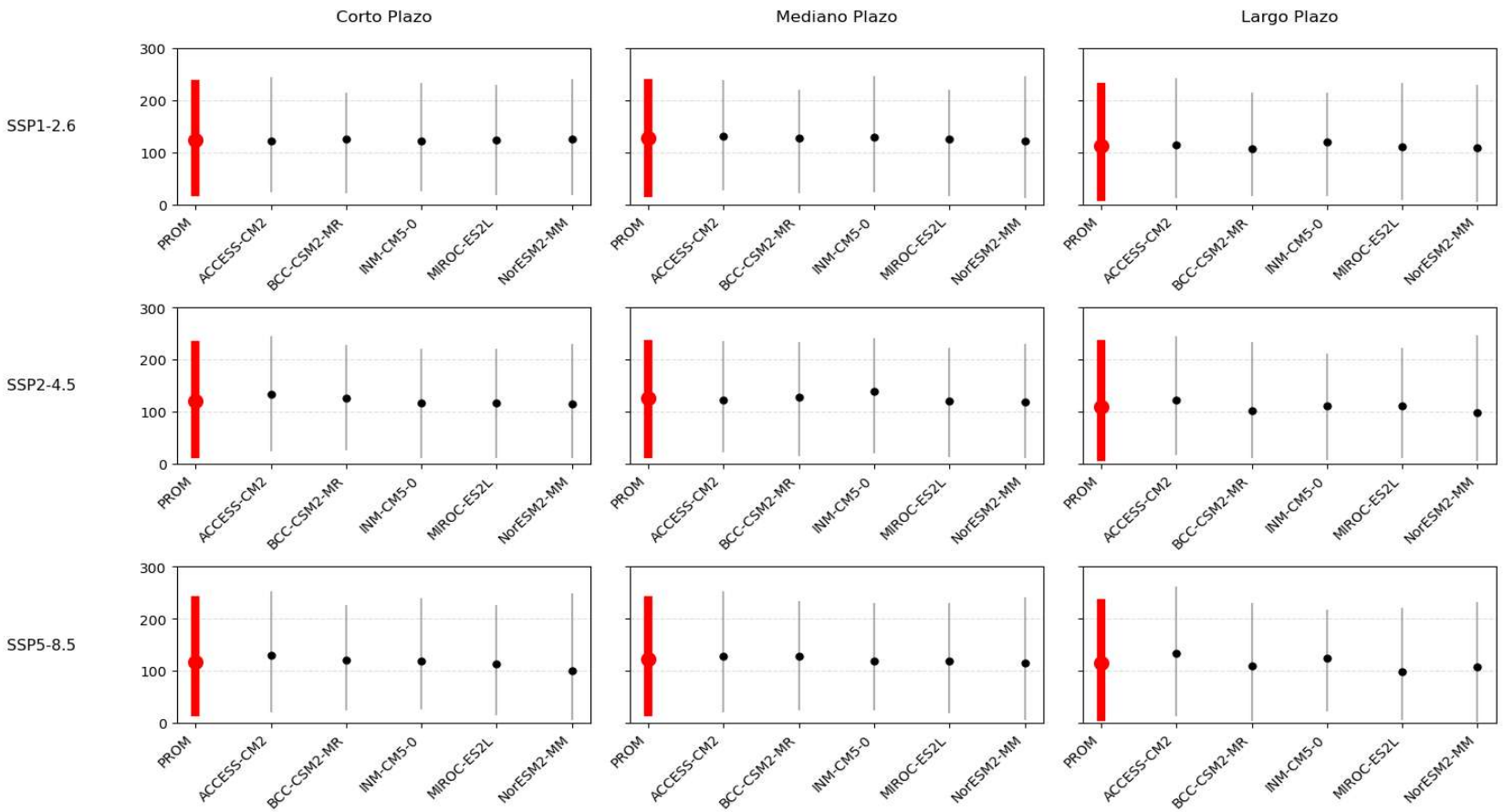


Figura 31. Variación de la precipitación para los distintos modelos climáticos globales – Alto Paraná

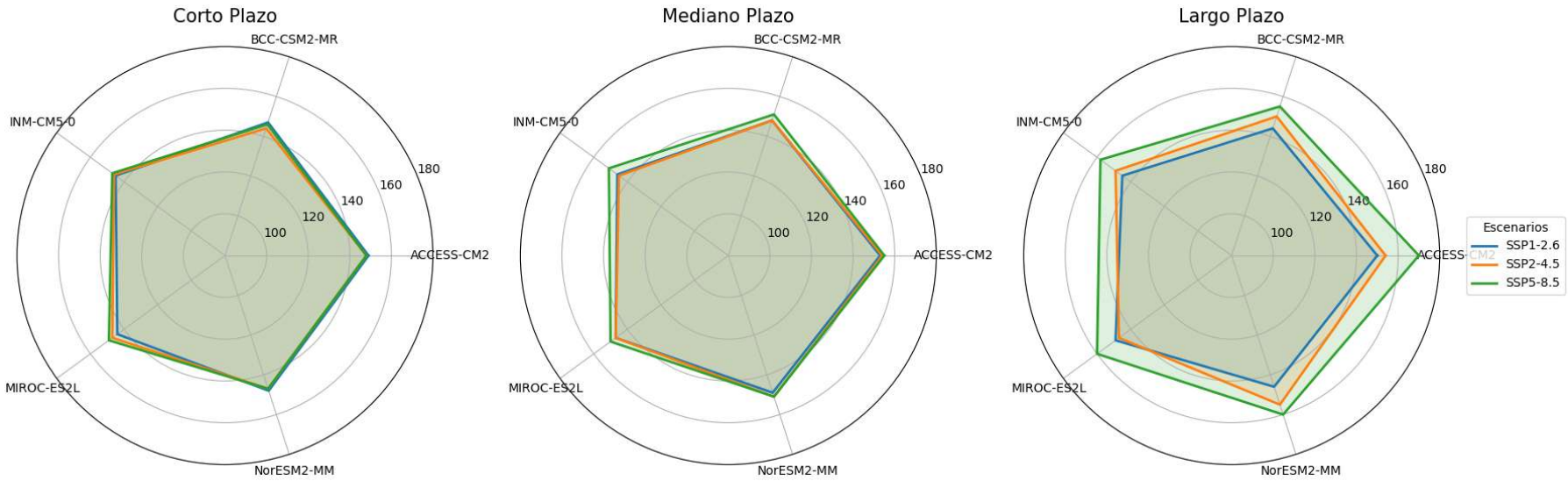


Figura 32. Percentil 50% de la evapotranspiración para los distintos modelos climáticos globales – Alto Paraná

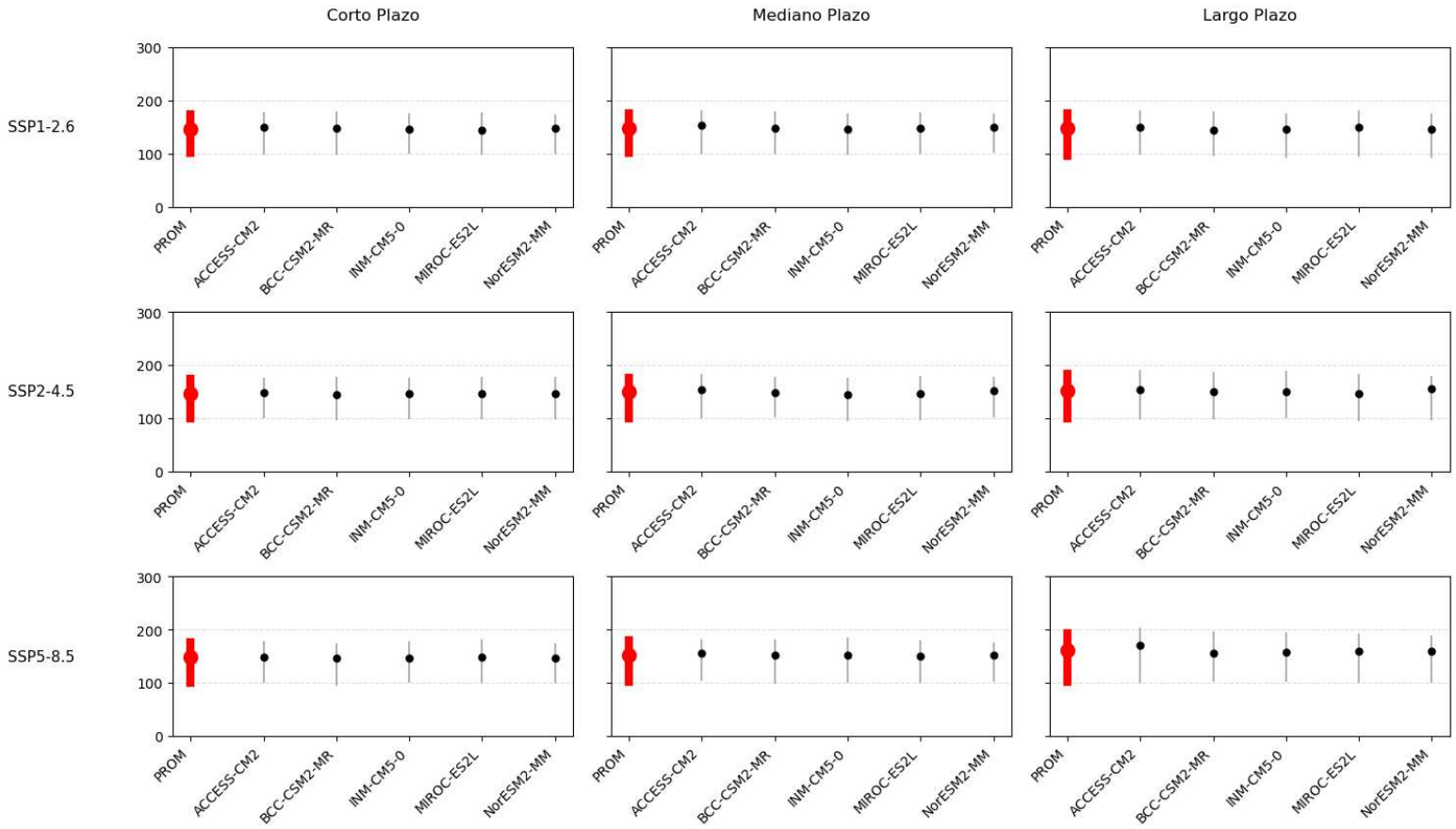


Figura 33. Variación de la evapotranspiración para los distintos modelos climáticos globales – Alto Paraná

10.1.2. PARAGUAY

En la Figura 34, se presentan las series temporales de precipitación resultantes de los distintos modelos climáticos globales en la cuenca del río Paraguay, mientras que en la Figura 35 se presenta un resultado análogo para la evapotranspiración.

Análogamente a lo observado con los forzantes de la cuenca del Alto Paraná, no se presenta una tendencia sobre las precipitaciones a diferencia de la evapotranspiración donde se ve un incremento progresivo asociado a la variación en la temperatura.

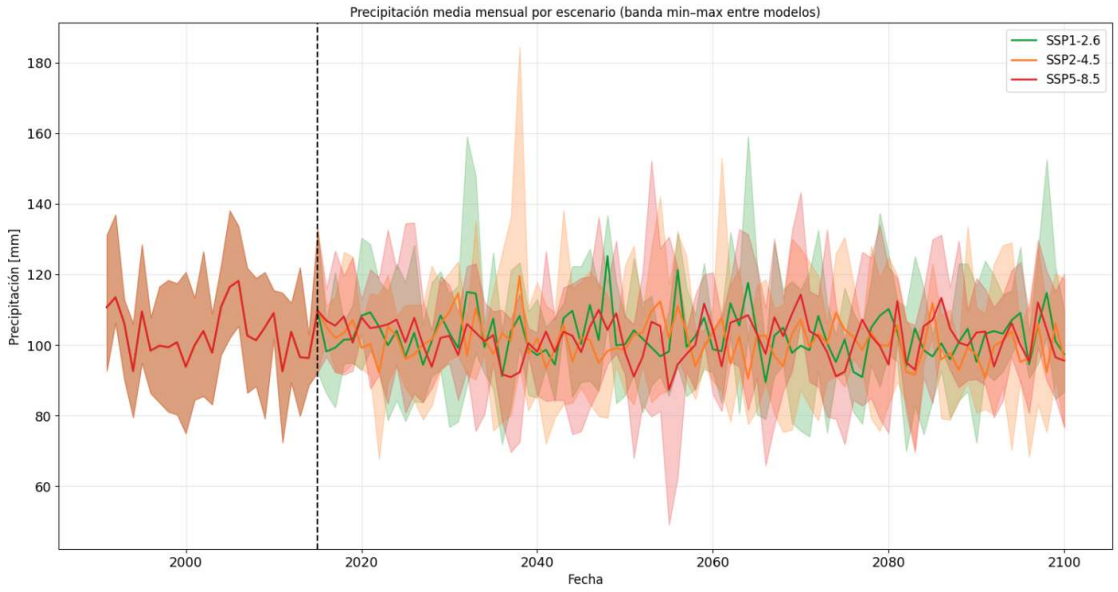


Figura 34. Precipitación media mensual por escenario – Paraguay

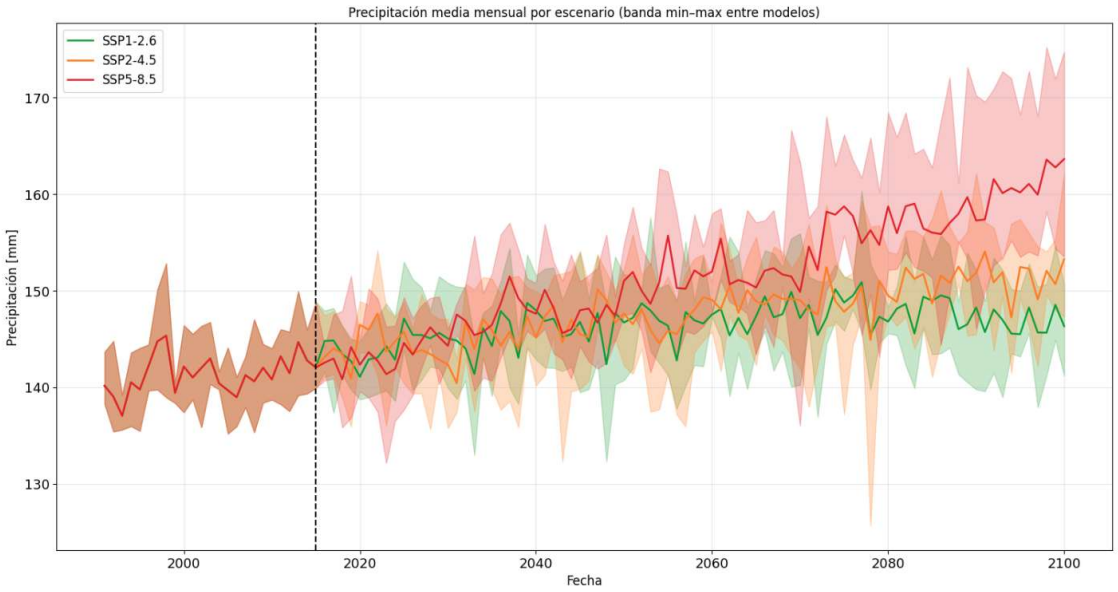


Figura 35. Evapotranspiración media mensual por escenario – Paraguay

A continuación, en las **Figuras 36** a **39**, se presenta el resumen de la estadística de valores medios mensuales de precipitación y evapotranspiración sobre la cuenca del Paraguay.

- En relación a la precipitación, se observa una disminución progresiva hacia el horizonte de largo plazo.
- Al igual que en el caso del Alto Paraná, se observa una mayor dispersión en los rangos de variación (P90-P10) de la precipitación en comparación con la evapotranspiración.

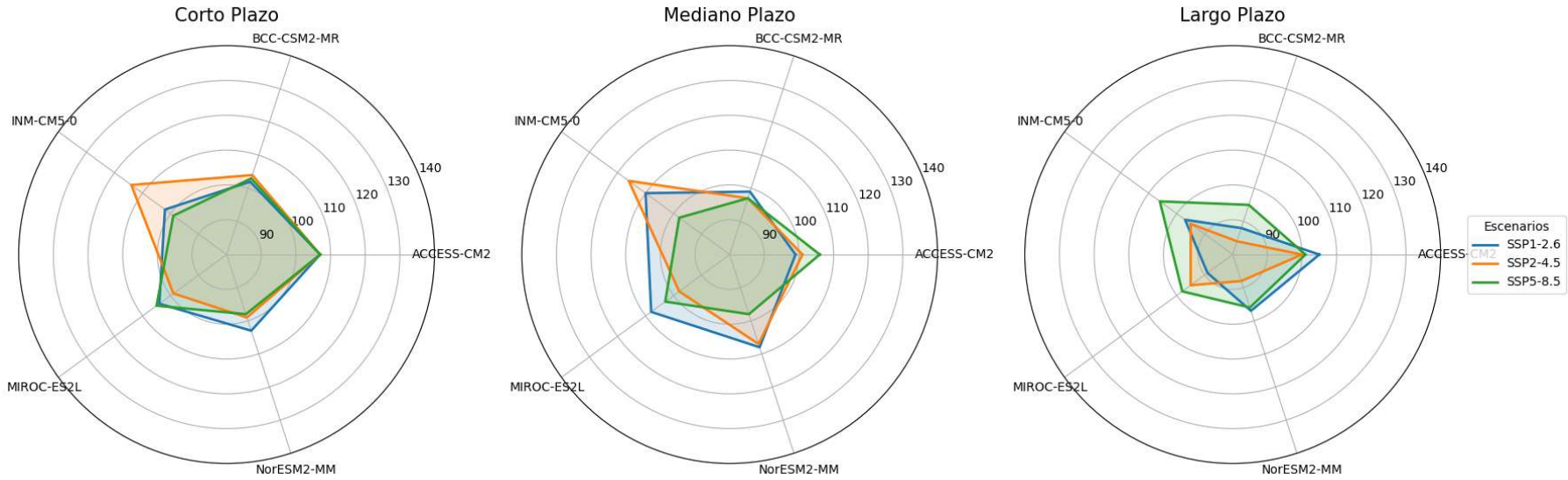


Figura 36. Percentil 50% de la precipitación para los distintos modelos climáticos globales – Paraguay

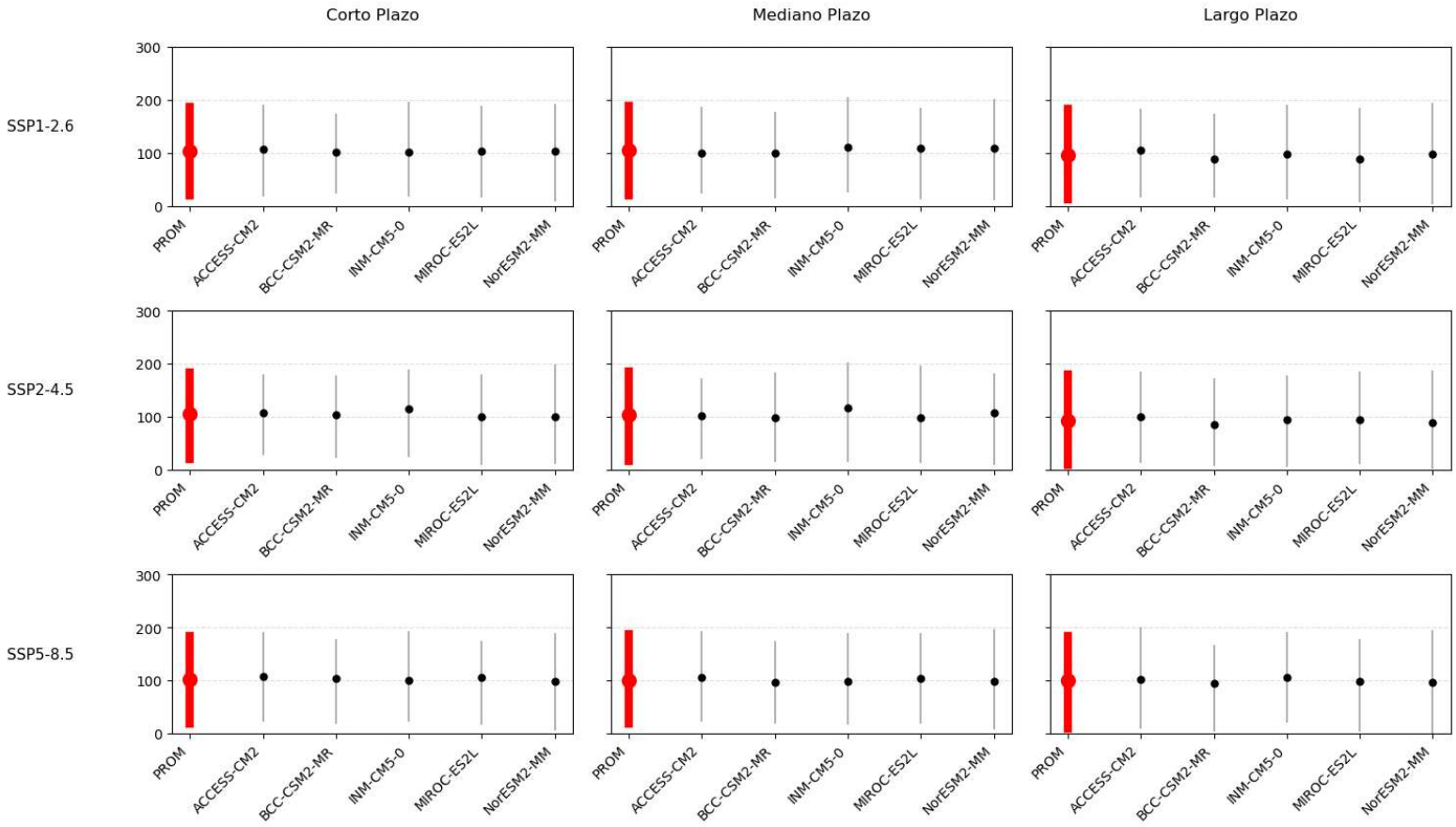


Figura 37. Variación de la precipitación para los distintos modelos climáticos globales – Paraguay

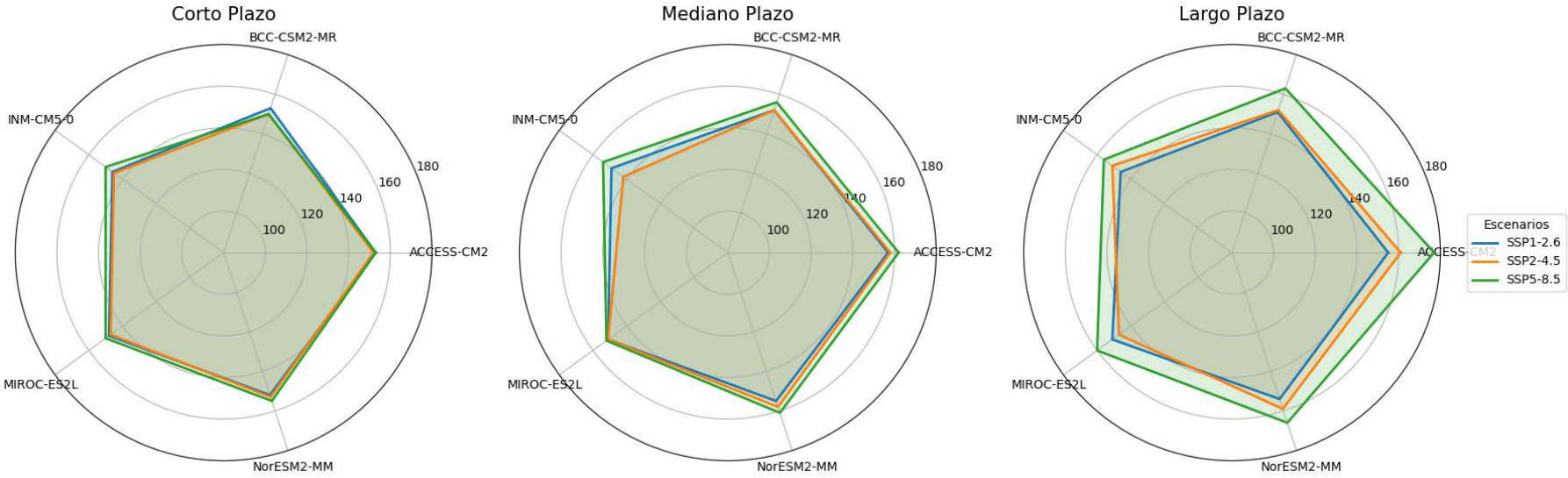


Figura 38. Percentil 50% de la evapotranspiración para los distintos modelos climáticos – Paraguay

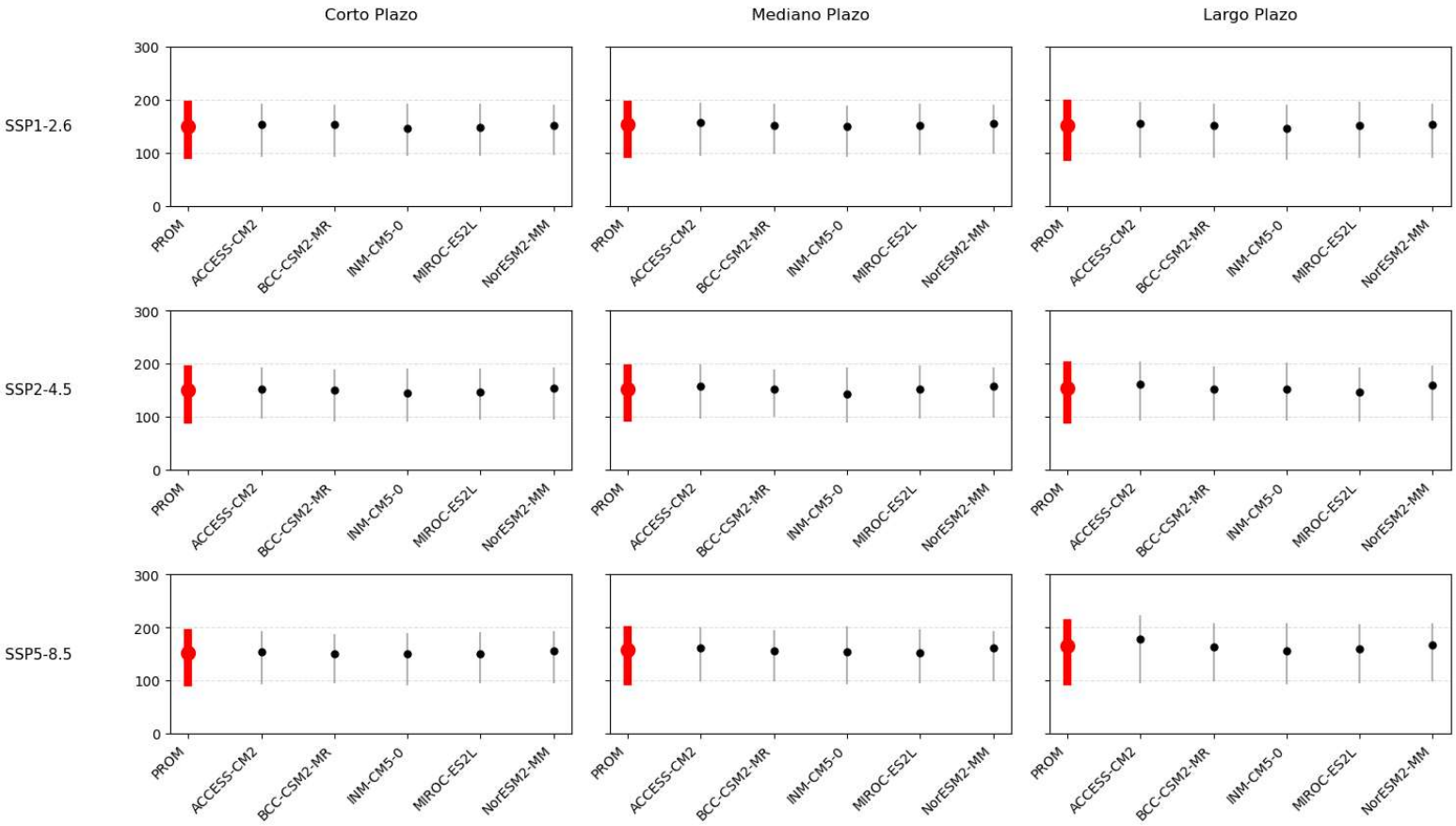


Figura 39. Variación de la evapotranspiración para los distintos modelos climáticos globales – Paraguay

10.2. CAUDALES

10.2.1. MAPAS DE ANOMALÍAS

De las simulaciones realizadas para los distintos escenarios por los modelos climáticos globales generaron mapas de anomalías por subcuenca, teniendo como referencia el período histórico simulado a partir de los modelos climáticos. Las **Figuras 40** a **44** presentan estos resultados para cada uno de los modelos climáticos globales evaluados.

Se destaca que los resultados son heterogéneos entre los distintos modelos, pero con algunos puntos en común:

- En todos los casos, aun cuando se presentan diferencias entre los modelos en las tendencias, se observan que las anomalías se incrementan en los horizontes más lejanos y en los escenarios más extremos (SSP 8.5)
- Se observa que:
    - cuatro de los cinco modelos indican que la cuenca alta del Paraguay, el Pantanal, presentará condiciones más secas en los escenarios futuros
    - los cinco modelos indican que la alta cuenca del Paraná, presentará condiciones más secas, variando la intensidad de la misma según los modelos climáticos considerados.
    - la cuenca del Pilcomayo no presenta tendencias claras (positivas o negativas).
    - cuatro de los cinco modelos muestran que la zona central (próximo a la confluencia del Paraná – Paraguay) y sur de la cuenca, tendría anomalías positivas en los escenarios futuros

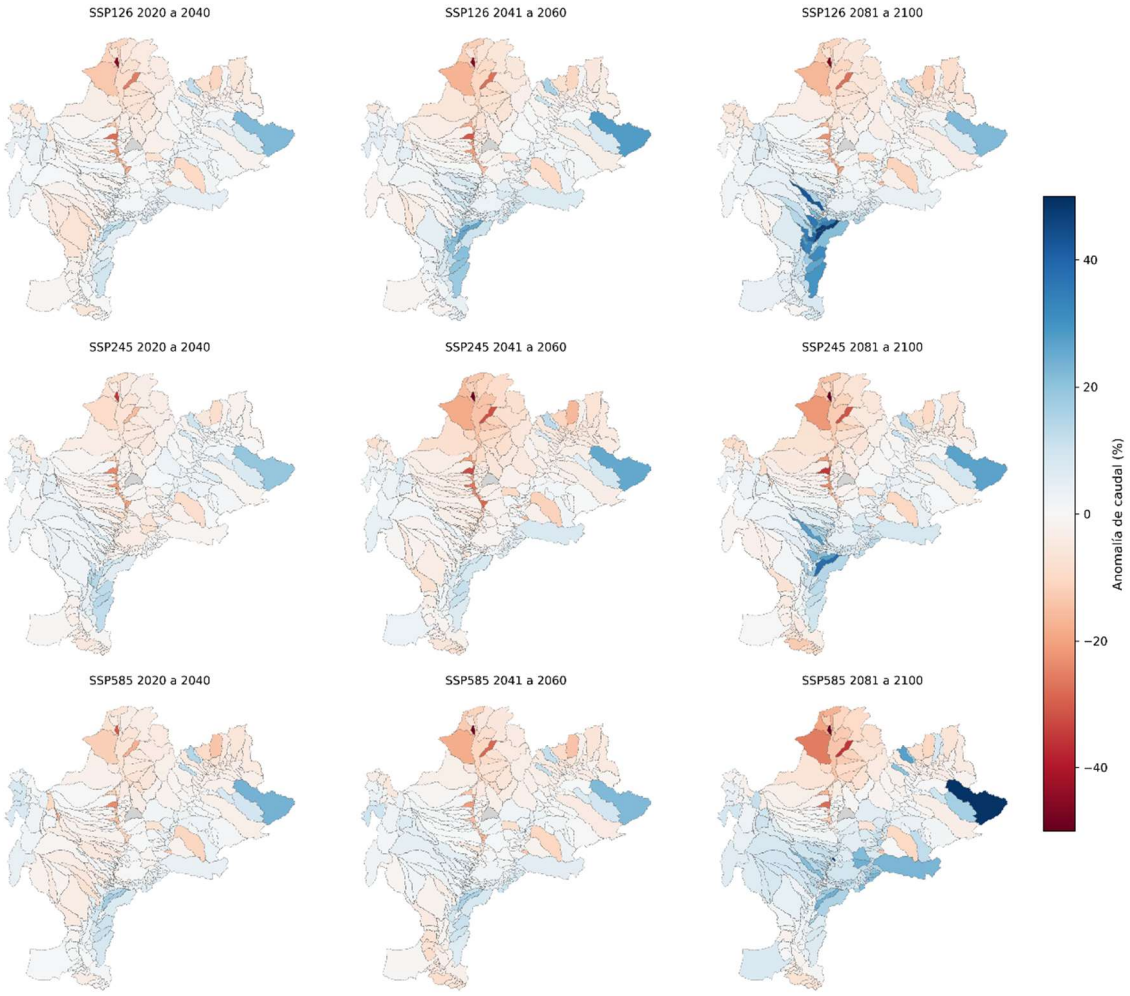


Figura 40. Mapa de anomalía – Modelo climático global *access-cm2*

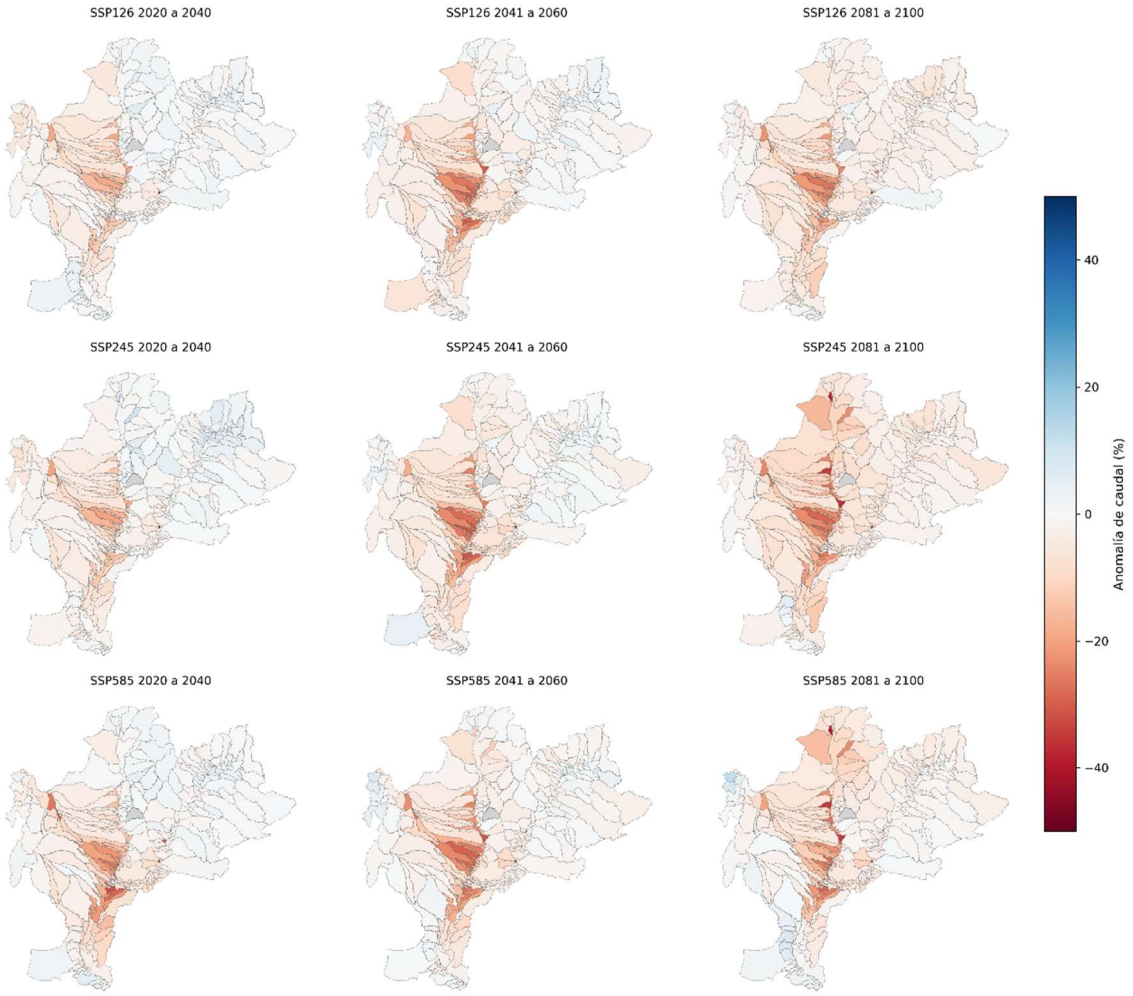


Figura 41. Mapa de anomalía – Modelo climático global *bcc-csm2-mr*

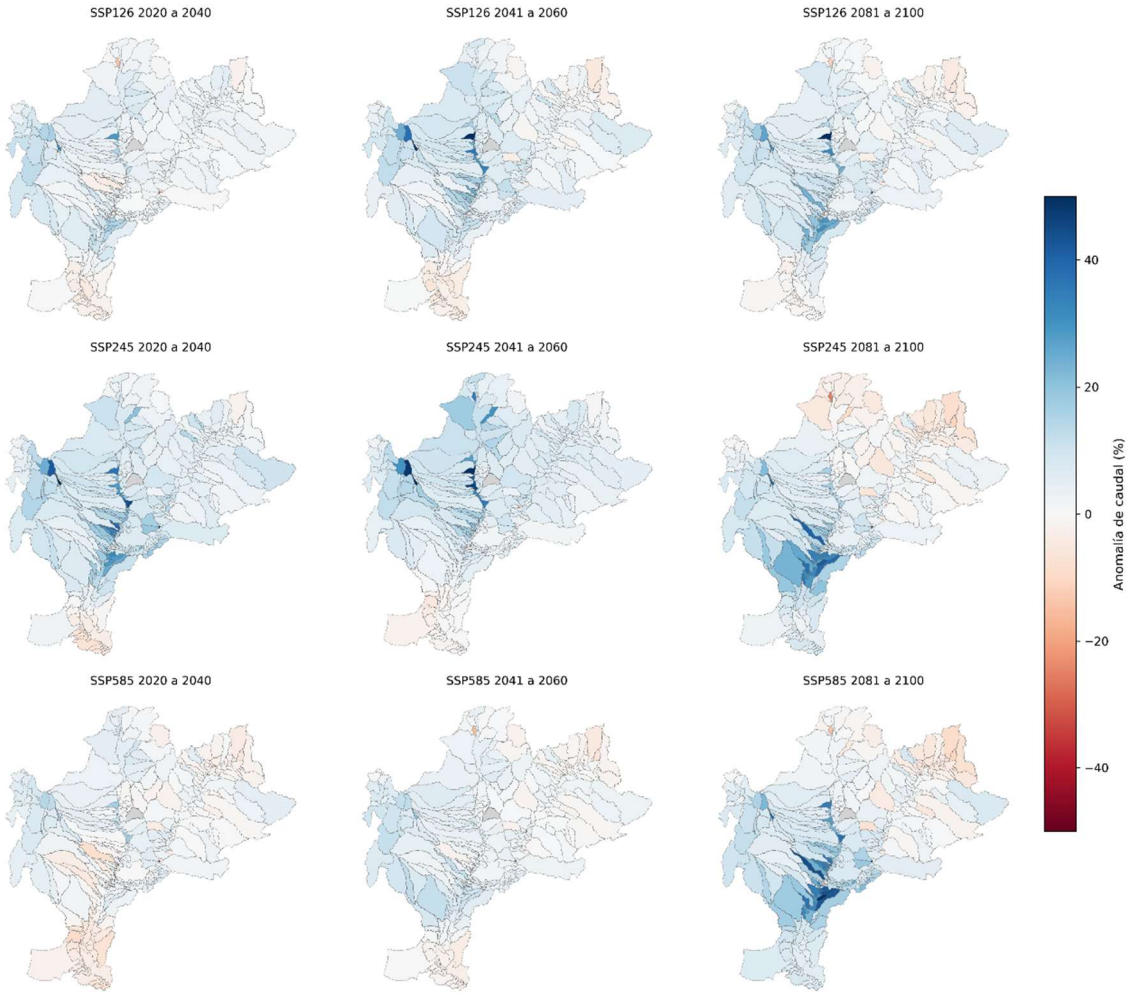


Figura 42. Mapa de anomalía – Modelo climático global *inm-cm5*

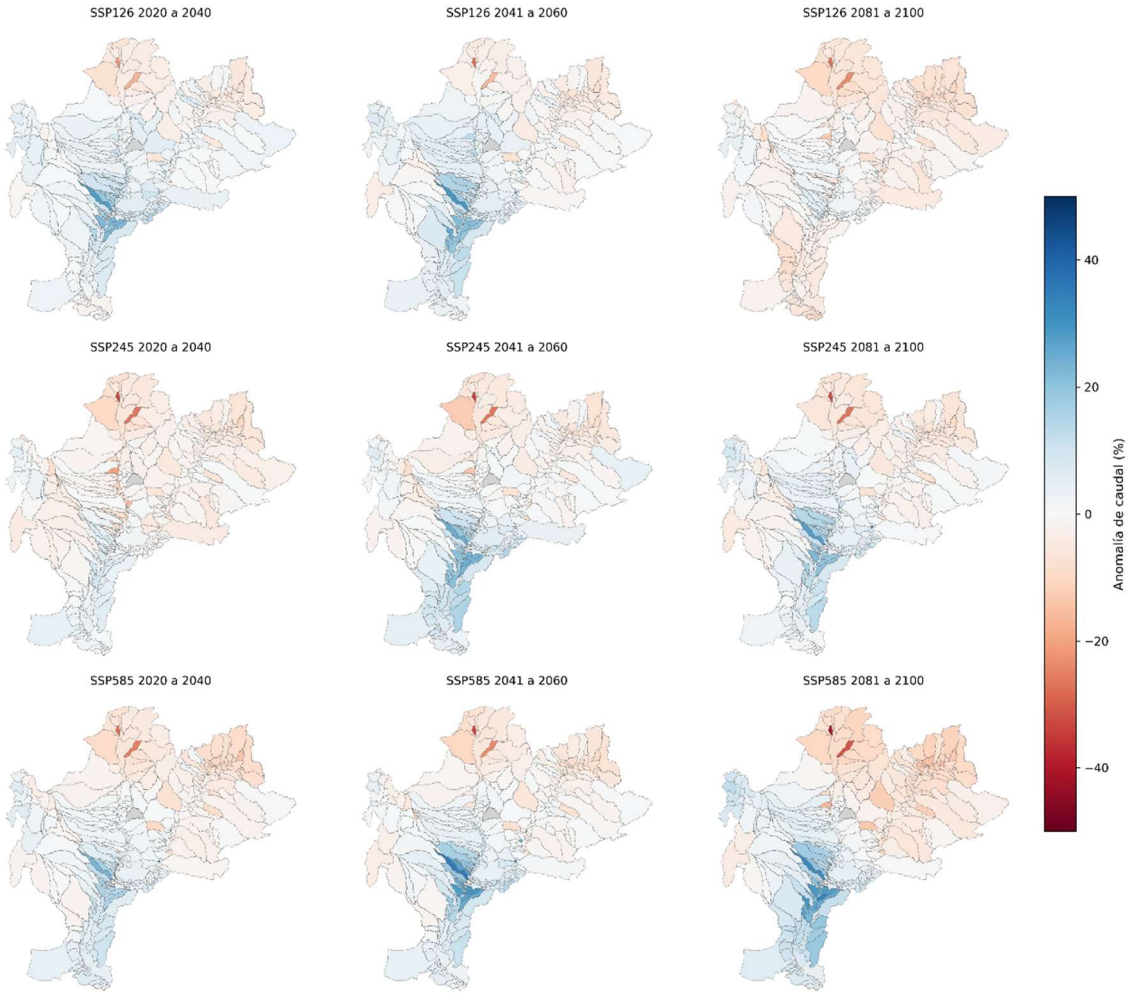


Figura 43. Mapa de anomalía – Modelo climático global *miroc-es2l*

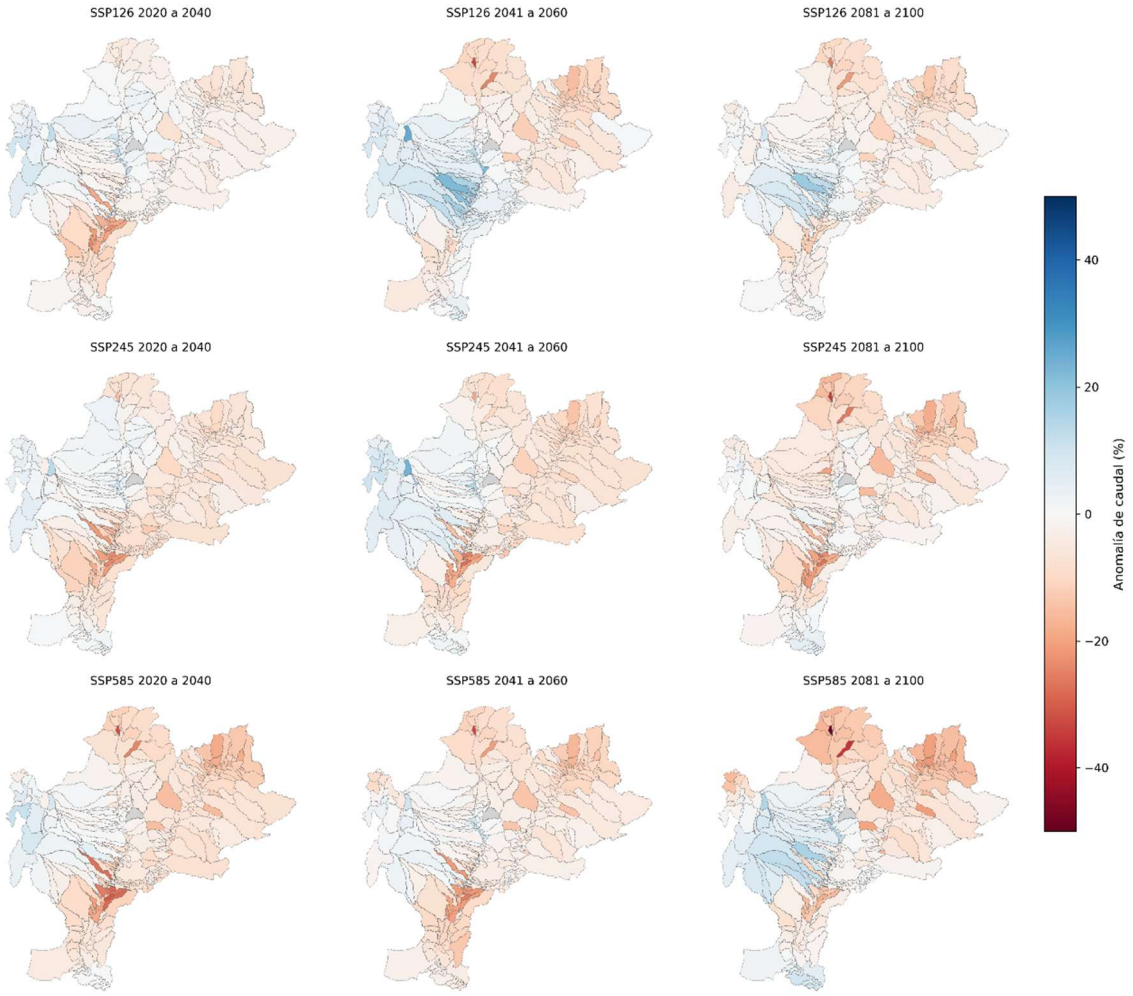


Figura 44. Mapa de anomalía – Modelo climático global *noresm2-mm*

10.2.2. ALTO PARANÁ

Se presentan los resultados de evaluación de escenarios de Cambio Climático de la cuenca del Alto Paraná en el cierre de Itaipú.

10.2.2.1. Período histórico

En primer lugar, se analiza la respuesta de los modelos climáticos, para lo cual se compara en el período 2005-2015 la simulación que surge de la calibración con los cinco modelos. La Figura 45 presenta un ejemplo, con el modelo ACCESS-CM2, en el que se observa que la respuesta estacional es captada adecuadamente, mientras que los volúmenes anuales también son correctamente representados (Figura 46).

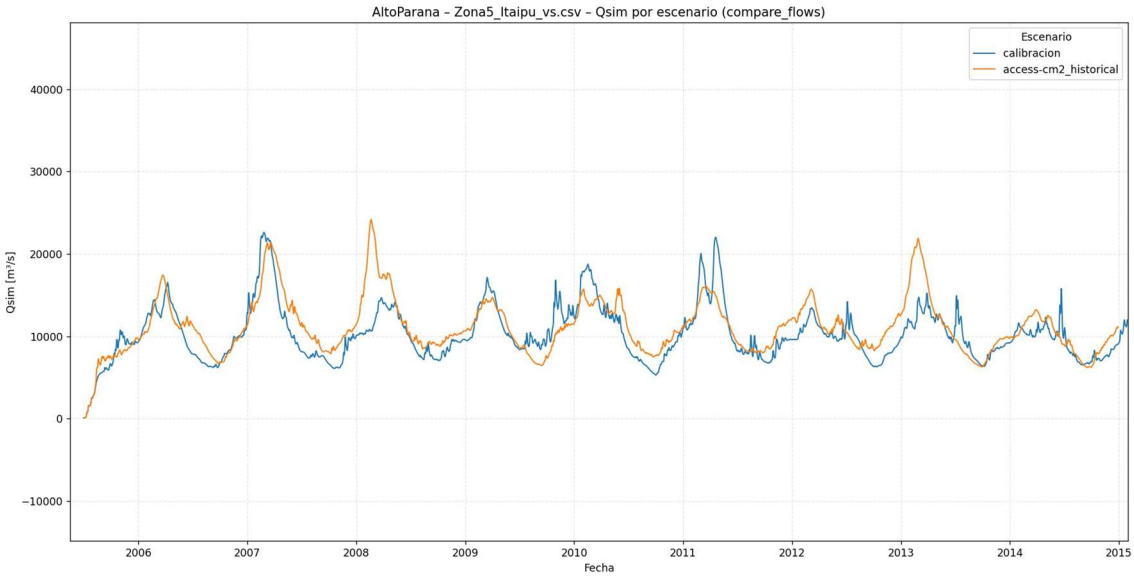


Figura 45. Caudales calibrados y simulados a partir de modelos climáticos - Itaipú

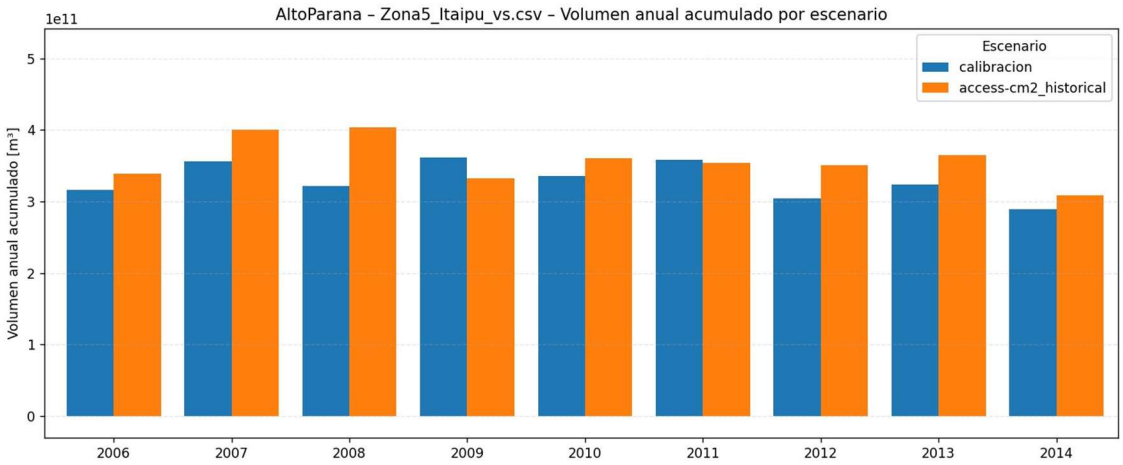


Figura 46. Volúmenes calibrados y simulados a partir de modelos climáticos - Itaipú

A partir de las simulaciones utilizando los forzantes de los modelos climáticos globales, se computa la estadística para la ventana de tiempo histórica, cuyos resultados se presentan en detalle en el Anexo III. De forma condensada, la **Figura 47** muestra los *boxplots* de cada modelo en comparación con lo histórico calibrado. Existe una tendencia media a la sobrestimación por parte de los modelos climáticos globales, mientras que la variabilidad se encuentra bien representada (tamaño de cajas).

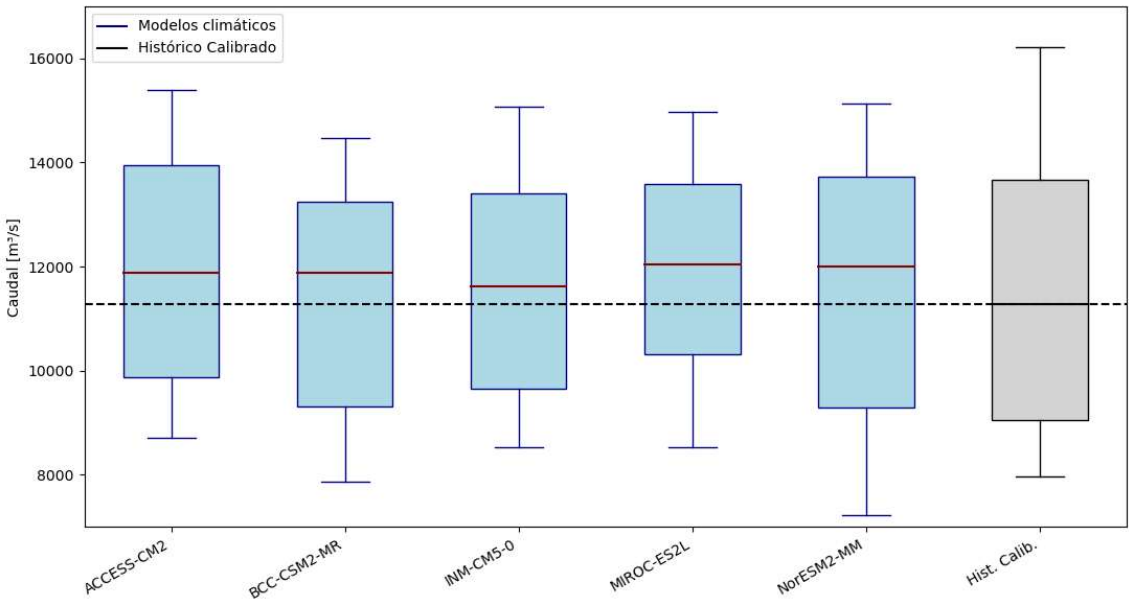


Figura 47. Boxplot de caudales calibrados y simulados a partir de modelos climáticos - Itaipú

10.2.2.2. Proyecciones futuras

En relación a las proyecciones futuras, la Figura 48 presenta el resumen de los distintos escenarios. La variabilidad de los modelos fue contemplada para la envolvente de mínimos y máximos, mientras que los valores de percentiles característicos (P10, P50 y P90) se tomaron como un promedio de los 5 modelos.

Se observa que el valor de caudal asociado al P50, se mantiene para los distintos escenarios entre la ventana histórica y el horizonte de largo plazo, con variaciones acotadas en un 2%. Por otra parte, el rango de envolventes se incrementa entre los escenarios, siendo de 7900m^3/s en el SSP1-2.6, 8550m^3/s en el SSP2-4.5 y 10200m^3/s en el SSP5-8.5.

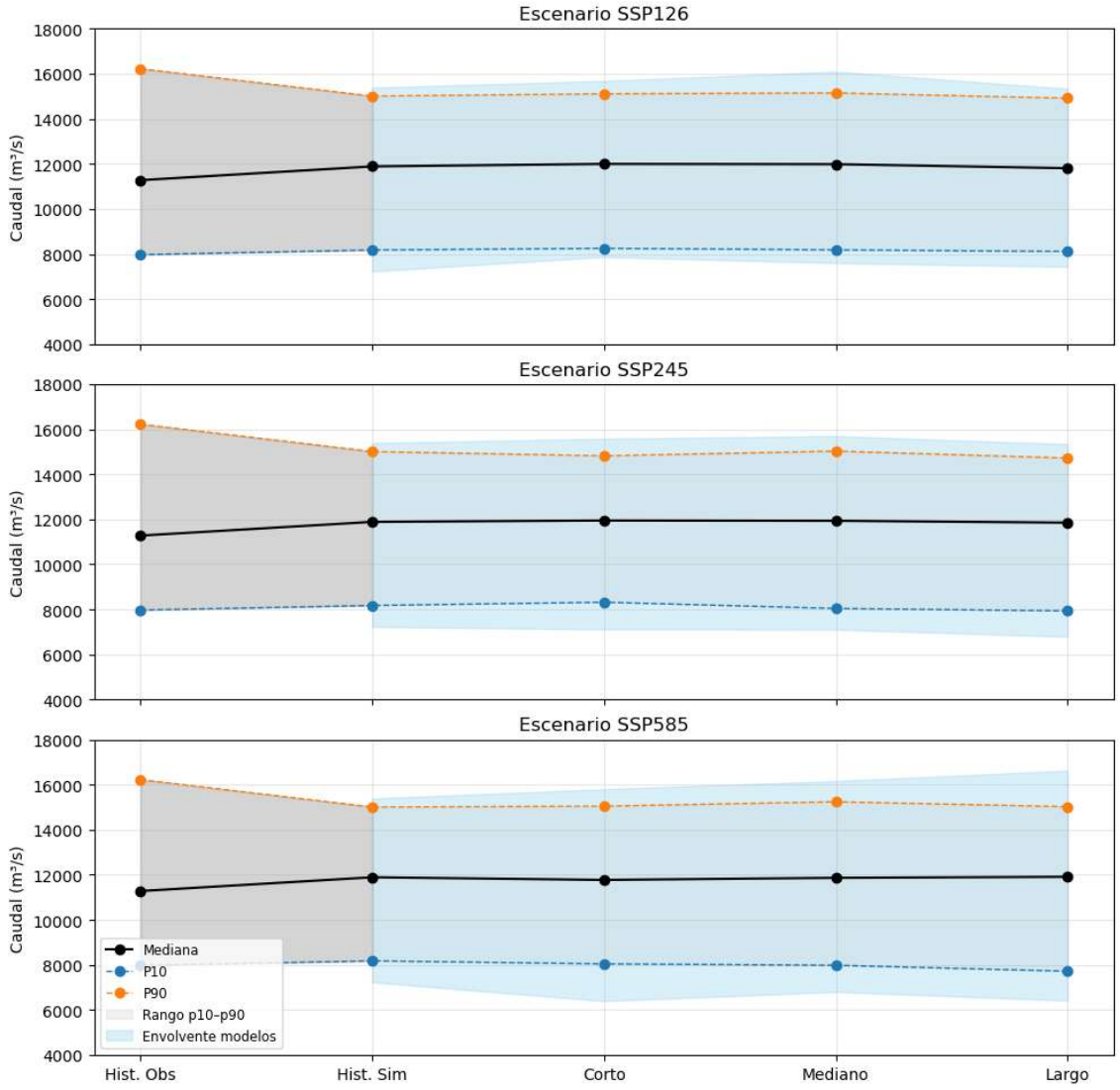


Figura 48. Proyecciones de caudales - Itaipú

10.2.2.1. Análisis de duraciones

A partir de las series de caudales obtenidas, se realizó el procesamiento para computar duraciones de eventos de bajante y crecidas. Para esto se tomó como referencia el período histórico, del cual se obtuvieron valores umbrales para la definición de los estados hidrológicos. Las bajantes se caracterizaron por los caudales con percentiles asociados de 10% (P10) y las crecidas con percentiles de 90% (P90). De esta forma se

computó la cantidad de eventos de bajantes y crecidas registrados en los distintos escenarios para los tres horizontes, y se obtuvieron los promedios de duración.

En lo que refiere a las bajantes, se observa que la cantidad de eventos no varía significativamente para los distintos horizontes (**Figuras 49** y **50**). No obstante, se observa una tendencia positiva en el escenario SSP5 8.5. Este aspecto es acompañado con una mayor duración de los eventos de aguas abajas para el mismo escenarios.

Para el caso de los eventos de crecida, el único escenario que muestra un incremento en la cantidad de eventos es el de SSP5 8.5 (**Figura 51**), pero con duraciones que disminuyen progresivamente, como se observa en la **Figura 52**.

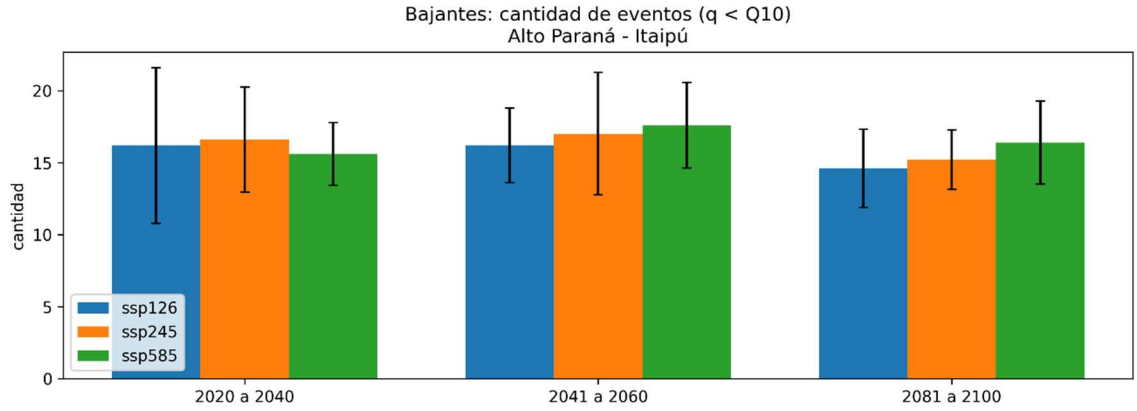


Figura 49. Cantidad de eventos de bajantes

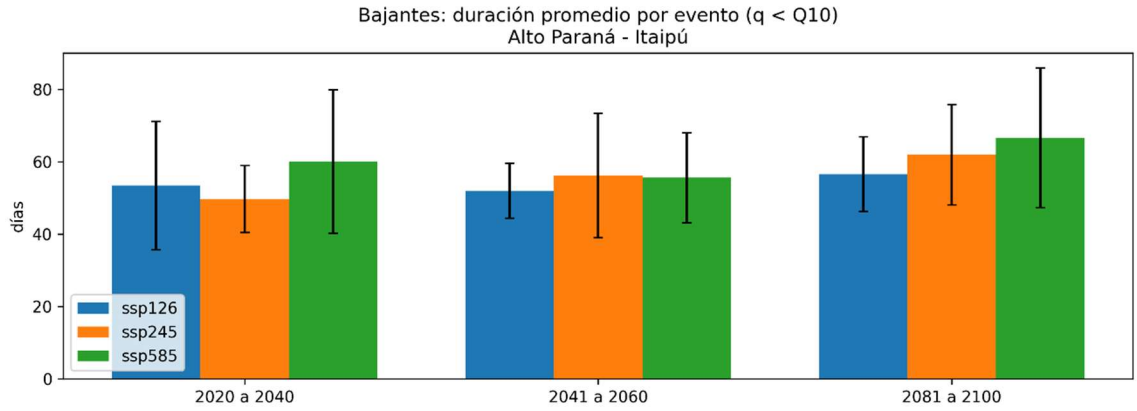


Figura 50. Estadística de duración de eventos de bajantes

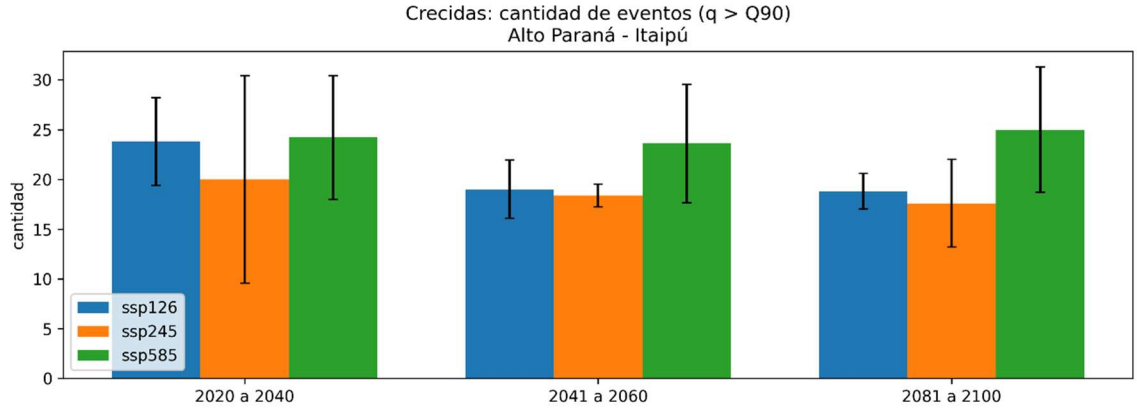


Figura 51. Cantidad de eventos de crecida

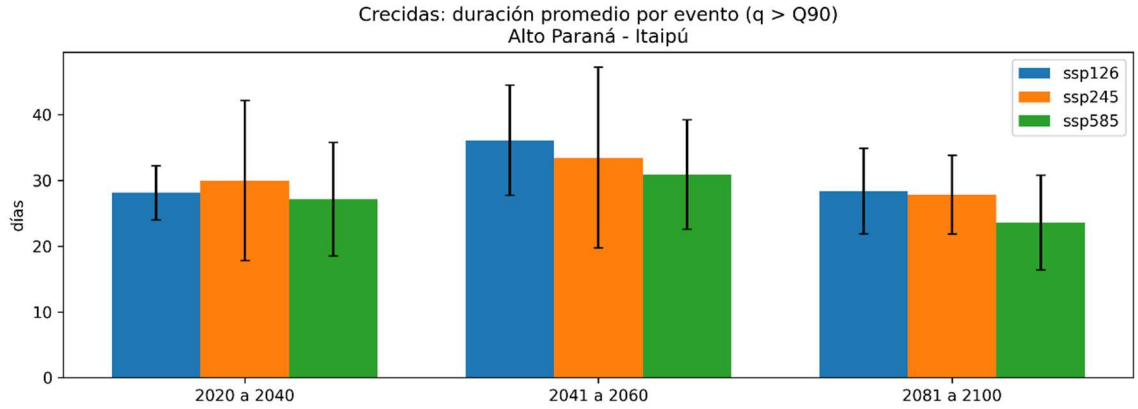


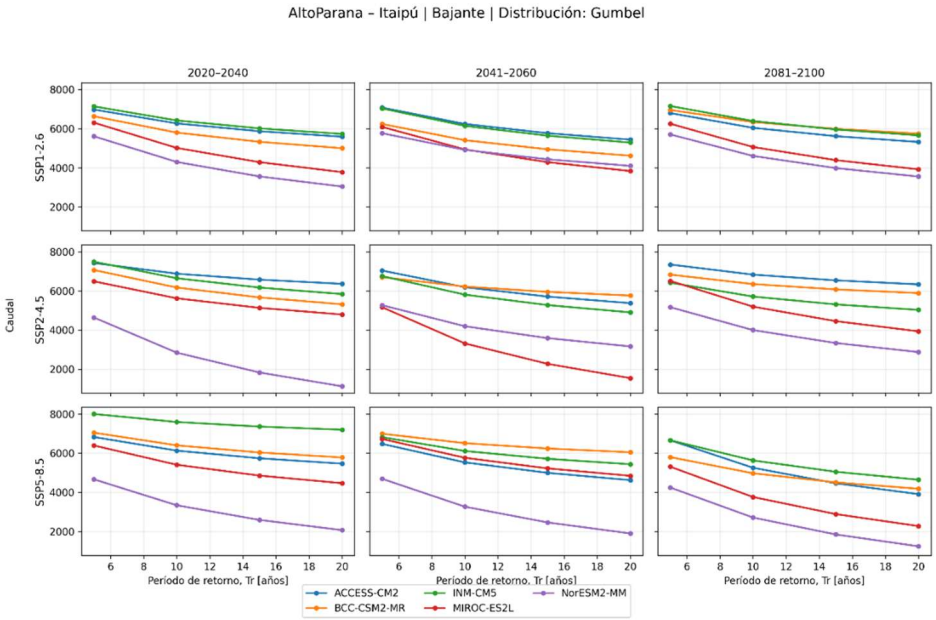
Figura 52. Estadística de duración de eventos de crecida

10.2.2.2. Eventos extremos

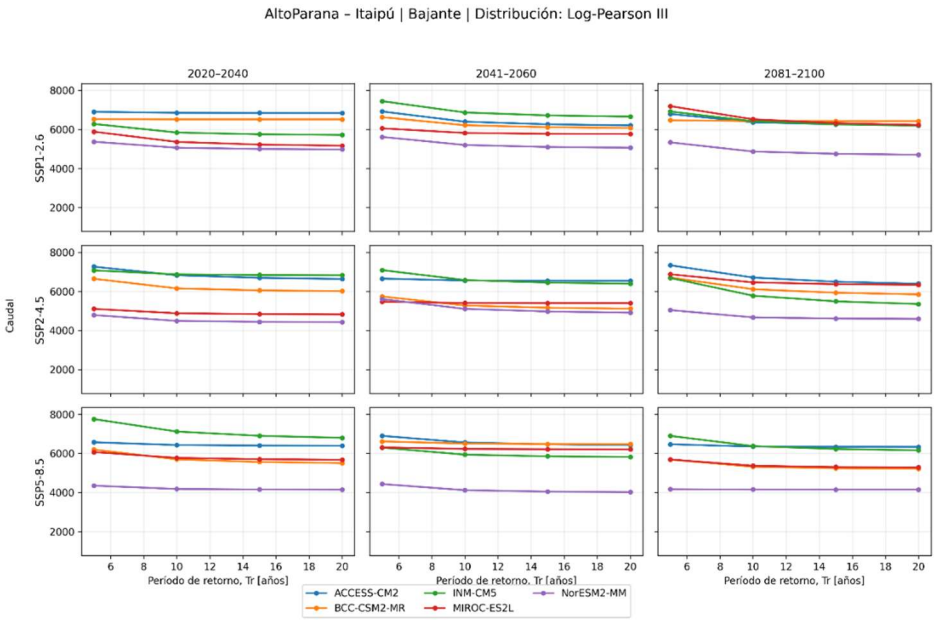
A partir de las series de caudales, se realizó un análisis de eventos extremos máximos y mínimos. Para esto, además de tomar los resultados de cada modelo climático global en cada escenario, se subdividió el análisis según los tres horizontes. Teniendo en cuenta que cada horizonte tiene una extensión de 20 años, para el ajuste de las funciones distribución de probabilidad, se tienen solo 20 valores extremos, lo cual limita la extrapolación de resultados para periodos de retorno altos.

Respecto del ajuste de extremos, se evaluaron distintas funciones, y seleccionaron la EV-I (*Extreme Value Type I o Gumbel*) y Log Pearson III. La **Figura 53** presenta los

valores de caudal asociados a distintas recurrencias para el caso de eventos extremos mínimos (bajantes) y la **Figura 54** para el de extremos máximos (crecidas).

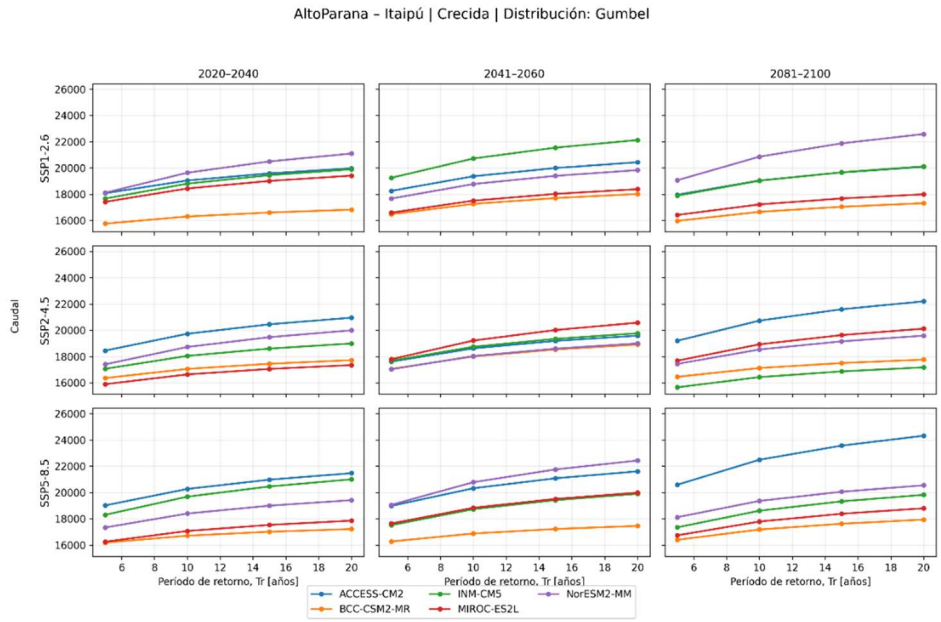


a. Ajuste mediante Gumbel

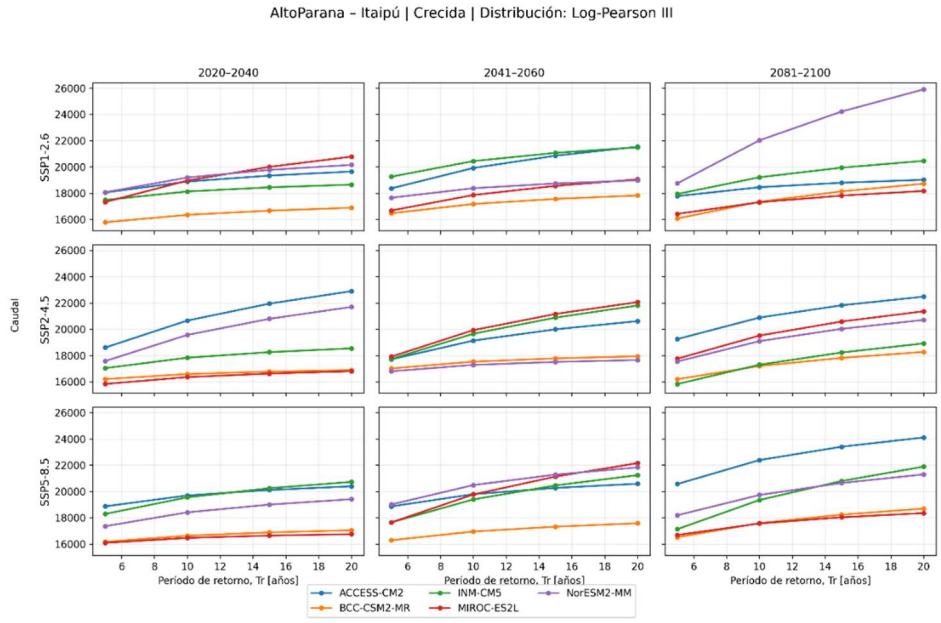


b. Ajuste mediante Log Pearson III

Figura 53. Caudales mínimos asociadas a distintas recurrencias – Alto Paraná



a. Ajuste mediante Gumbel



b. Ajuste mediante Log Pearson III

Figura 54. Caudales máximos asociadas a distintas recurrencias – Alto Paraná

10.2.3. PARAGUAY

Se presentan los resultados de evaluación de escenarios de cambio climático de la cuenca del río Paraguay en el cierre de Asunción.

10.2.3.1. Período histórico

En primer lugar, se presentan los resultados que surgen del análisis de la ventana histórica (2005-2015). La Figura 55 muestra que la respuesta de todos los modelos climáticos para el período histórico presenta una estadística de caudales similar a lo obtenido en el proceso de calibración. Solo se destacan los apartamentos en los modelos ACCESS-CM2 (sobreestimación) y NorESM2-MM (subestimación).

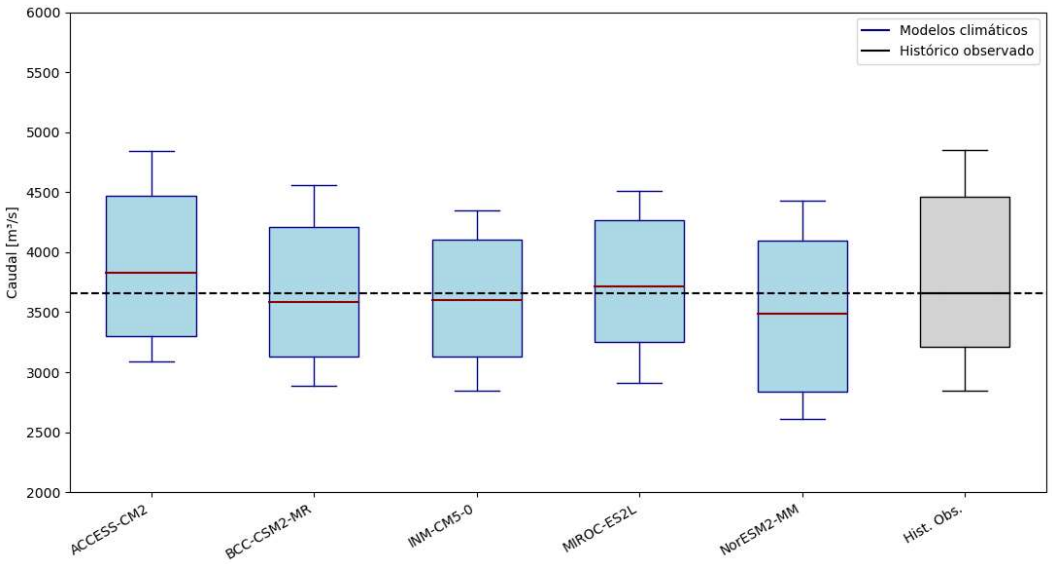


Figura 55. Boxplot de caudales calibrados y simulados a partir de modelos climáticos - Asunción

10.2.3.2. Proyecciones futuras

Para los escenarios de cambio climático se procedió de igual forma que en lo realizado en el Alto Paraná. Las tablas con el resumen estadístico de los escenarios procesados para las ventanas temporales de cada horizonte se presentan en el Anexo II.

Condensando la información de forma gráfica, la **Figura 56**, muestra que para los distintos escenarios no se observan variaciones significativas de los caudales al tomar el promedio de los modelos climáticos. Existe sin embargo una leve tendencia decreciente, con una variación de -5% para el percentil 50%. La mayor variabilidad de caudales se registra en el horizonte de mediano plazo, computada a partir de la envolvente de P10 y P90 de las proyecciones.

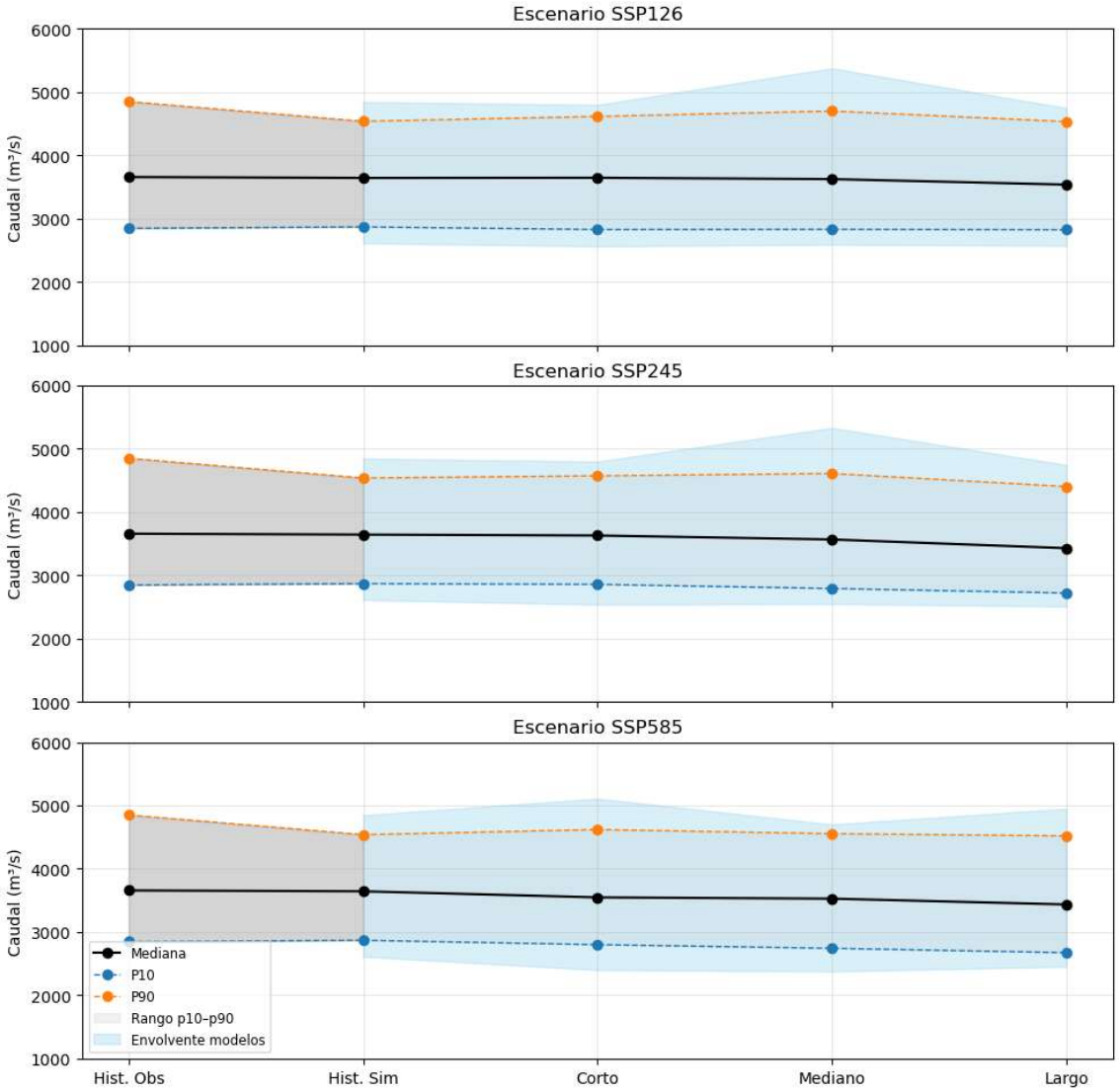


Figura 56. Proyecciones de caudales - Asunción

10.2.3.1. Análisis de duraciones

El procesamiento para el análisis de duraciones de eventos de bajantes y crecidas fue el mismo descripto anteriormente. Para el caso de la cuenca del Paraguay, se observa que para eventos de bajantes hay consistencia en un incremento de la cantidad de eventos (**Figura 57**) y sus duraciones (**Figura 58**), en la medida en que los escenarios son más extremos y los horizontes más lejanos. Esta tendencia no se observa de igual manera para las crecidas, donde respecto de la cantidad de eventos para el escenario de corto plazo se da un patrón que se invierte en los escenarios de mediano y largo plazo (**Figura 59**). La estadística de duración de eventos de crecida futuros tampoco ofrece señales claras, aunque la media de las duraciones bajo los distintos horizontes y escenarios se mantiene en un rango de +/- 4 días.

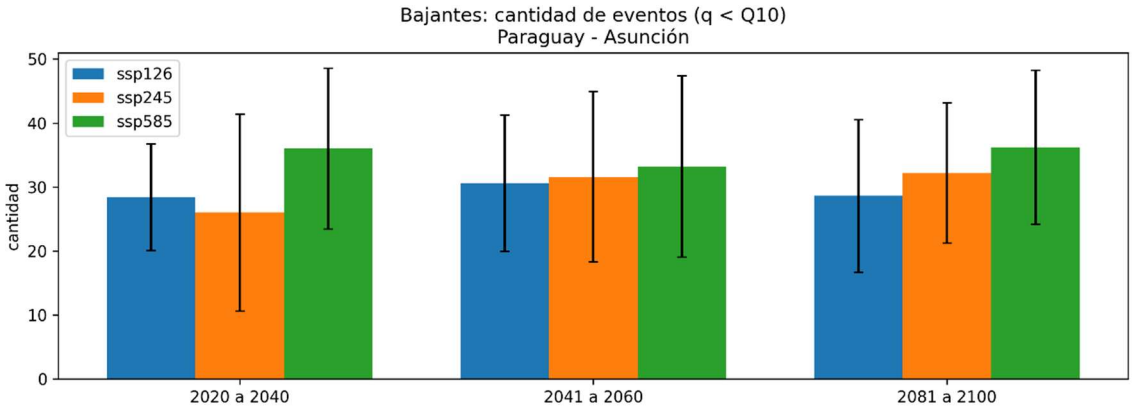


Figura 57. Cantidad de eventos de bajantes

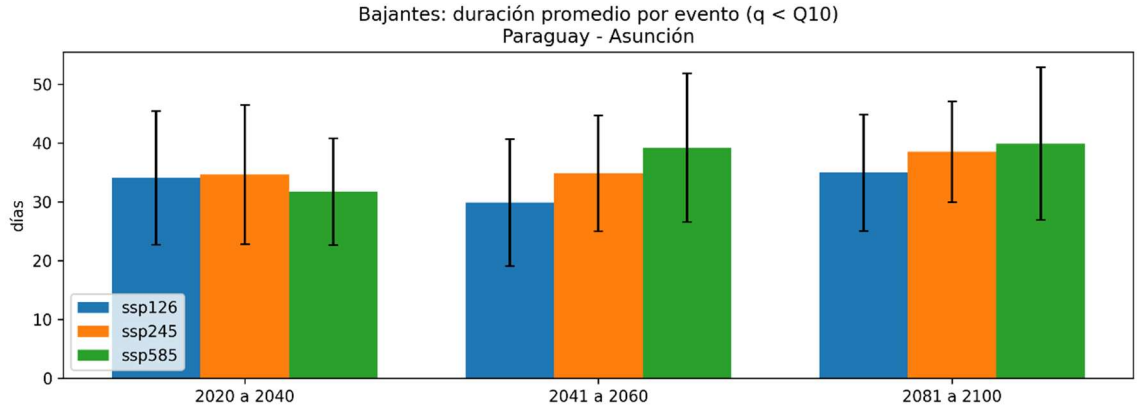


Figura 58. Estadística de duración de eventos de bajantes

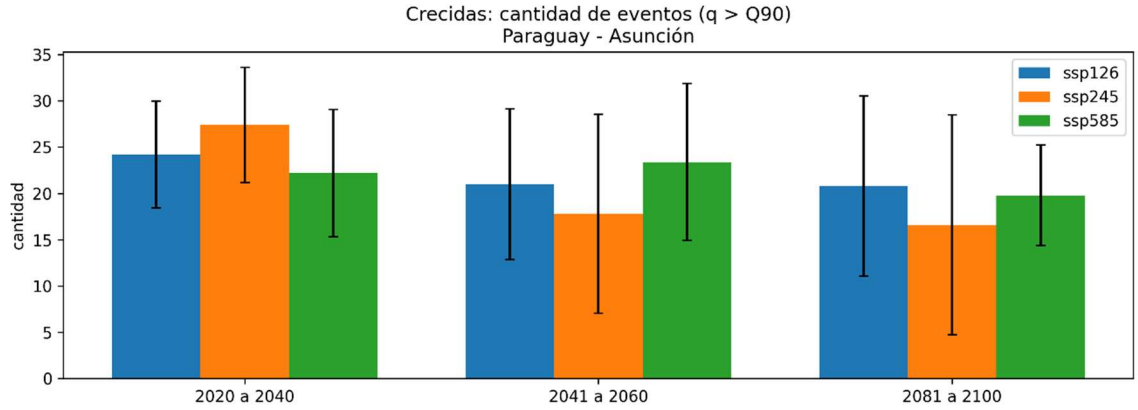


Figura 59. Cantidad de eventos de crecida

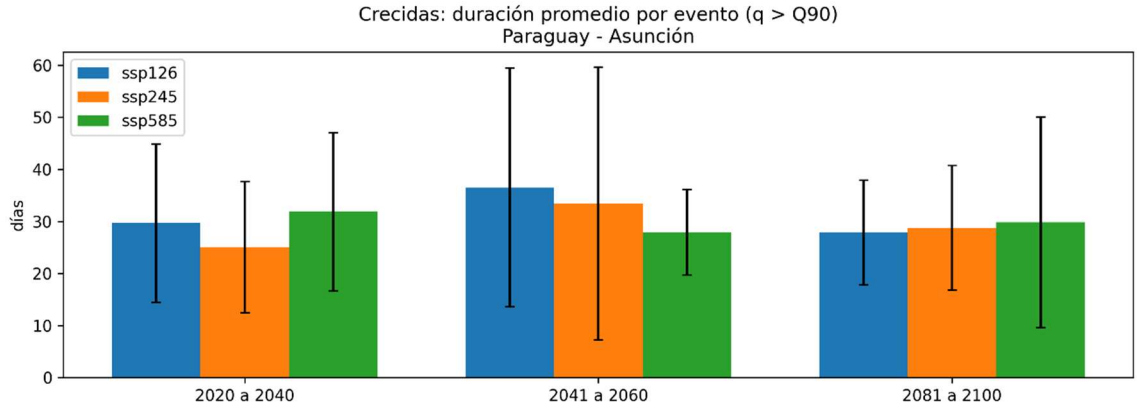
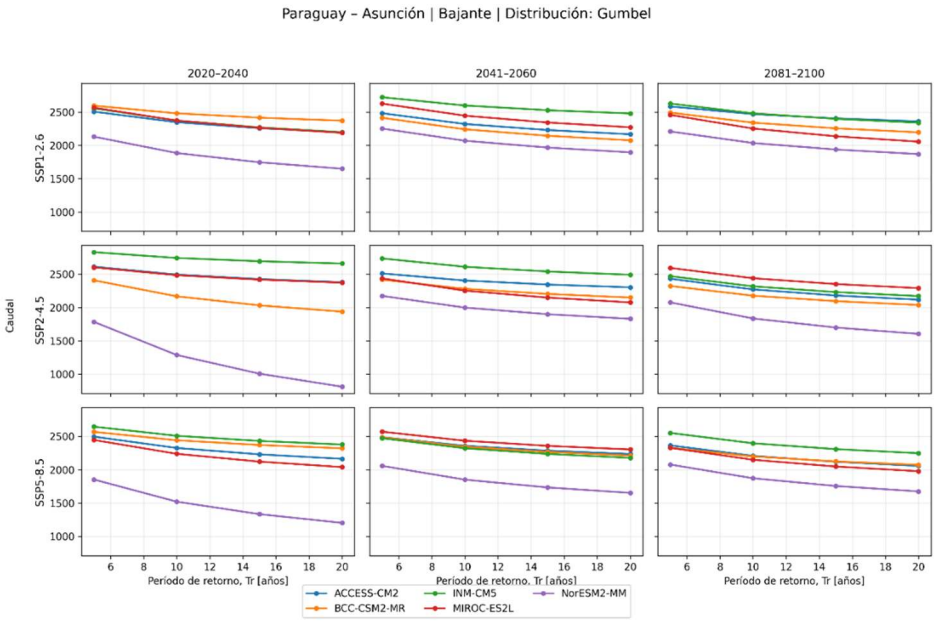


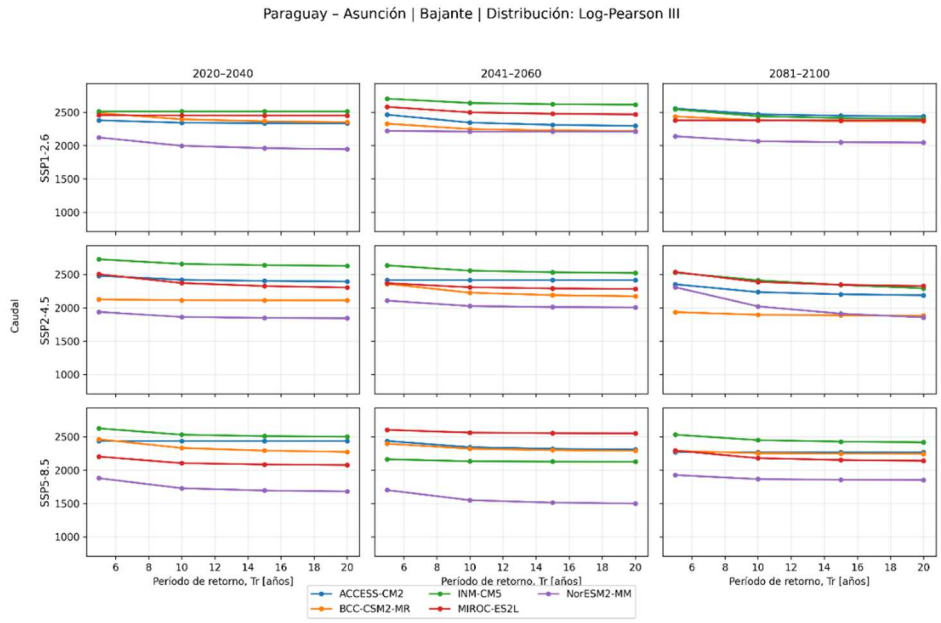
Figura 60. Estadística de duración de eventos de crecida

10.2.3.1. Eventos extremos

Al igual que para el Alto Paraná, para el río Paraguay se realizó una estadística de extremos. Se aplicó la misma metodología y los resultados se presentan en las **Figuras 61** y **62**.

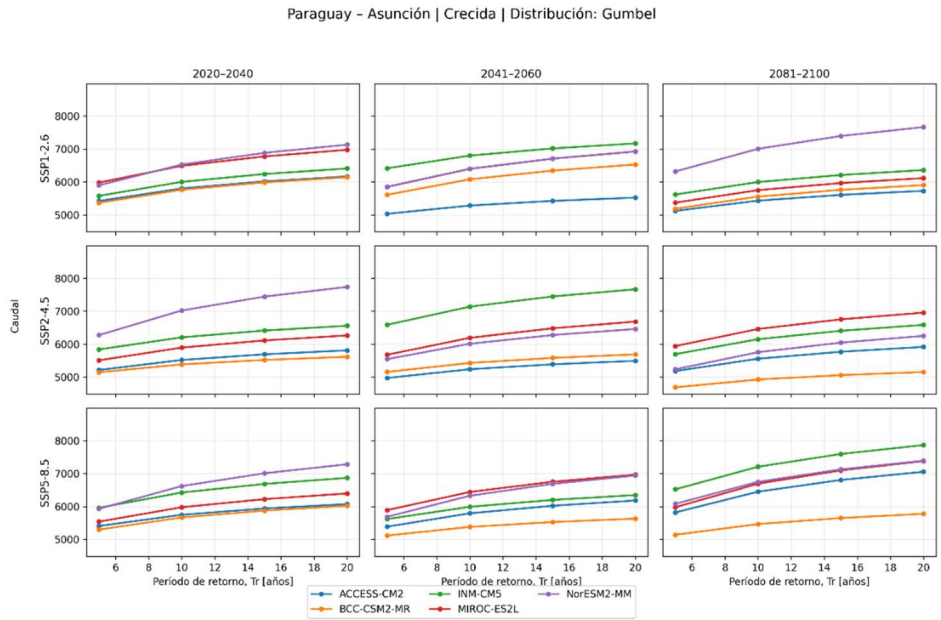


a. Ajuste mediante Gumbel

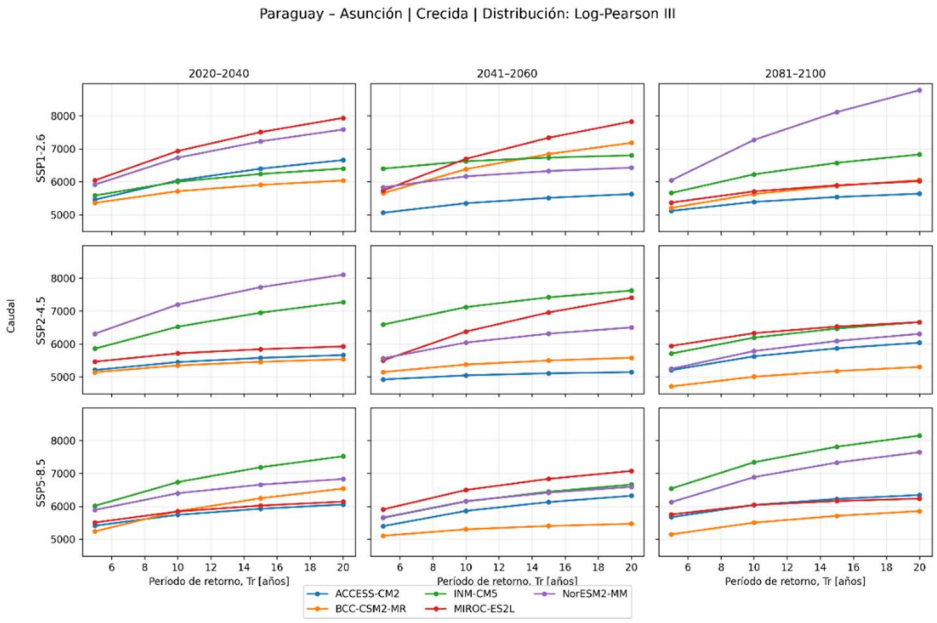


b. Ajuste mediante Log Pearson III

Figura 61. Caudales mínimos asociadas a distintas recurrencias – Paraguay



a. Ajuste mediante Gumbel



b. Ajuste mediante Log Pearson III

Figura 62. Caudales máximos asociadas a distintas recurrencias – Paraguay

11. CONCLUSIONES

Las conclusiones se dividen según las etapas del estudio en implementación del modelo, calibración y explotación para escenarios futuros.

En lo referido al proceso de implementación del modelo numérico, se destacan los siguientes aspectos:

- Se ha seleccionado el Sacramento, como modelo hidrológico para representar la transformación de lluvia-escorrentía. El mismo se implementa en un esquema semi-distribuido, subdividiendo el dominio en subcuencas y la escala temporal es diaria.
- El modelo tiene en cuenta las características topográficas, uso y cobertura de suelo, e incluye en su tratamiento rutinas para el ruteo de los hidrogramas hacia aguas abajo.
- La información de base que resulta insumo del modelo se selecciona de fuentes abiertas, y priorizando que las mismas tengan cobertura en toda la cuenca de modo de mantener consistencia de los datos.
- Los modelos climáticos empleados fueron seleccionados sobre la base de trabajos antecedentes en la región y descargados desde fuentes abiertas de datos. Los mismos tienen incorporado corrección por sesgo y reducción de escala, y no se realizaron en el alcance de este trabajo, correcciones adicionales.

En cuanto al proceso de calibración, se tiene que:

- La modelación hidrológica fue llevada a cabo satisfactoriamente en la mayor parte de la cuenca, encuentra limitaciones relacionadas a los siguientes

puntos:

- Aunque no es inherente al modelo, la falta de datos o calidad de los mismos sobre el Paraguay, Pilcomayo, cuencas de margen derecha sobre territorio argentino, impiden un ajuste confiable en el proceso de calibración.

- De la misma manera que con los datos de caudales, el insumo de lluvia resulta deficiente en algunos casos, lo cual se manifiesta en períodos en los que el modelo se corresponde con lo observado, seguidos de períodos donde el acuerdo no es igual de satisfactorio. Esto se observó especialmente en la cuenca del Paraguay.

- El modelo Sacramento presenta limitaciones en la modelación donde la dinámica vertical es preponderante. Esto se manifiesta en cuencas como el sector del abanico aluvial del Pilcomayo, Bajos Submeridionales y Salado Santafesino. No obstante, el aporte de este sistema es menor en relación a otros cursos, cuya dinámica es correctamente representada por el modelo.

- La operación de las centrales hidroeléctricas en la alta cuenca no es posible de reflejar en los resultados de la modelación. Sin embargo, se observa que en los puntos de cierre aguas abajo, coincidente con el ingreso de caudal en el modelo hidrodinámico, la respuesta del sistema se captura correctamente.

- El presente informe documenta el desarrollo de la modelación hidrológica en la mayor cobertura de la cuenca, especialmente de los principales cursos de aporte. Sin embargo, algunos sectores de la cuenca aún están en proceso de implementación y coinciden con los sectores con falta de datos para el ajuste del modelo.

- Los resultados obtenidos muestran una buena correlación entre los datos observados y simulados. En algunos casos, en los que las series de caudales observadas presentaban desfasajes respecto a las simuladas, también se corroboró la comparación en términos de volúmenes anuales. En esos casos se pudo constatar que la modelación desarrollada logra capturar los principales fenómenos y volúmenes escurridos en cada cuenca.

Sobre los resultados de escenarios futuros, se listan los principales aspectos:

- Se presenta la evaluación de escenarios sobre los modelos hidrológicos, de los sistemas con mayor caudal aportado al sistema: Alto Paraná en el cierre en Itaipú y el Paraguay, con cierre en Asunción.

- El procesamiento presentado en esta instancia consta en un análisis estadístico de las series simuladas. Se elaborará una próxima entrega como complementaria a este informe con análisis de intensidad, duración y frecuencia.

- Las precipitaciones no muestran una tendencia clara de aumento o disminución en ninguno de los escenarios evaluados.

- La evapotranspiración presenta incrementos sostenidos hacia los horizontes de mediano y largo plazo, especialmente bajo SSP5-8.5. Esta señal es consistente entre modelos y responde al aumento de temperatura proyectado para la región.

- Los caudales medios proyectados no exhiben variaciones significativas respecto del clima actual cuando se consideran los valores centrales (P50) del ensamble. En el Alto Paraná, las diferencias entre períodos son menores al 2%, mientras que en el Paraguay la tendencia es levemente decreciente ($\approx -5\%$).

- Aumenta la dispersión entre modelos hacia horizontes lejanos, principalmente bajo SSP5-8.5. El rango de la envolvente (P10–P90) crece entre escenarios, indicando mayor incertidumbre hidrológica futura.

- El procesamiento de las series de caudales muestra que, tanto para bajantes como para crecidas, existe un aumento en la cantidad de eventos. En relación a la duración de los eventos, también se observa un incremento (aunque leve) en el tiempo de permanencia.

12. REFERENCIAS

Batjes, N. H., 2015. World soil property estimates for broad-scale modelling (WISE30sec) (No. 2015/01). ISRIC-World Soil Information.

Bianchi, J. y Goniadzki, D., 2012. Modelación hidrológica de la cuenca del río Gualeguay para pronóstico y alerta hidrológico utilizando información de sensores remotos de microondas. IFRH 2012, Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos.

CIC-PLATA, 2016. Análisis Diagnóstico Transfronterizo de la Cuenca del Plata (ADT). Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata (CIC). Buenos Aires, diciembre.

FAO, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. IUSS Working Group WRB. Rome.

Georgakakos, K.P., Sperfslage, J.A. & Guetter, A.K., 1996. Operational GIS-based models for NEXRAD radar data in the U.S. Proceedings International Conference on Water Resources and Environmental Research: Towards the 21st Century (Kyoto, Japan, Oct 29-31), pp. 603-609.

Guetter, A. K., 2000. Hydrological Modeling and Hydrological Warning Systems. Lecture Notes. Advanced Course in Numerical Modeling. Hydrological Modeling, Lima, Peru, 03-14/julio/2000

Ginzburg, R.G., Menéndez, A.N., Torrella, S.A., Sabarots Gerbec, M., Adámoli, J.M., 2014. La cuenca del río Miriñay. Estudio para definir los parámetros y criterios ambientales. Instituto Correntino de Agua y del Ambiente, ICAA.

Guizzardi, S. y Sabarots Gerbec, M., 2018. Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Uruguay. LADHI 2018, XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina.

Guizzardi, S., Ortiz, N.E., Bianchi, J., Sarti, M., Giordani, L. y Sabarots Gerbec, M., 2024. Diseño y validación de condiciones de borde para modelos de pronósticos en la cuenca del río Paraná. LADHI 2024, XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Medellín, Colombia.

Hargreaves, G.H. y Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.

Karra, K., et al., 2021. Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning. IGARSS 2021-2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

MAyDS, 2023. Cambios observados y escenarios climáticos futuros para Argentina para diferentes horizontes temporales y umbrales de calentamiento global. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Argentina.

Nash, J.E. y Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3), 282–290.

Ortiz, N.E. y Sabarots Gerbec, M., 2025. PRODUCTO 1A. Plan de trabajo: Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná y relevamiento de tomas. Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná y modelo de detalle de calidad de agua en la Toma Hernández para distintos escenarios de clima futuro. *Territorialización de la Acción Ambiental con foco en Adaptación al Cambio Climático.* AECID/INA.

Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham, and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A. et al., 2022. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. Sci Data 9, 262. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A. Nemani, R., 2021. NEX-GDDP-CMIP6. NASA Center for Climate Simulation. https://doi.org/10.7917/OFSG3345

Uriburu Quirno, M., Borús, J. y Goniadzki, D., 2006. Continuous hydrologic modeling of middle Uruguay tributary flows. 11th Conference of the Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins (ERB). Luxembourg.

Uriburu Quirno, M., 2011. Risk and Hydrological Emergency Management. Algorithm Theoretical Basis Document. PIATURA SAOCOM. Comisión Nacional de Actividades Espaciales. Buenos Aires, Argentina.

Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Bates, P. D., et al., 2017. A high-accuracy map of global terrain elevations: Accurate Global Terrain Elevation Map (MERIT-DEM). AGU Fall Meeting 2017.

Global Gateway

Cofinanciado por la Unión Europea

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

PROGRAMA EUROCLIMA

Informe de entrega de productos

Actividad 2: Modelación hidrológica (ANEXOS)

Nombre de la consultoría: Modelación hidrológica e hidrodinámica del río Paraná y modelo de detalle de calidad de agua en la Toma Hernández para distintos escenarios de clima futuro

Fecha: 11 de noviembre de 2025

País: Argentina

Producido: Instituto Nacional del Agua

Implementado por:

aecid
Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

INA
Instituto Nacional del Agua

Este informe se ha elaborado para el Programa EUROCLIMA de la Unión Europea,

Se enmarca en la acción Apoyo a la *Territorialización de la Acción Ambiental con foco en Adaptación al Cambio Climático*, que se desarrolla dentro del proyecto "Estudios para mejorar la gestión del agua en un contexto de cambio climático"

AUTORIDADES del INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA:

PRESIDENTE (A/C del despacho)
Lic. Bernardo Bartolomé HEREDIA

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS
-

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDRÁULICA
Dr. Ing. Pablo Ezequiel GARCÍA

SUBGERENTE LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS
Bioq. Yanina EL KASSISSE

SUBGERENTE LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS
Ing. Jorge COLLINS

SUBGERENTE LABORATORIO DE HIDROLOGÍA
Lic. Gustavo ALMEIRA

PERSONAL PARTICIPANTE EN LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO:

SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Programa de Hidráulica Computacional

Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ
Dr. Ing. Pablo E. GARCIA
Ing. Martín SABAROTS GERBEC
Ing. Santiago GUIZZARDI
Mag. Ing. Martiano RE

SUBGERENCIA LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUAS

Laboratorio Experimental de Tecnologías Sustentables

Lic. Bárbara GOMEZ
Lic. Marisol REALE
Téc. Qca. Lorena MARQUINA
Sra. Silvia MOYANO
Lic. Valeria RODRIGUEZ SALEMI
Doc. Virginia ZAPLARA
Téc. Qco. Nelson DIAZ
Lic. Carolina MUJICA
Sr. Germán LOZA

SUBGERENCIA CENTRO REGIONAL LITORAL

Lic. Esteban COLLINS
Ing. Rosana MAZZON
Lic. Jorge COLLINS
Dra. Silvia RAFAELLI

SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDROLOGÍA

Programa de Sistemas de Información y Alerta Hidrológica en Cuenca del Plata

Lic. Juan BIANCHI
Dr. Lic. Leandro GIORDANO
Lic. Tomás CALVI

INFORME ELABORADO POR:

Ing. Martín SABAROTS GERBEC
Mag. Lic. Nicolás E. ORTIZ
Lic. Juan BIANCHI
Ing. Santiago GUIZZARDI
Mag. Ing. Mariano RE
Lic. Tomás CALVI

ANEXO I: Software de modelación hidrológica

A continuación, se presenta el código fuente del modelo hidrológico Sacramento implementado en lenguaje ***python3***:

```
def Sacramento(
      P: float,
      PET: float,
      X1: float,
      X2: float,
      X3: float,
      X4: float,
      VolAcum: float,
      Xc1: float,
      Xc2: float,
      m1: float,
      m2: float,
      m3: float,
      alfa: float
      C1: float,
      C2: float,
      Drenaje: float,
      sup: float,
      mu: float,
      max_substeps: int = 50)

-> List[float]:

""" Integra **un día** del modelo Sacramento con subpasos (Heun/RK2).

Parámetros:

P, PET : float
      Precipitación y evapotranspiración potencial del día [mm/d].

X1..X4 : float
      Estados (lámina) en capa superior, capa inferior y dos reservorios
      lineales [mm].

VolAcum : float
      Volumen acumulado (consistente con esc y área) del periodo previo.

Xc1, Xc2 : float
      Capacidades máximas de las capas superior e inferior [mm].
```

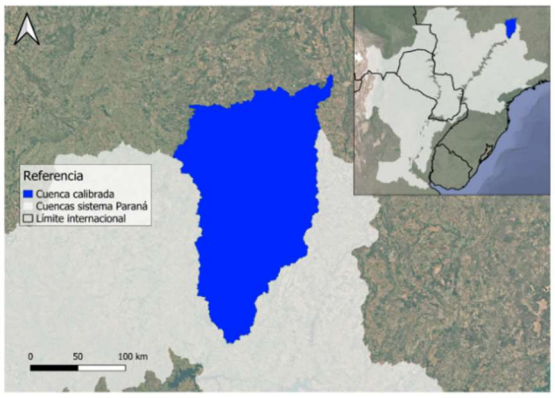
```
m1, m2, m3 : float
      Exponentes del esquema Sacramento.

alfa : float
      Parámetro del reservorio lineal (1/día aprox.).

C1, C2 : float
      Coeficientes empíricos (INTER y percolación no lineal).

Drenaje : float
      Drenaje máximo permitido (mm/d) según suelo/uso.

sup : float Área de cuenca [km²].

mu : float
      Relación de reparto del GW entre pérdidas y aporte al flujo base.

max_substeps : int, default 50
      Cota superior de subpasos de integración dentro del día.

Retorna
        Vector con magnitudes del último subpaso/actualización del día:

        [P, PET, X1, X2, X3, X4, esc, Qsim, Vol, VolAcum, ET1, ET2,
         GW_perd, perdidas_tot, PC, esc_tot, SR_rel, INTER_rel, GW_rel,
         rel1VolCap, rel2VolCap]   """

# C3 se calcula para cumplir la condición de maximización de PC dentro de
la función/ # PC_max=C3*Xc2*(1+C2) == Drenaje => C3=Drenaje/(Xc2*(1+C2))

C3 = Drenaje / (Xc2 * (1.0 + C2))

# Subpasos dentro del día: N ~ P//2, pero con cota superior
try:
    N = int(P // 2)
except Exception:
    N = 1
if N < 1:
    N = 1
if max_substeps is not None:
    N = min(N, int(max_substeps))
Dt = 1.0 / N

# Variables que se usarán para el resumen al final del día
ET1 = ET2 = SR = INTER = GW = PC = 0.0

for _ in range(N):
```

```
# Estados al comienzo del subpaso
X1k, X2k, X3k, X4k = X1, X2, X3, X4

# --- Paso 1 ---
# Escurrimiento superficial [mm/d]
SR = P * ((X1 / Xc1) ** m1)
# Percolación [mm/d]
PC = C3 * Xc2 * (1 + C2 * ((1 - X2 / Xc2) ** m2)) * (X1/Xc1)
# ET capa sup [mm/d]
ET1   = PET * (X1 / Xc1)
# Aporte a FB desde capa sup [mm/d]
INTER = C1  * X1
# ET capa inf [mm/d]
ET2   = (PET - ET1) * ((X2 / Xc2) ** m3)
# Aporte desde capa inf [mm/d]
GW = C3 * X2
# Flujo base [mm/d]
BF    = INTER + GW / (1 + mu)

q11 = P - SR - PC - ET1 - INTER
q12 = PC - ET2 - GW
q13 = (SR + BF) - alfa * X3
q14 = alfa * X3 - alfa * X4

X1 = X1 + Dt * q11
X1 = 0.0 if X1 < 0 else (Xc1 if X1 > Xc1 else X1)

X2 = X2 + Dt * q12
X2 = 0.0 if X2 < 0 else (Xc2 if X2 > Xc2 else X2)

X3 = X3 + Dt * q13
X3 = 0.0 if X3 < 0 else X3  # sin límite superior

X4 = X4 + Dt * q14
X4 = 0.0 if X4 < 0 else X4  # sin límite superior

# --- Paso 2 --- (con estados actualizados)
SR = P * ((X1 / Xc1) ** m1)
PC = C3 * Xc2 * (1 + C2 * ((1 - X2 / Xc2) ** m2)) * (X1/Xc1)
ET1 = PET * (X1 / Xc1)
INTER = C1  * X1
ET2 = (PET - ET1) * ((X2 / Xc2) ** m3)
GW = C3 * X2
BF = INTER + GW / (1 + mu)


q21 = P - SR - PC - ET1 - INTER
```

```
q22 = PC - ET2 - GW
q23 = (SR + BF) - alfa * X3
q24 = alfa * X3 - alfa * X4

X1 = X1k + Dt * (q11 + q21) / 2.0
X1 = 0.0 if X1 < 0 else (Xc1 if X1 > Xc1 else X1)

X2 = X2k + Dt * (q12 + q22) / 2.0
X2 = 0.0 if X2 < 0 else (Xc2 if X2 > Xc2 else X2)

X3 = X3k + Dt * (q13 + q23) / 2.0
X3 = 0.0 if X3 < 0 else X3

X4 = X4k + Dt * (q14 + q24) / 2.0
X4 = 0.0 if X4 < 0 else X4

# Salidas del día (último estado)
esc = alfa * X4                # [mm/d]
Qsim = esc * sup / 86.4        # [m³/s] (mm·km²/d → m³/s)
Vol = esc * sup                # lámina*área (convención del proyecto)
VolAcum = VolAcum + esc * sup

# Pérdidas y totales (con última evaluación)
perdida_total = ET1 + ET2 + (GW * mu) / (1 + mu)
esc_tot = SR + INTER + (GW / (1 + mu))

# Cocientes seguros (evitar división por 0)
if esc_tot == 0:
    sr_rel = inter_rel = gw_rel = 0.0
else:
    sr_rel    = SR / esc_tot
    inter_rel = INTER / esc_tot
    gw_rel    = (GW / (1 + mu)) / esc_tot

resultados = [
    P, PET, X1, X2, X3, X4, esc, Qsim, Vol, VolAcum, ET1, ET2,
    (GW * mu) / (1 + mu),  # GW_perd
    perdida_total, PC, esc_tot,
    sr_rel, inter_rel, gw_rel,
    X1 / Xc1, X2 / Xc2 ]
return resultados
```

ANEXO II: Resultados de la calibración

Se presentan fichas de resultados de calibración por subcuencas. En cada una de ellas se encuentra un mapa de localización, se detalla el área que abarca y se destaca el nombre completo. Respecto del proceso de calibración se ofrecen los resultados obtenidos de los distintos parámetros seleccionados del método de Sacramento: C1, C2, m1, m2, m3, μ y α, luego se informan los caudales medios simulados y observados, y a continuación los valores de los indicadores de performance de las simulaciones (RMSE, MAE y NSE). Además, se suman a la ficha los gráficos de las series temporales de caudal y de volumen anual.

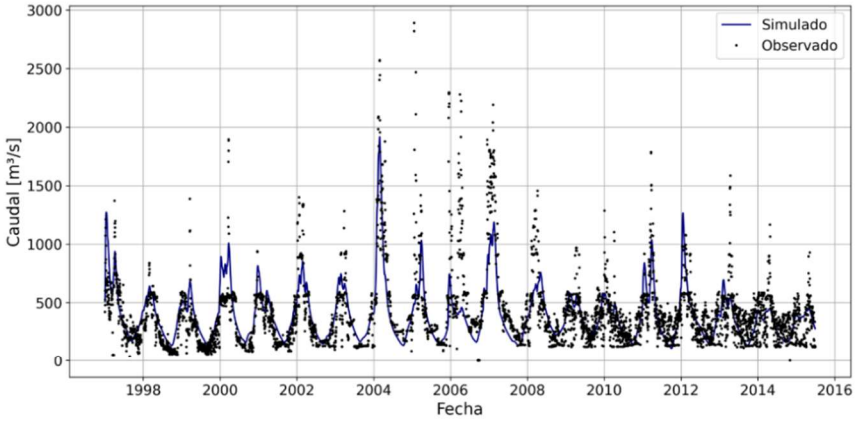


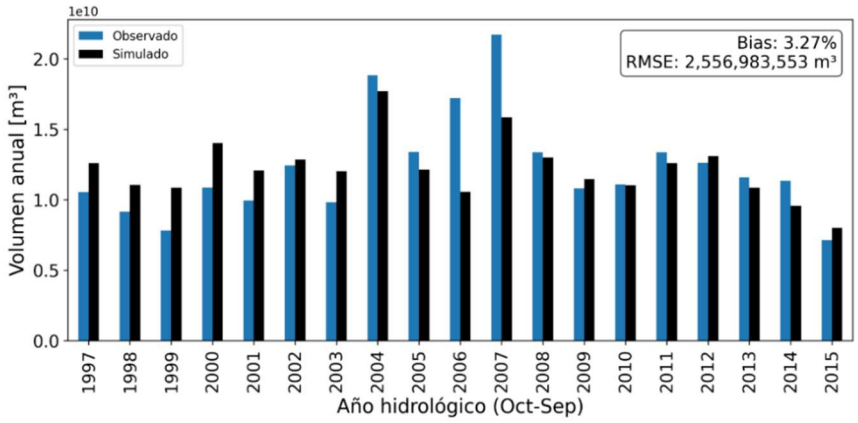
Nombre: UHE Corumbá I Barramento
Área: 27758 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 100
m1 = 3.25
m2 = 2.00
m3 = 4.50
μ = 2.50
α = 0.15

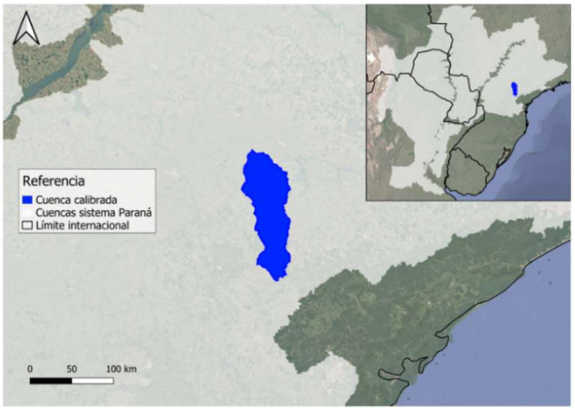
Caudales medios:
Simulado = 396 m³/s
Observado = 399 m³/s

Indicadores:
RMSE = 209
MAE = 136
NSE = 0.54





Sistema Alto Paraná

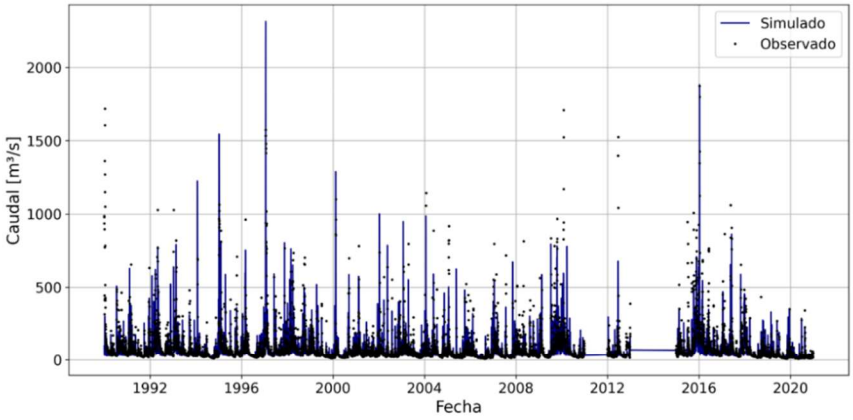


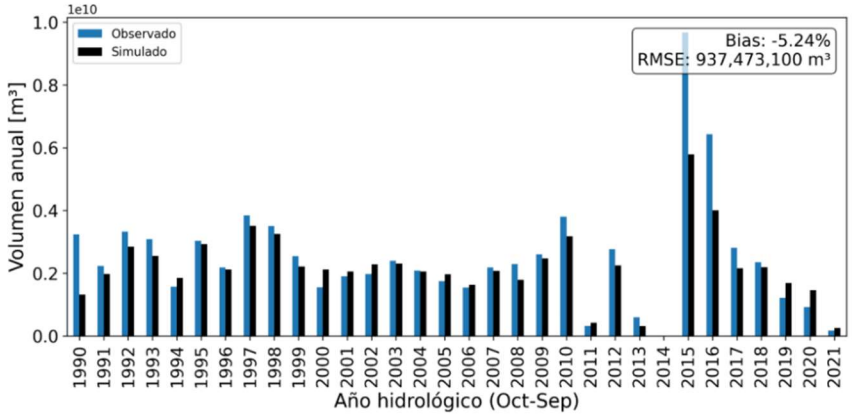
Nombre: Rio das Cinzas
Área: 5614 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 300
m1 = 1.50
m2 = 3.00
m3 = 3.00
μ = 4.75
α = 0.90

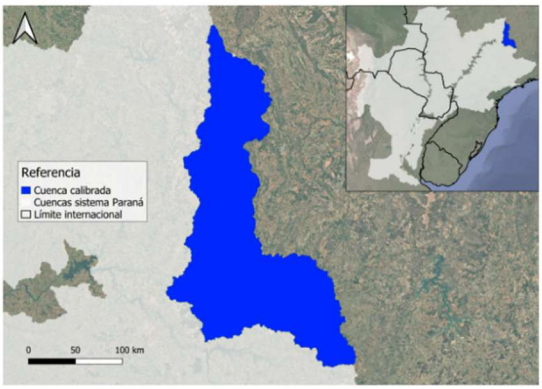
Caudales medios:
Simulado = 71 m³/s
Observado = 80 m³/s

Indicadores:
RMSE = 95
MAE = 41
NSE = 0.44





Sistema Alto Paraná

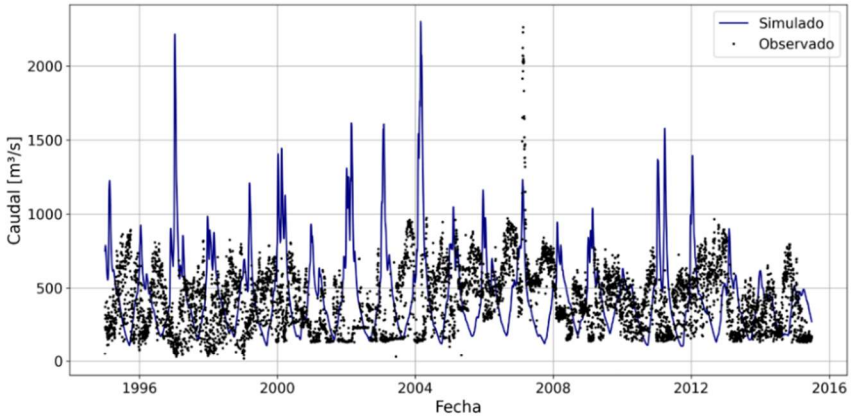


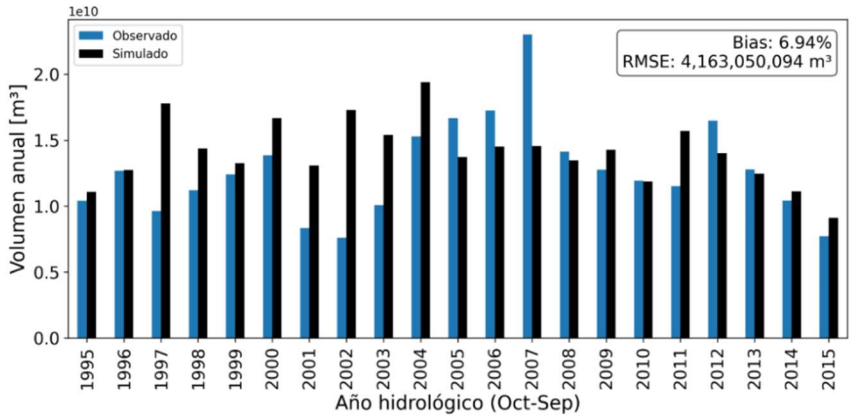
Nombre: UHE Emborcacao Barramento
Área: 28935 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 100
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 2.00
α = 0.15

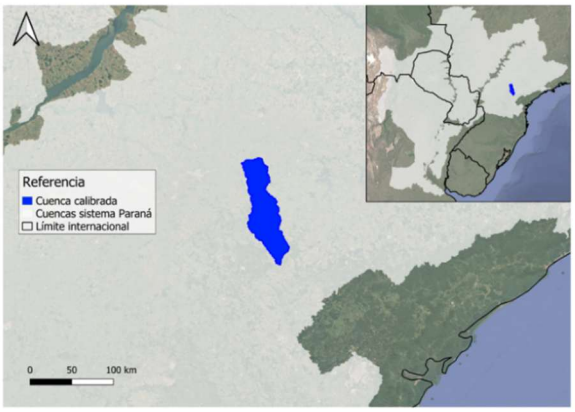
Caudales medios:
Simulado = 457 m³/s
Observado = 411 m³/s

Indicadores:
RMSE = 408
MAE = 309
NSE = -2.43





Sistema Alto Paraná

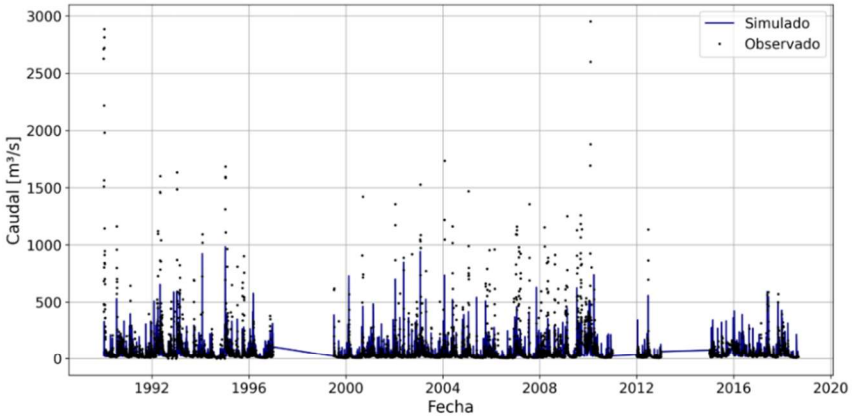


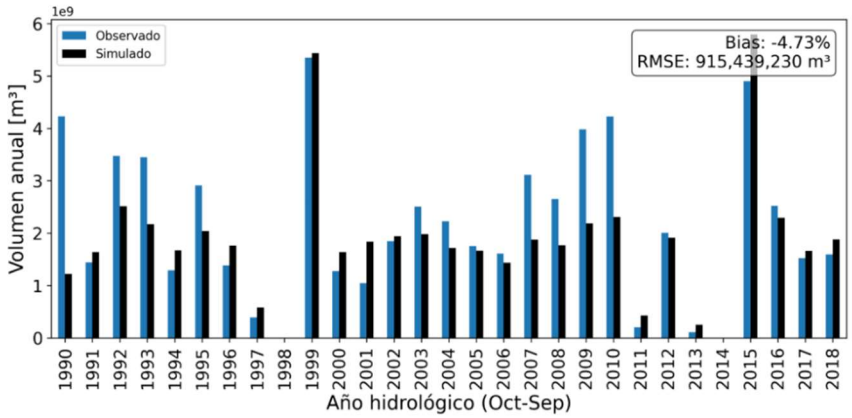
Nombre: Rio Laranjinha
Área: 3456 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 300
m1 = 1.25
m2 = 3.50
m3 = 3.00
μ = 3.00
α = 0.90

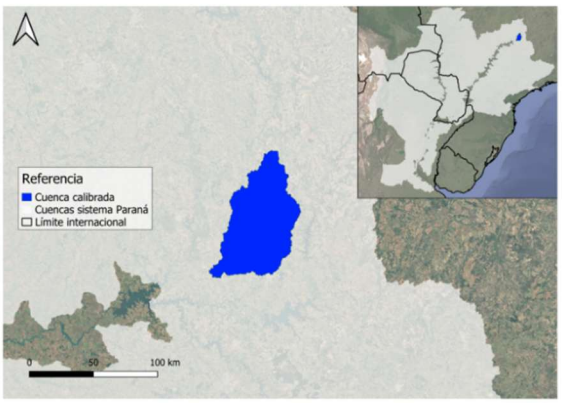
Caudales medios:
Simulado = 58 m³/s
Observado = 71 m³/s

Indicadores:
RMSE = 146
MAE = 51
NSE = 0.25





Sistema Alto Paraná

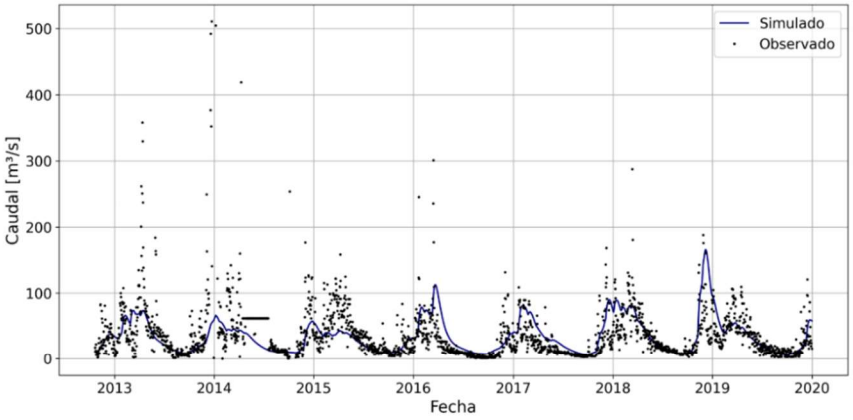


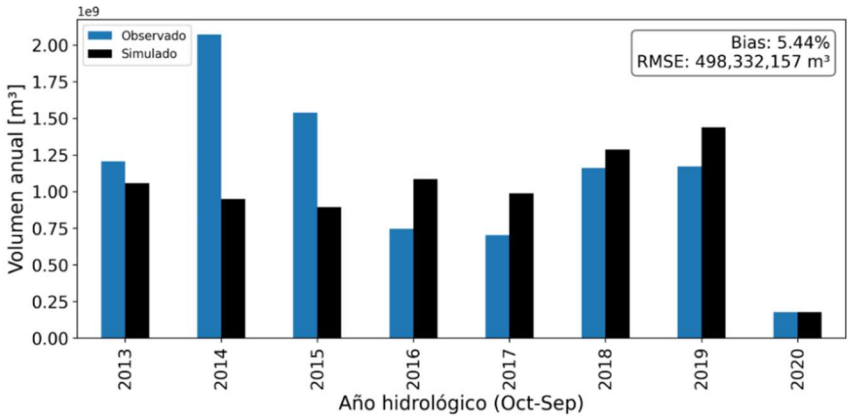
Nombre: PCH Goiandira Justante
Área: 4058 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 80
m1 = 2.00
m2 = 3.50
m3 = 2.00
μ = 5.00
α = 0.08

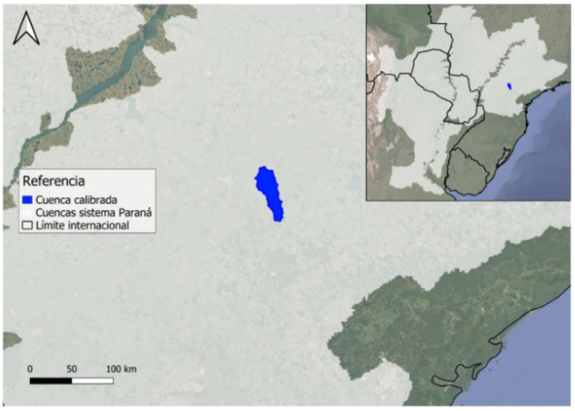
Caudales medios:
Simulado = 34 m³/s
Observado = 35 m³/s

Indicadores:
RMSE = 35
MAE = 19
NSE = 0.17





Sistema Alto Paraná

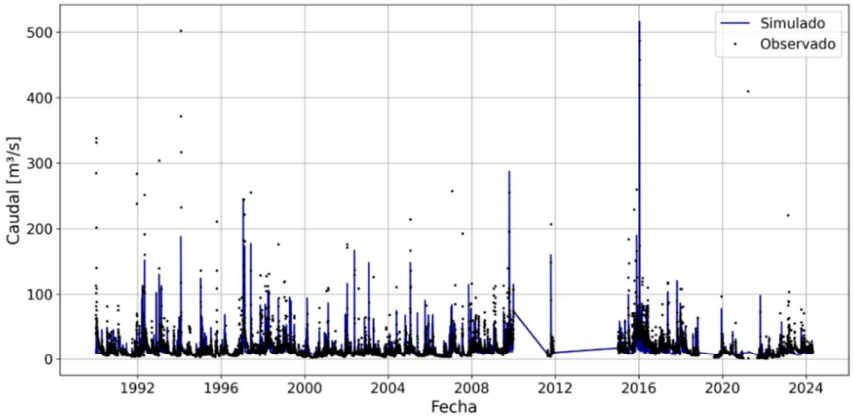


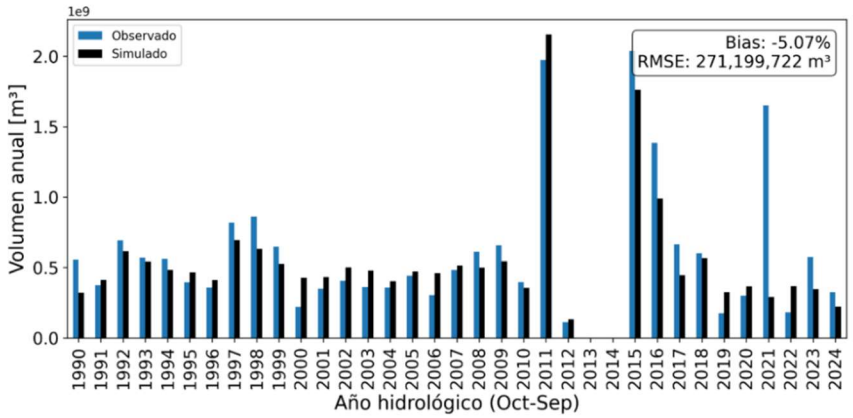
Nombre: Rio Congonhas
Área: 1050 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 110
m1 = 2.00
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 3.00
α = 0.70

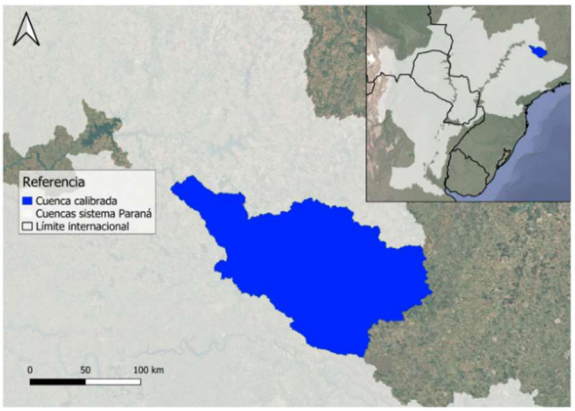
Caudales medios:
Simulado = 16 m³/s
Observado = 17 m³/s

Indicadores:
RMSE = 15
MAE = 7
NSE = 0.51





Sistema Alto Paraná

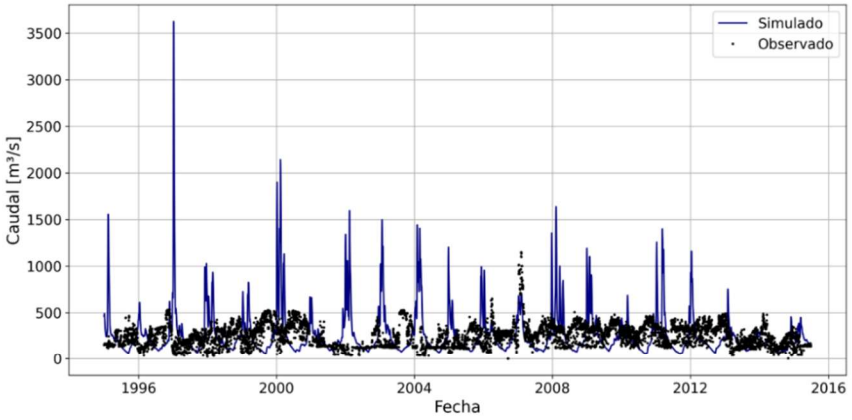


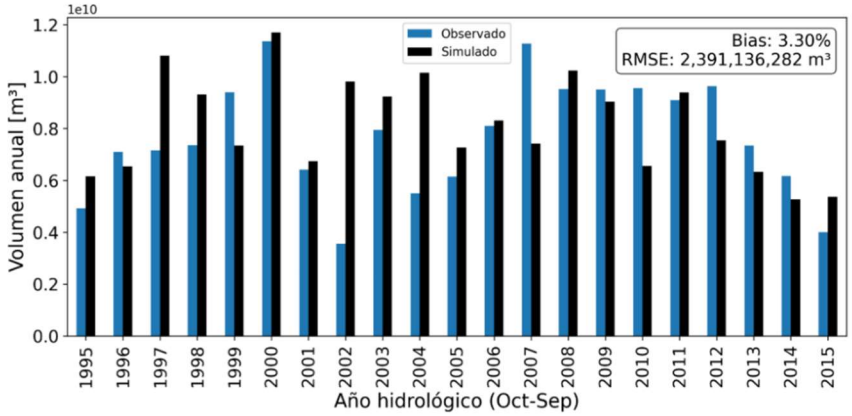
Nombre: Capim Branco
Área: 18634 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 100
m1 = 3.00
m2 = 3.00
m3 = 3.00
μ = 3.50
α = 0.08

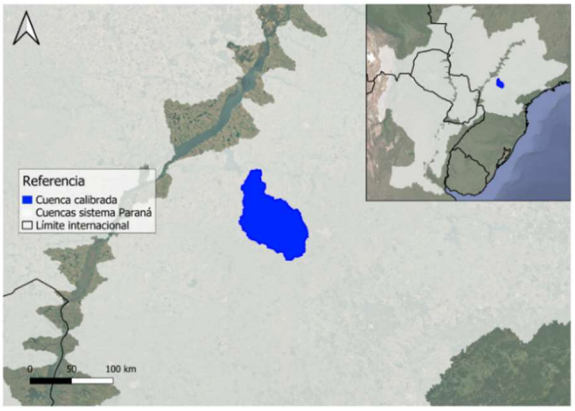
Caudales medios:
Simulado = 263 m³/s
Observado = 249 m³/s

Indicadores:
RMSE = 300
MAE = 190
NSE = -4.99





Sistema Alto Paraná

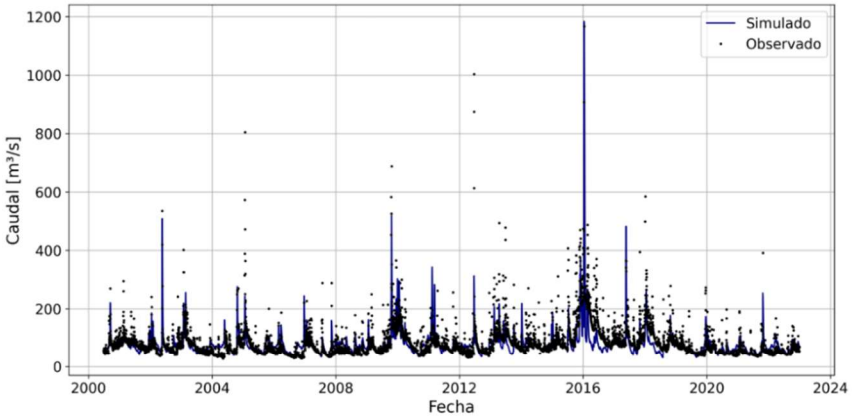


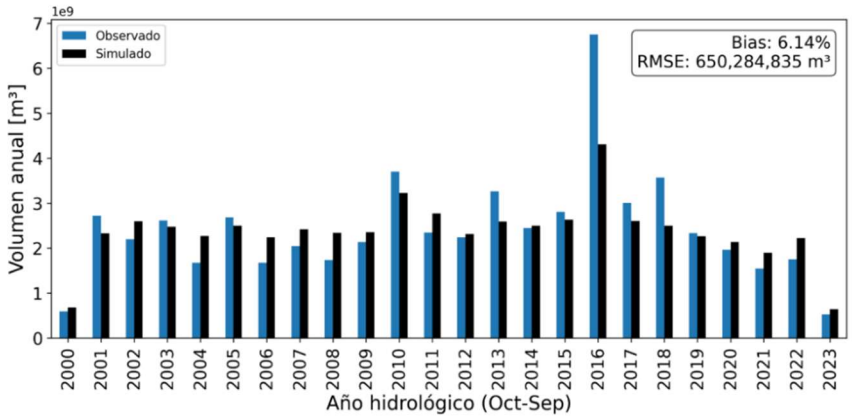
Nombre: Rio Pirapo
Área: 5032 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 150
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 2.25
α = 0.45

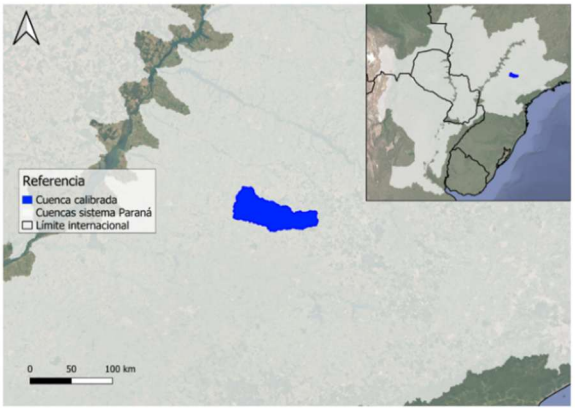
Caudales medios:
Simulado = 79 m³/s
Observado = 81 m³/s

Indicadores:
RMSE = 39
MAE = 24
NSE = 0.50





Sistema Alto Paraná

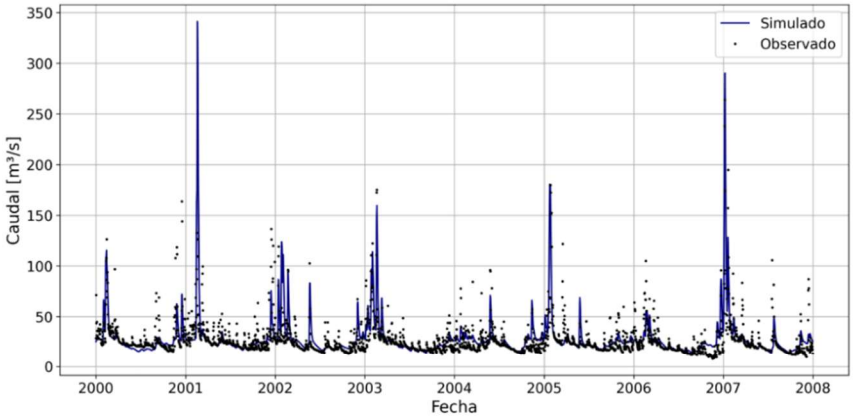


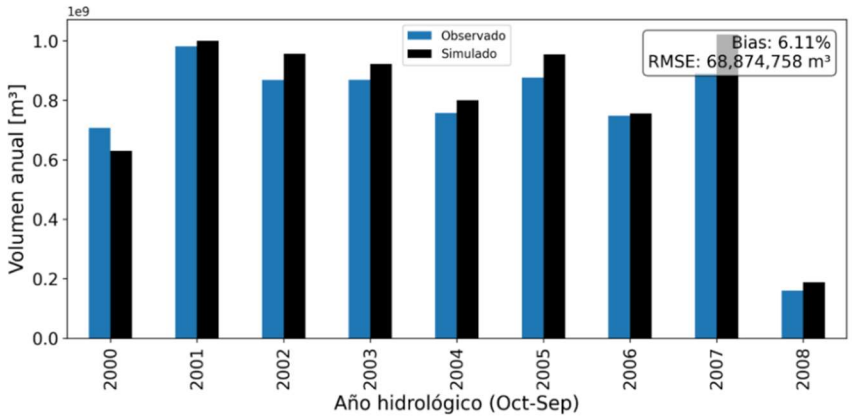
Nombre: Rio do Peixe
Área: 2912 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 150
m1 = 3.00
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 4.50
α = 0.50

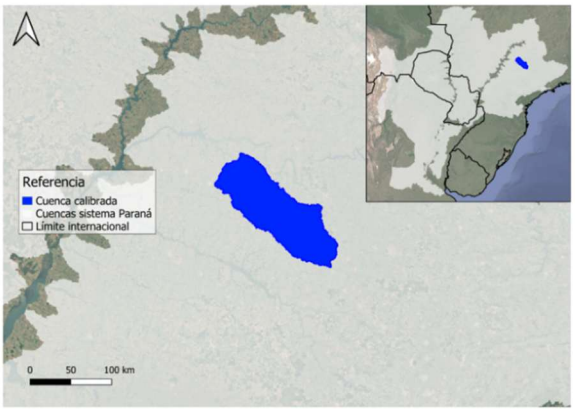
Caudales medios:
Simulado = 28 m³/s
Observado = 27 m³/s

Indicadores:
RMSE = 16
MAE = 7
NSE = 0.18





Sistema Alto Paraná

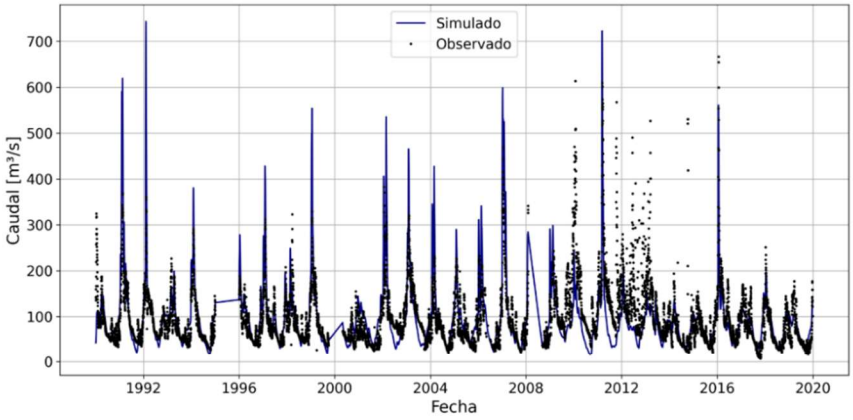


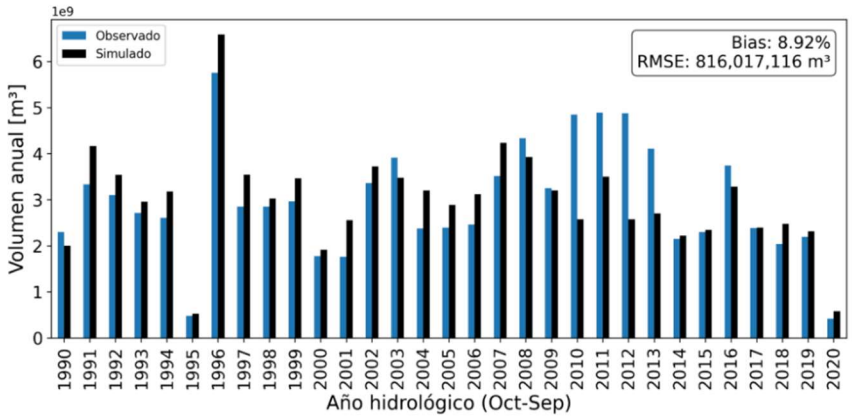
Nombre: Rio Turvo
Área: 9104 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 125
m1 = 3.50
m2 = 3.25
m3 = 3.00
μ = 3.00
α = 0.20

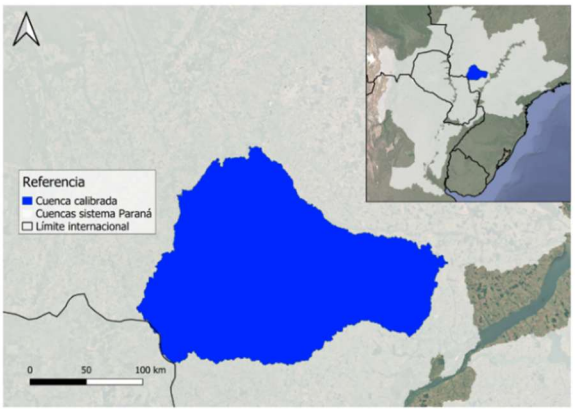
Caudales medios:
Simulado = 95 m³/s
Observado = 95 m³/s

Indicadores:
RMSE = 53
MAE = 31
NSE = 0.36





Sistema Alto Paraná

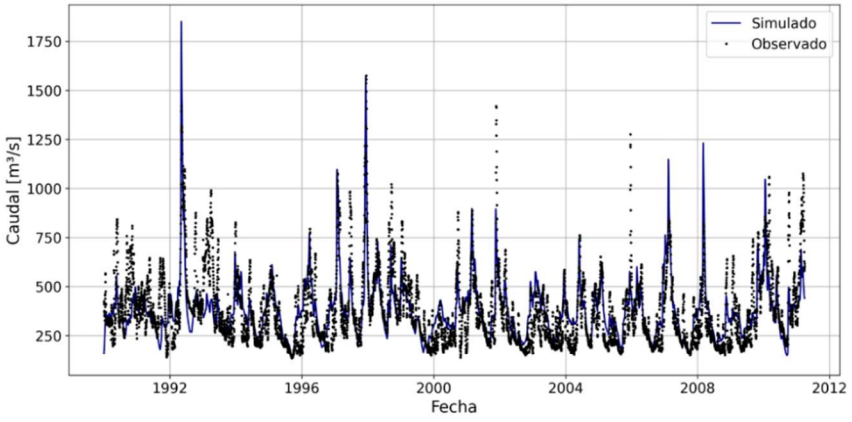


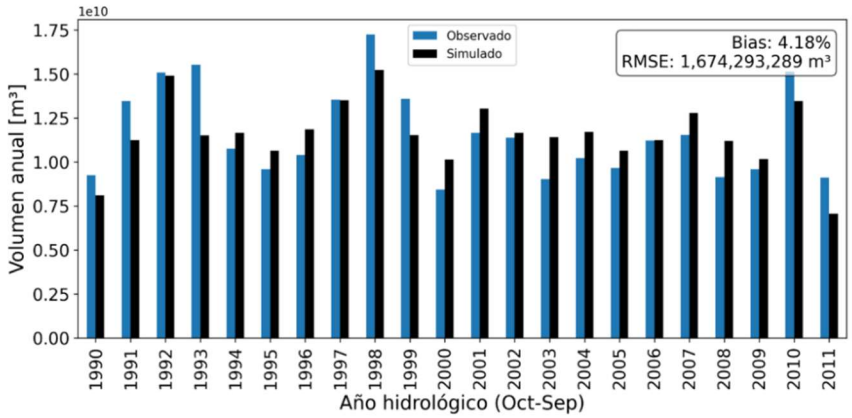
Nombre: Rio Ivinhema
Área: 31866 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 130
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 3.00
α = 0.20

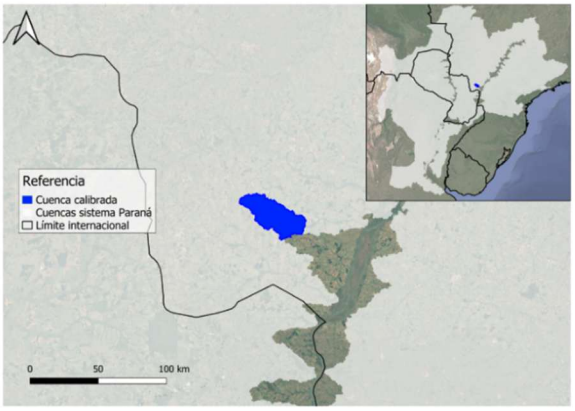
Caudales medios:
Simulado = 379 m³/s
Observado = 379 m³/s

Indicadores:
RMSE = 121
MAE = 87
NSE = 0.59





Sistema Alto Paraná

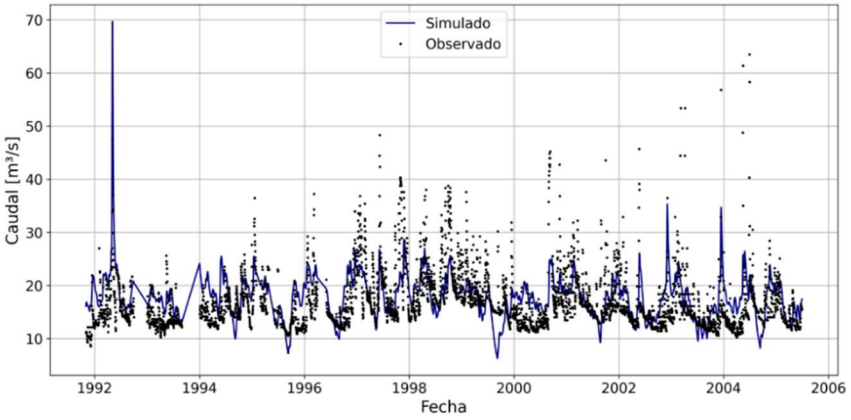


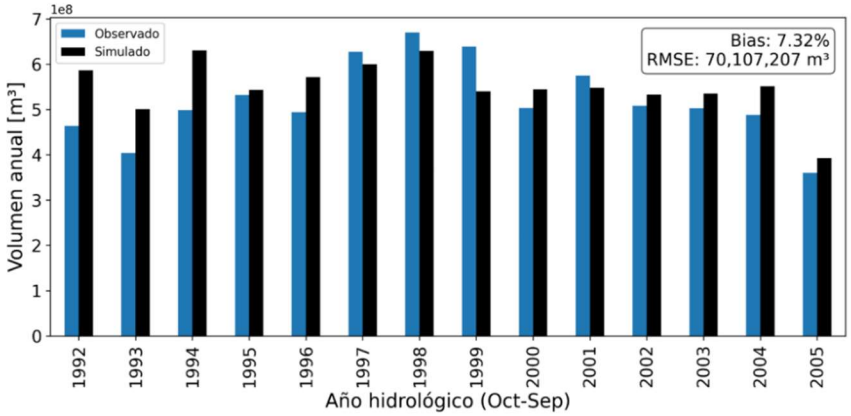
Nombre: Rio Maracai
Área: 822 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 200
m1 = 2.25
m2 = 2.00
m3 = 3.00
μ = 2.50
α = 0.40

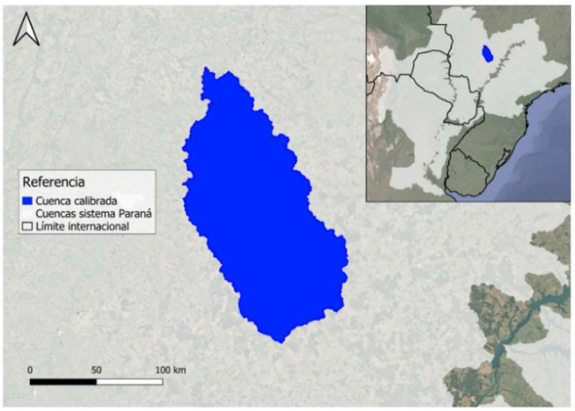
Caudales medios:
Simulado = 17 m³/s
Observado = 16 m³/s

Indicadores:
RMSE = 5
MAE = 3
NSE = 0.13





Sistema Alto Paraná

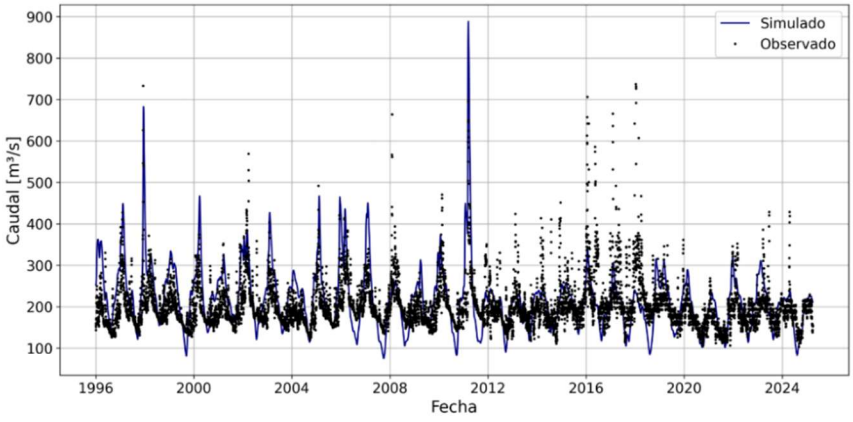


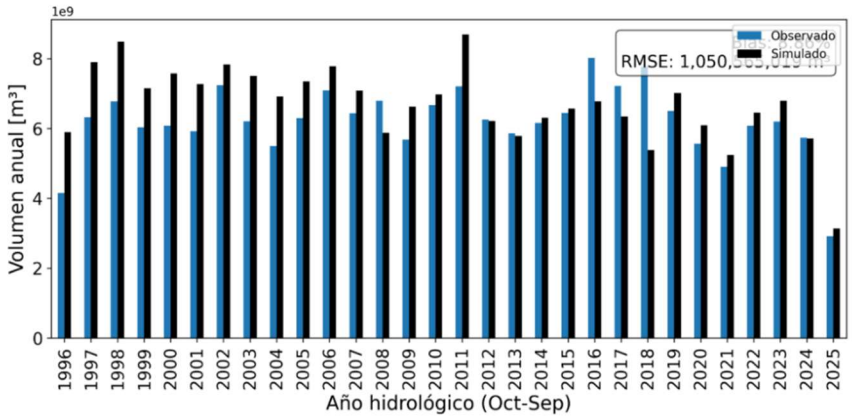
Nombre: Rio Verde Sur
Área: 14454 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 350
m1 = 1.50
m2 = 3.00
m3 = 4.00
μ = 2.75
α = 0.10

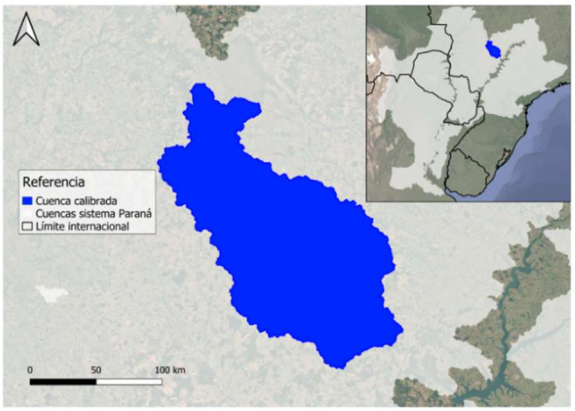
Caudales medios:
Simulado = 217 m³/s
Observado = 201 m³/s

Indicadores:
RMSE = 69
MAE = 49
NSE = -0.46





Sistema Alto Paraná

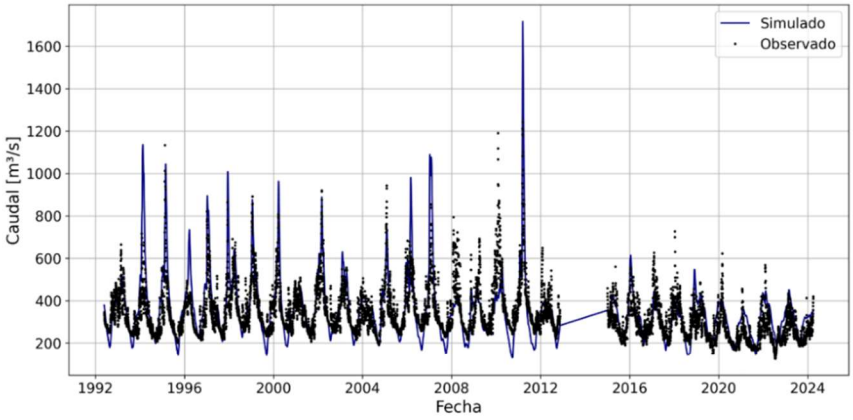


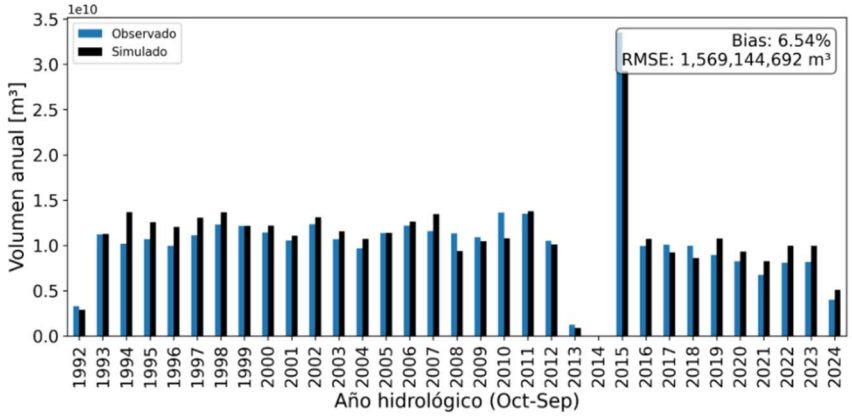
Nombre: Rio Sucuriu
Área: 19032 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 400
m1 = 2.00
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 1.50
α = 0.12

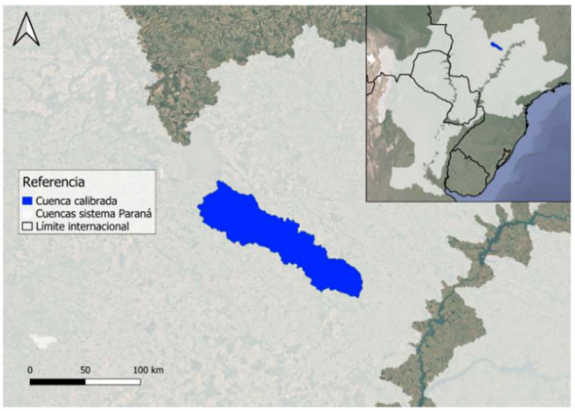
Caudales medios:
Simulado = 354 m³/s
Observado = 333 m³/s

Indicadores:
RMSE = 104
MAE = 69
NSE = 0.19





Sistema Alto Paraná

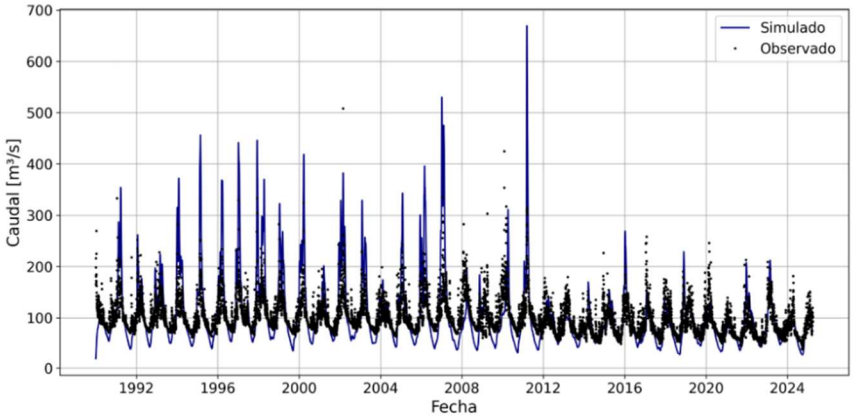


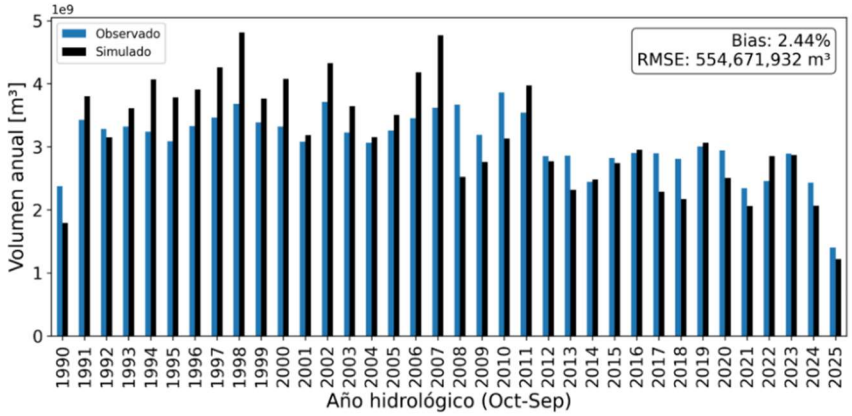
Nombre: Río Apore
Área: 5223 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 275
m1 = 3.50
m2 = 3.50
m3 = 2.00
μ = 0.70
α = 0.15

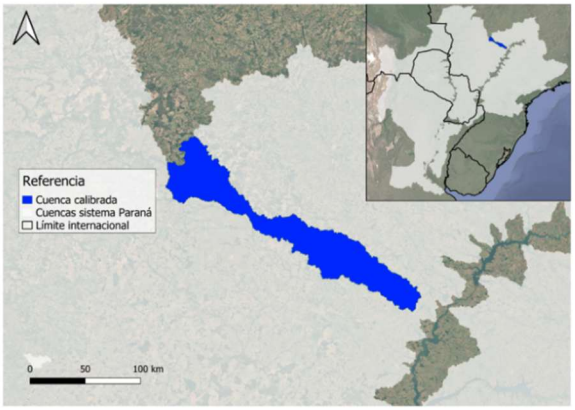
Caudales medios:
Simulado = 103 m³/s
Observado = 99 m³/s

Indicadores:
RMSE = 50
MAE = 31
NSE = -1.26





Sistema Alto Paraná

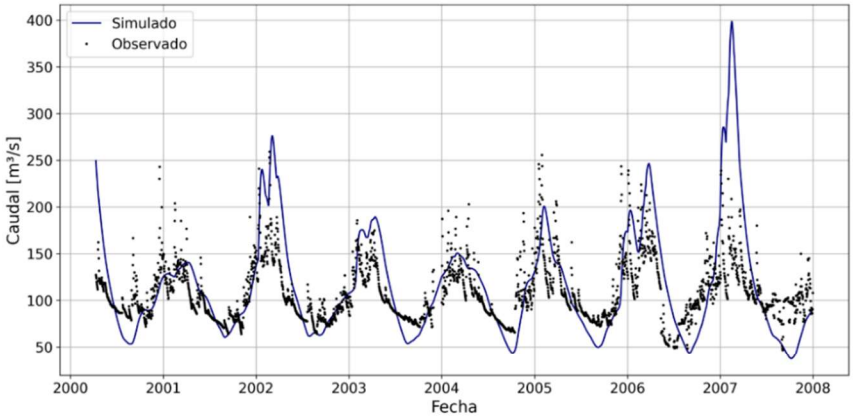


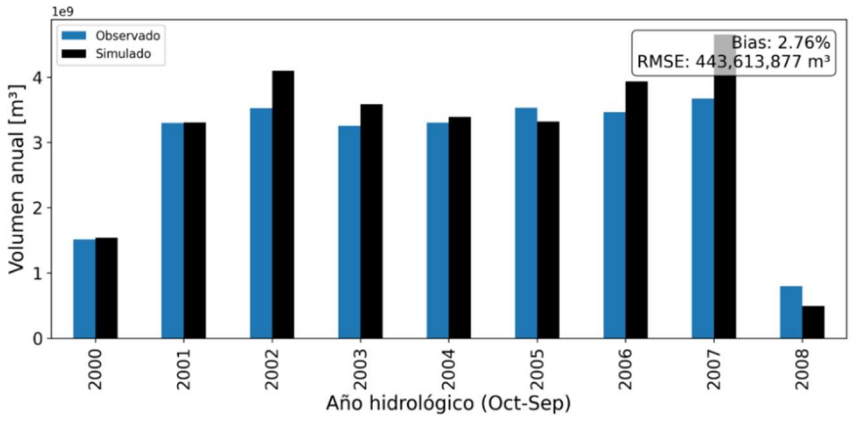
Nombre: Río Corrente
Área: 7161 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 250
m1 = 3.50
m2 = 3.00
m3 = 1.00
μ = 1.25
α = 0.08

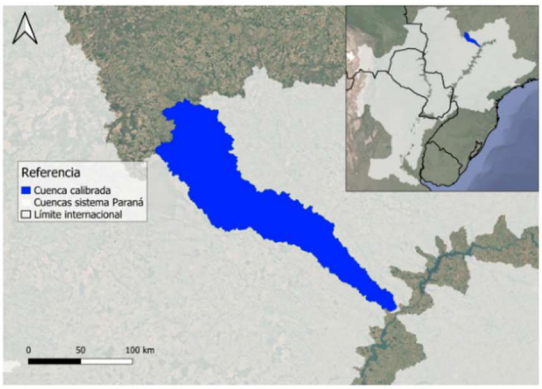
Caudales medios:
Simulado = 116 m³/s
Observado = 108 m³/s

Indicadores:
RMSE = 45
MAE = 30
NSE = -0.98





Sistema Alto Paraná

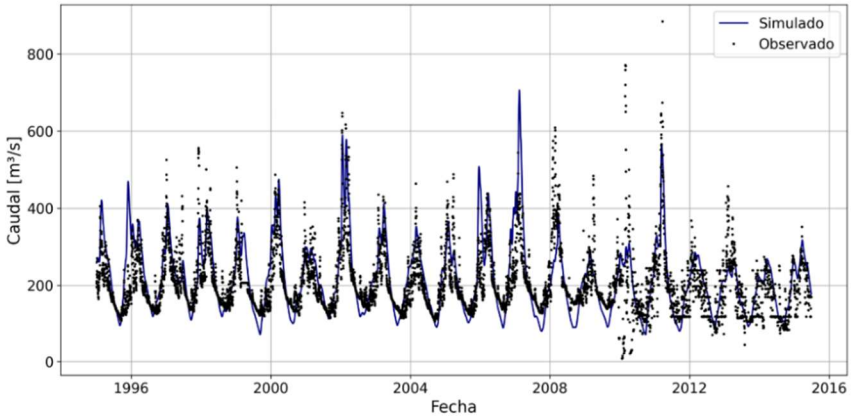


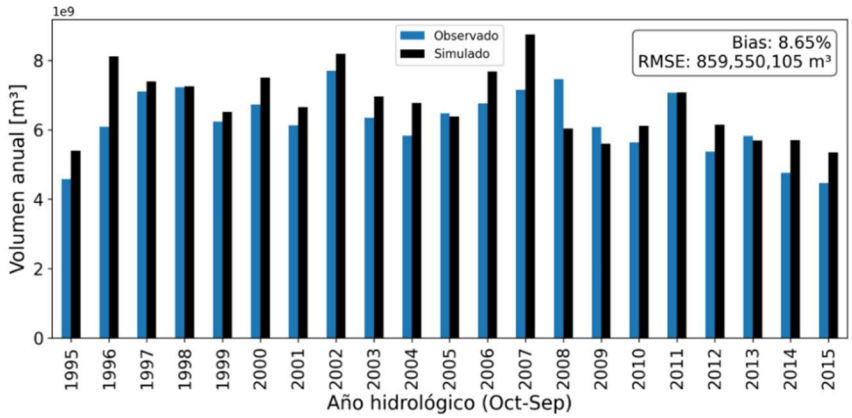
Nombre: UHE Salto do Rio Verdinho
Área: 11816 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 175
m1 = 1.75
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 2.00
α = 0.10

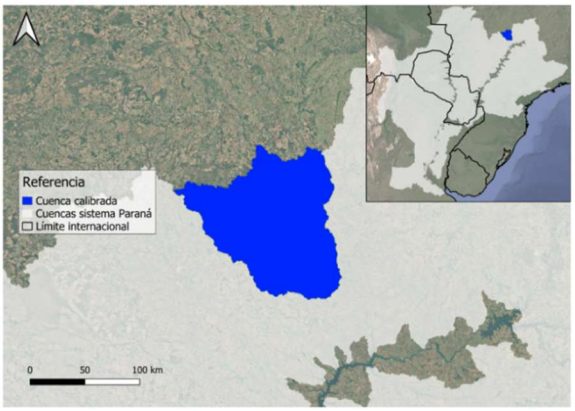
Caudales medios:
Simulado = 218 m³/s
Observado = 202 m³/s

Indicadores:
RMSE = 69
MAE = 48
NSE = 0.30





Sistema Alto Paraná

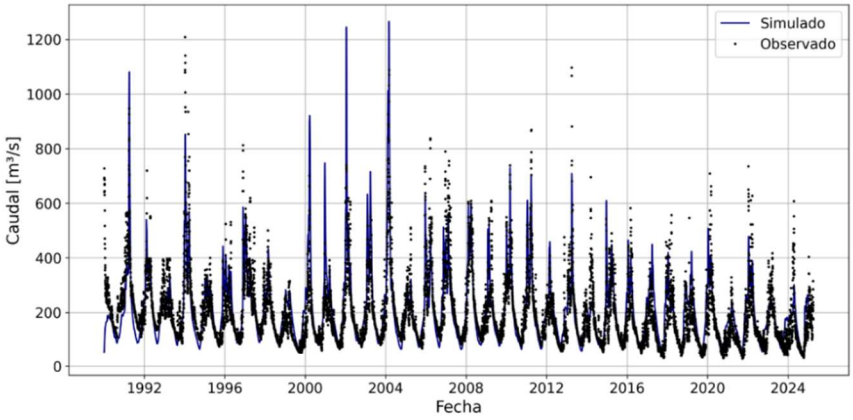


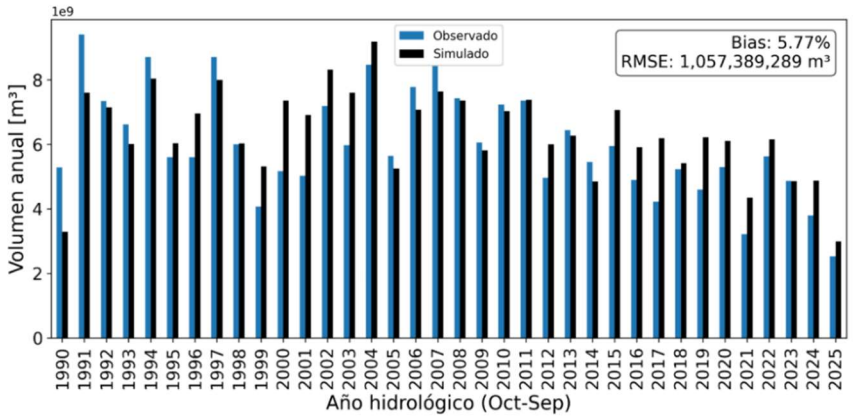
Nombre: Rio Verde
Área: 12785 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 150
m1 = 2.25
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 1.50
α = 0.18

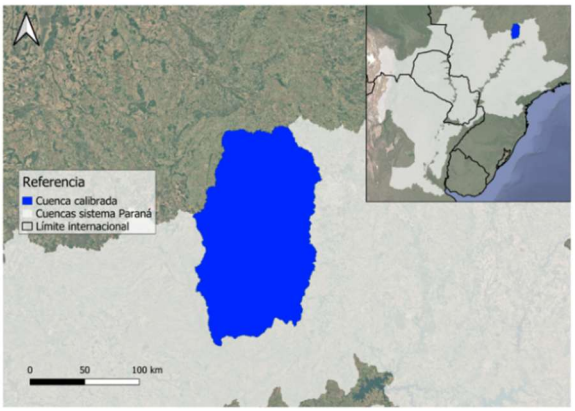
Caudales medios:
Simulado = 205 m³/s
Observado = 194 m³/s

Indicadores:
RMSE = 79
MAE = 52
NSE = 0.59





Sistema Alto Paraná

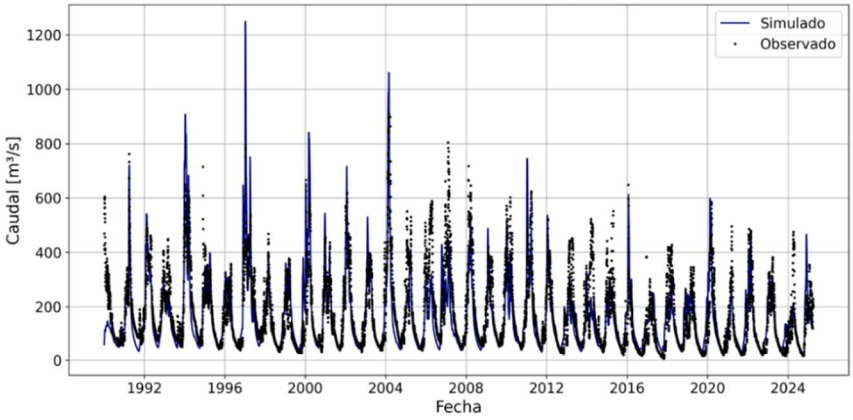


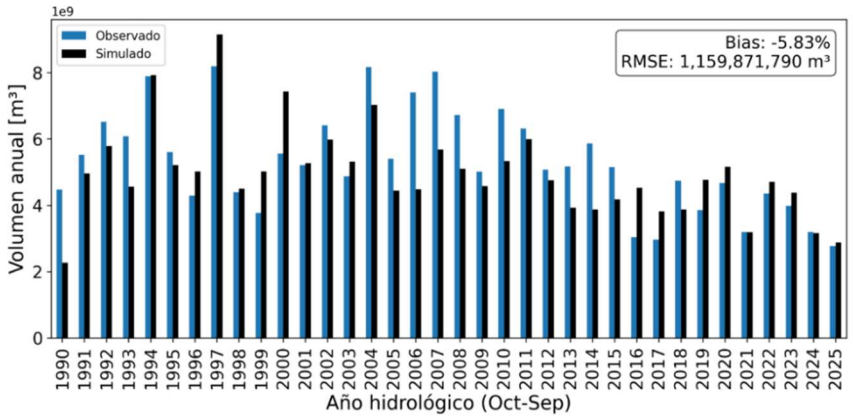
Nombre: Rio dos Bois
Área: 17253 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 100
m1 = 1.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 5.00
α = 0.15

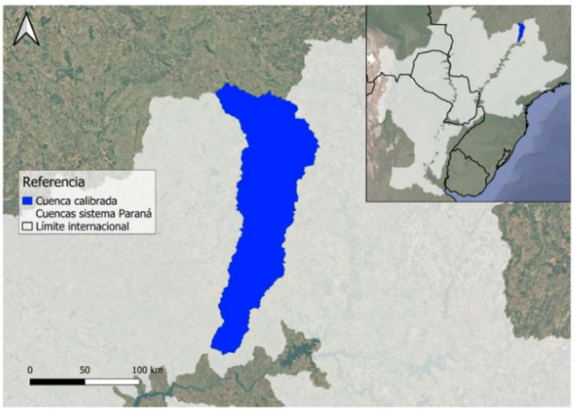
Caudales medios:
Simulado = 160 m³/s
Observado = 171 m³/s

Indicadores:
RMSE = 80
MAE = 51
NSE = 0.66





Sistema Alto Paraná

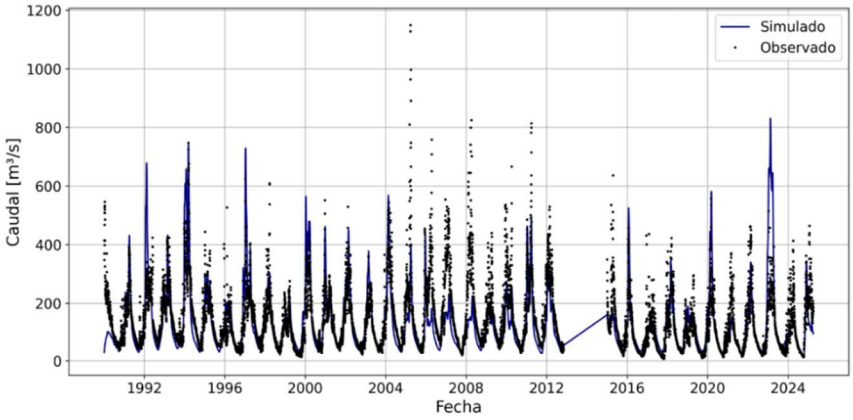


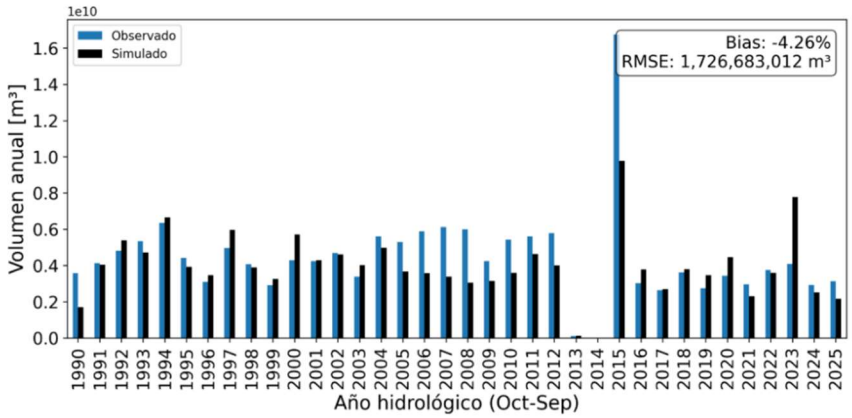
Nombre: Rio da Meia Ponte
Área: 11500 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 100
m1 = 2.00
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 4.00
α = 0.12

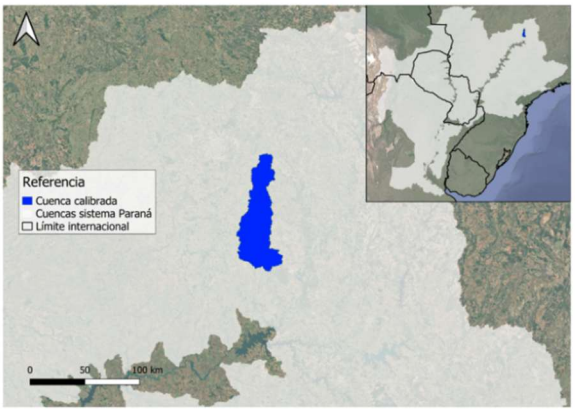
Caudales medios:
Simulado = 129 m³/s
Observado = 140 m³/s

Indicadores:
RMSE = 85
MAE = 49
NSE = 0.35





Sistema Alto Paraná

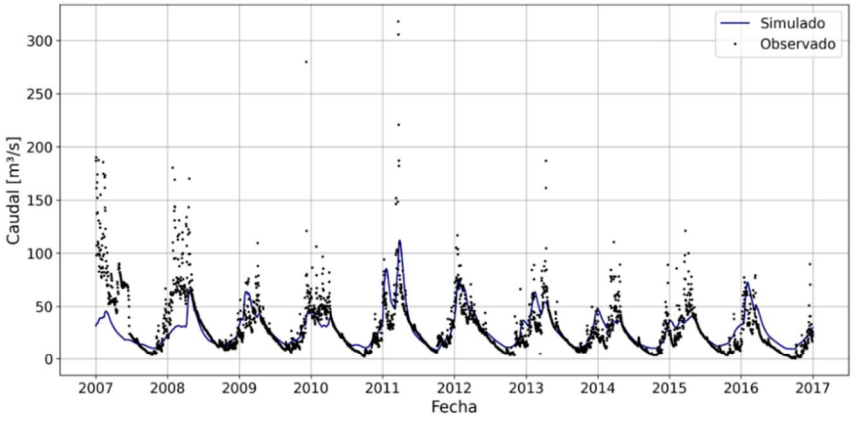


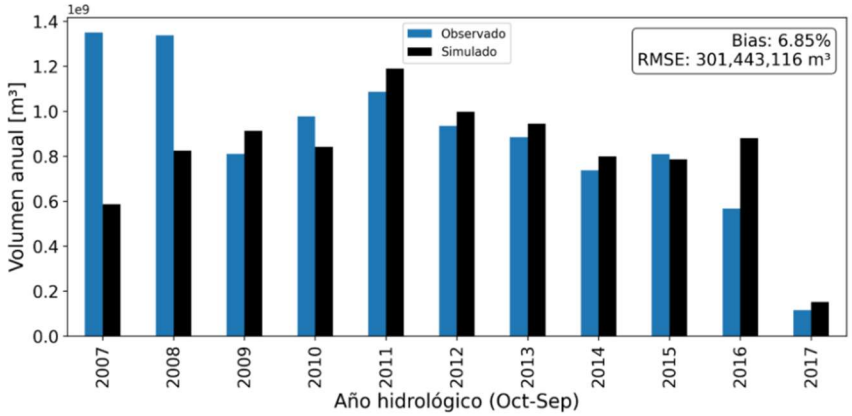
Nombre: Rio Piracanjuba
Área: 2410 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 100
m1 = 1.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 2.75
α = 0.20

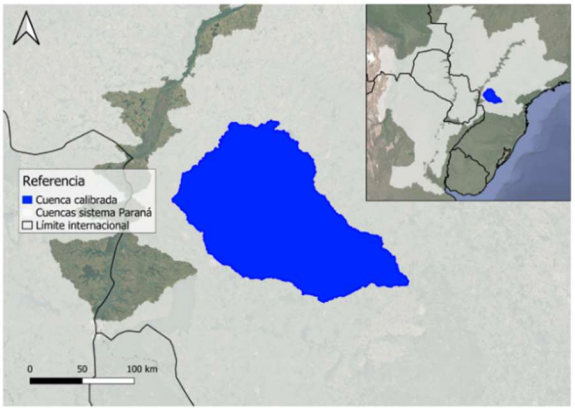
Caudales medios:
Simulado = 28 m³/s
Observado = 30 m³/s

Indicadores:
RMSE = 21
MAE = 11
NSE = 0.36





Sistema Alto Paraná

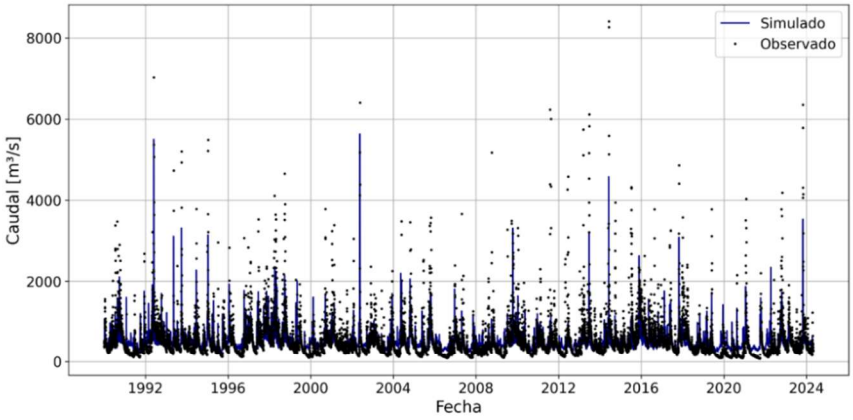


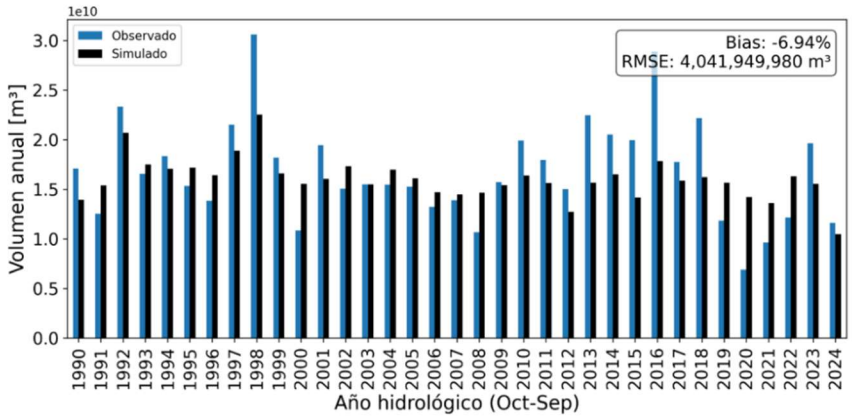
Nombre: Rio Piquiri
Área: 20959 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 110
m1 = 1.25
m2 = 2.00
m3 = 3.50
μ = 2.75
α = 0.80

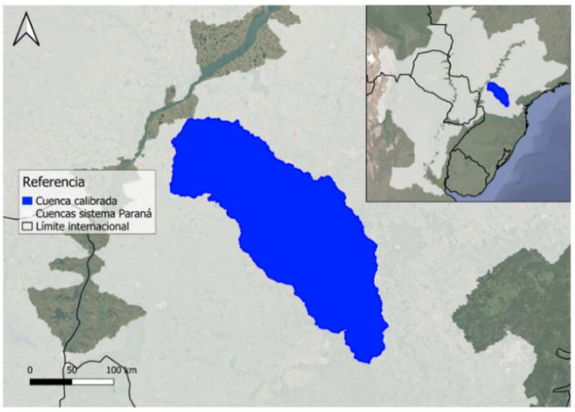
Caudales medios:
Simulado = 516 m³/s
Observado = 543 m³/s

Indicadores:
RMSE = 418
MAE = 242
NSE = 0.39





Sistema Alto Paraná

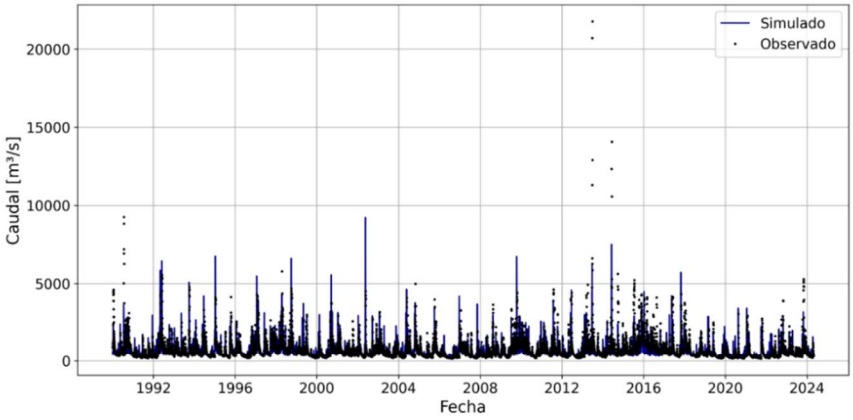


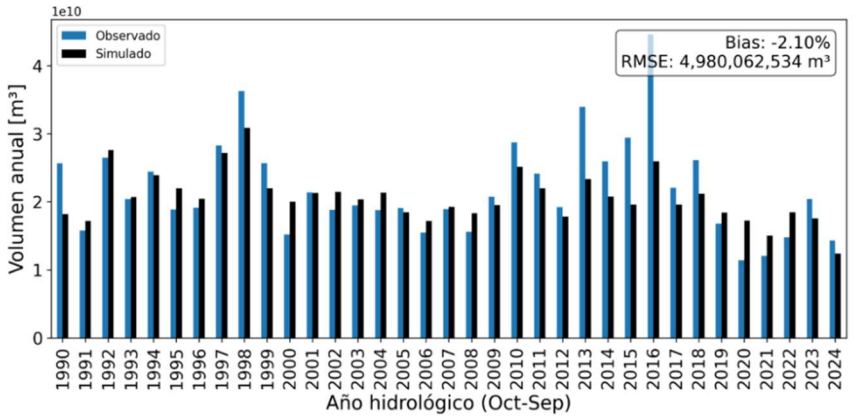
Nombre: Rio Ivai
Área: 34434 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 200
m1 = 1.25
m2 = 3.25
m3 = 2.00
μ = 2.50
α = 0.75

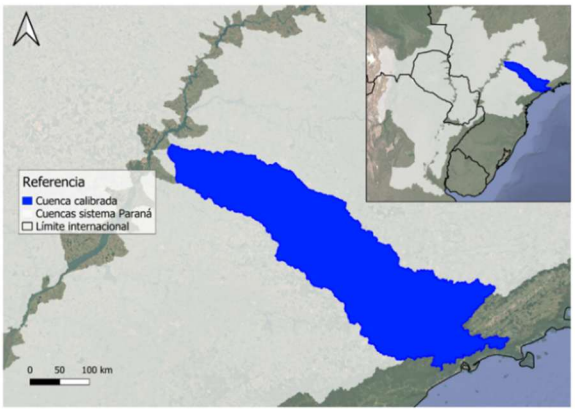
Caudales medios:
Simulado = 666 m³/s
Observado = 709 m³/s

Indicadores:
RMSE = 640
MAE = 315
NSE = 0.25





Sistema Alto Paraná

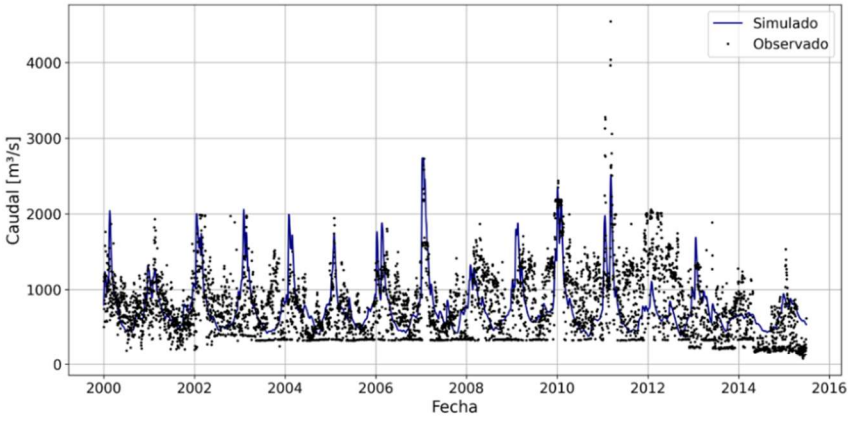


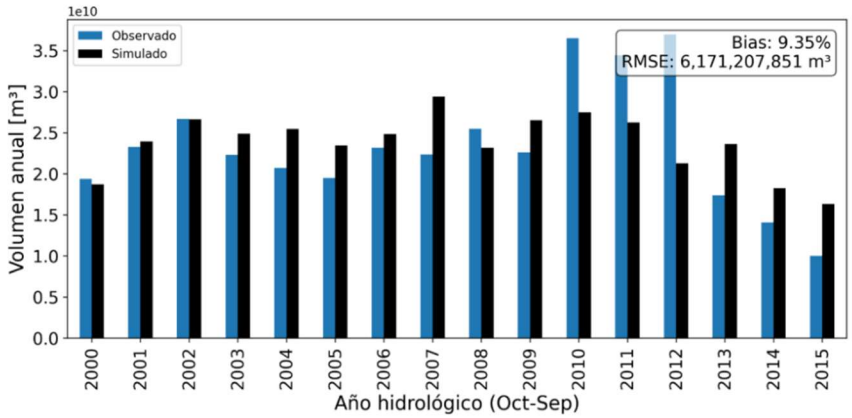
Nombre: Rio Tiete
Área: 70948 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 175
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 2.00
μ = 3.00
α = 0.15

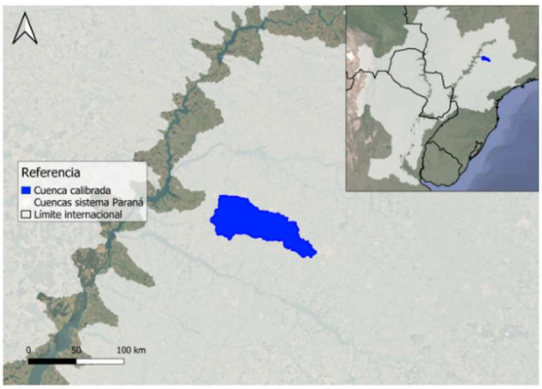
Caudales medios:
Simulado = 777 m³/s
Observado = 767 m³/s

Indicadores:
RMSE = 427
MAE = 332
NSE = 0.07





Sistema Alto Paraná

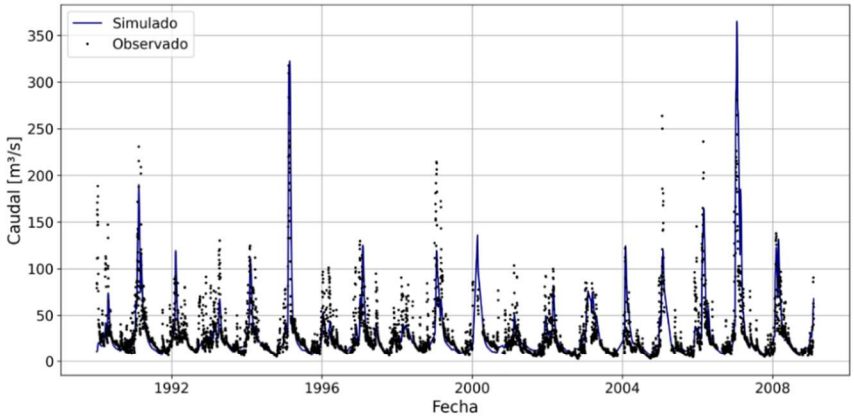


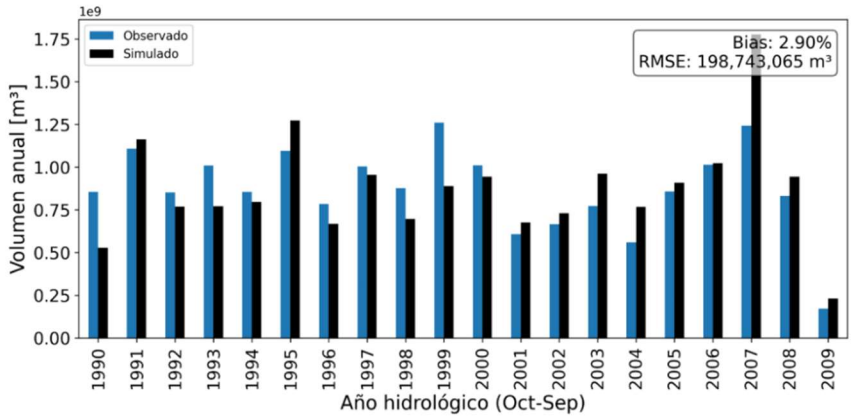
Nombre: Rio Sao Jose dos Dourados
Área: 3199 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 200
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 2.00
μ = 4.00
α = 0.49

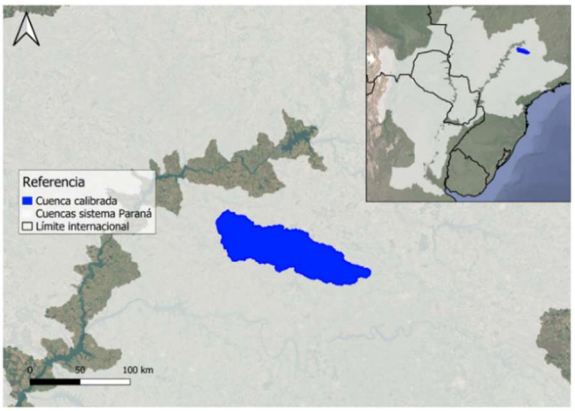
Caudales medios:
Simulado = 28 m³/s
Observado = 28 m³/s

Indicadores:
RMSE = 23
MAE = 11
NSE = 0.37





Sistema Alto Paraná

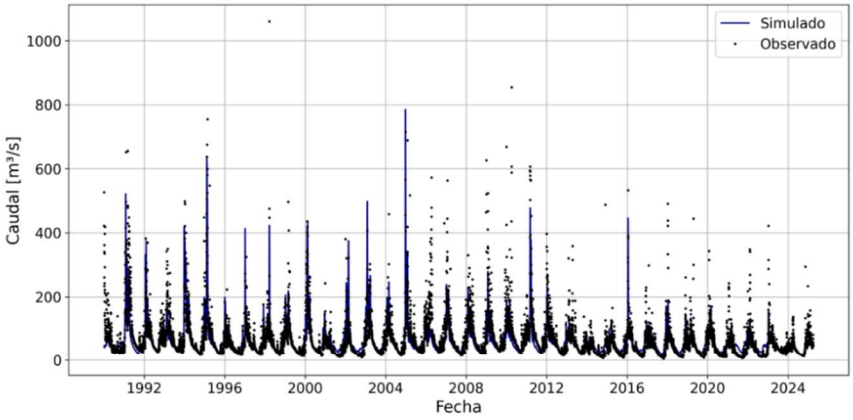


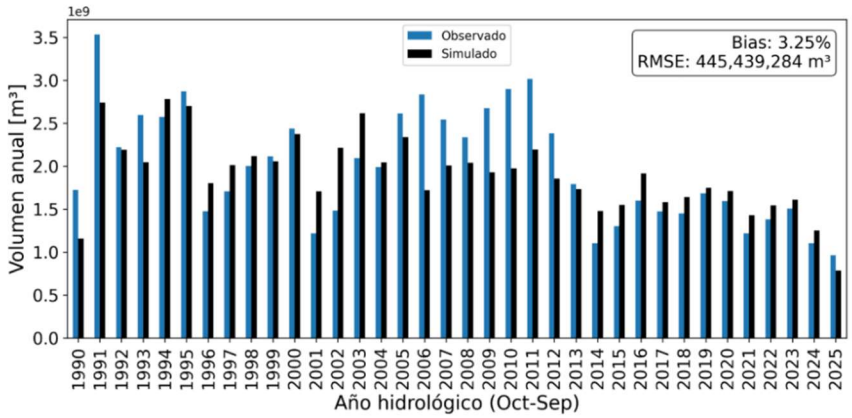
Nombre: Rio da Prata
Área: 5225 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 250
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 2.00
μ = 3.00
α = 0.38

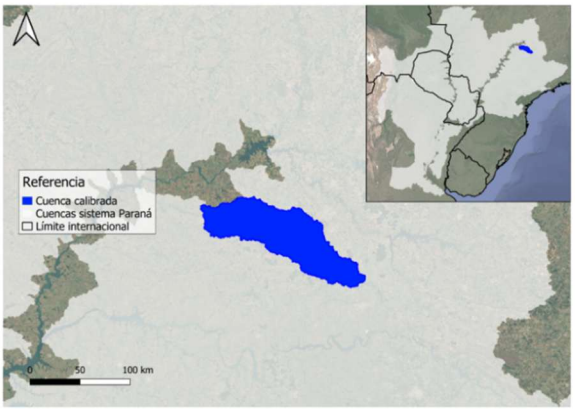
Caudales medios:
Simulado = 61 m³/s
Observado = 64 m³/s

Indicadores:
RMSE = 42
MAE = 22
NSE = 0.56





Sistema Alto Paraná

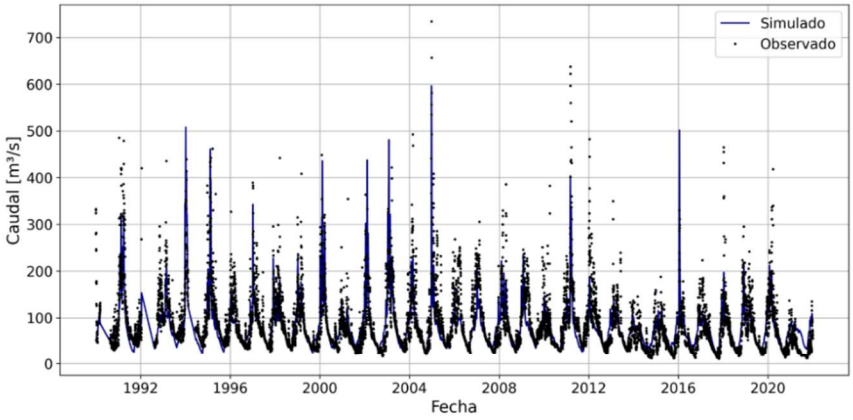


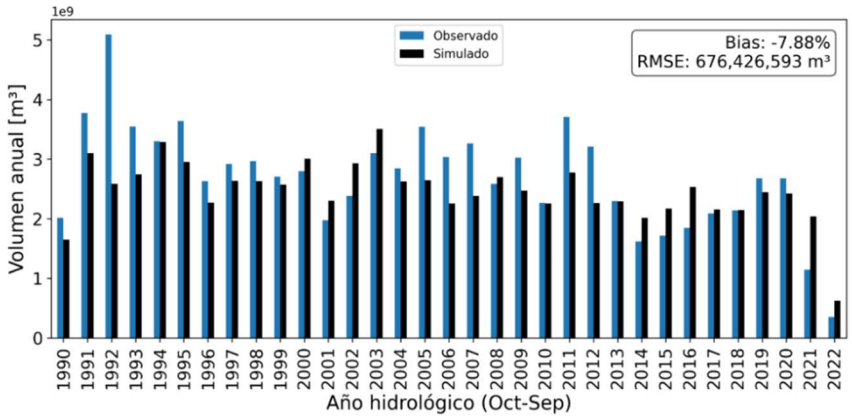
Nombre: Rio Tijuco
Área: 6310 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 200
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 3.00
α = 0.35

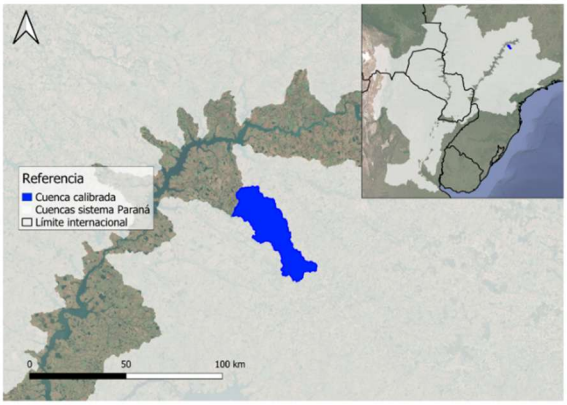
Caudales medios:
Simulado = 80 m³/s
Observado = 85 m³/s

Indicadores:
RMSE = 39
MAE = 25
NSE = 0.62





Sistema Alto Paraná

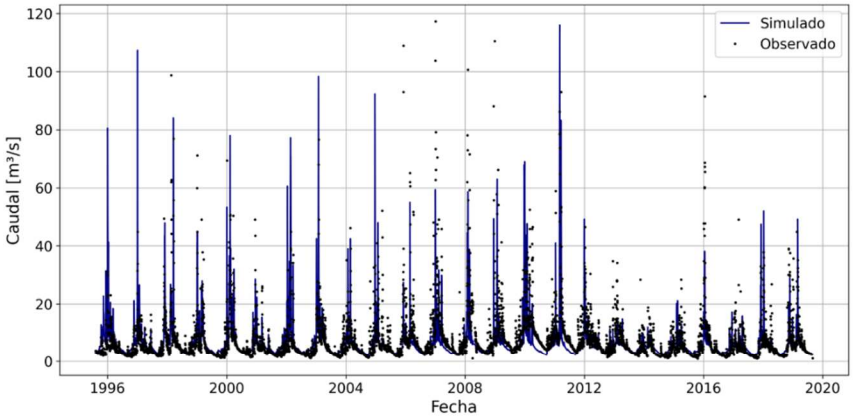


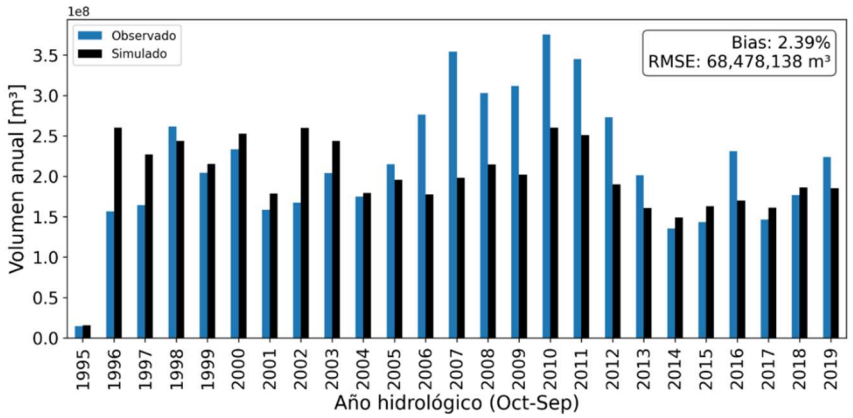
Nombre: Ribeirao Sao Jeronimo
Área: 750 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 250
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 4.50
α = 0.88

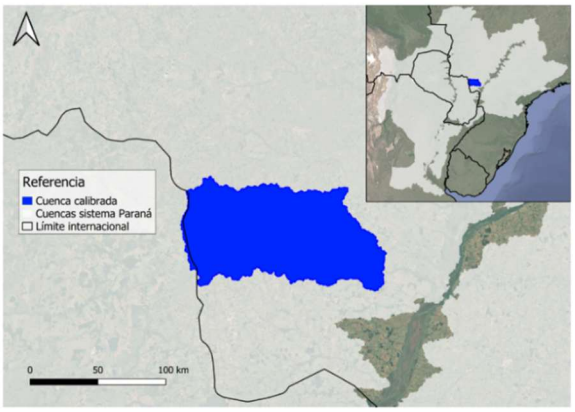
Caudales medios:
Simulado = 6 m³/s
Observado = 7 m³/s

Indicadores:
RMSE = 6
MAE = 3
NSE = 0.39





Sistema Alto Paraná

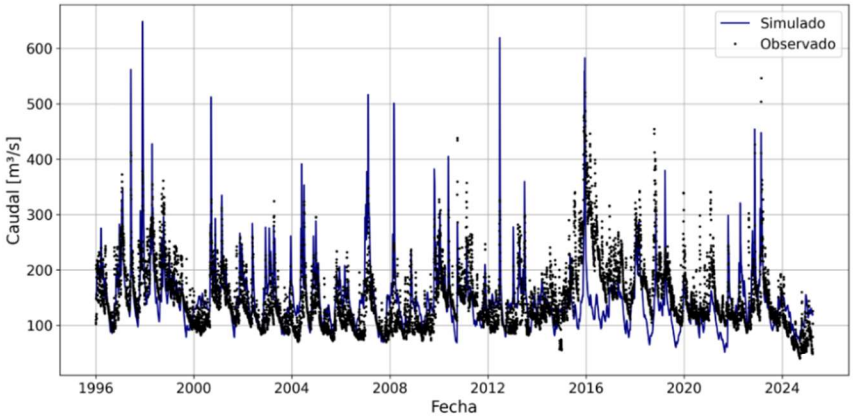


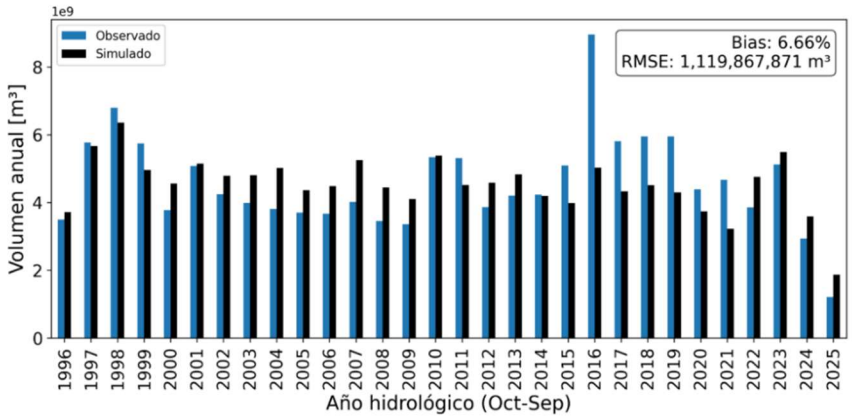
Nombre: Rio Amambai
Área: 8965 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 150
m1 = 2.50
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 1.75
α = 0.30

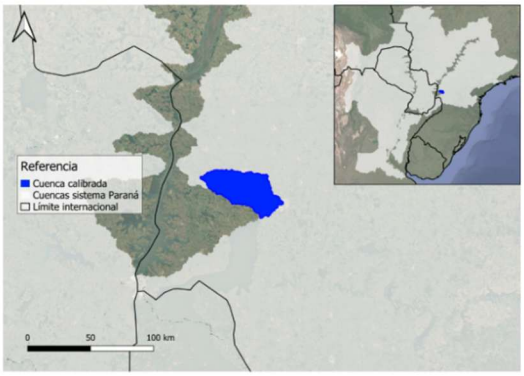
Caudales medios:
Simulado = 147 m³/s
Observado = 149 m³/s

Indicadores:
RMSE = 54
MAE = 39
NSE = 0.20





Sistema Alto Paraná

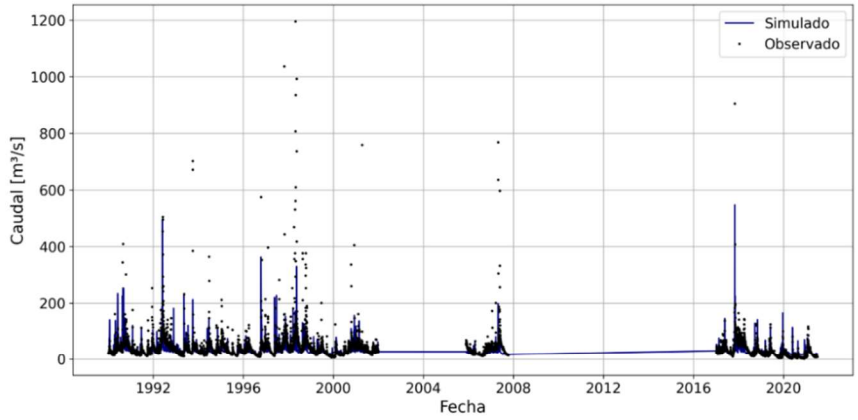


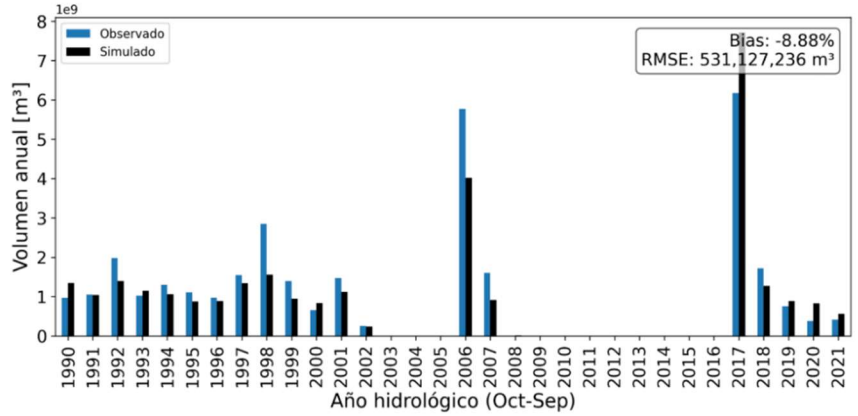
Nombre: Rio Sao Francisco Verdadeiro
Área: 1381 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 125
m1 = 1.50
m2 = 2.50
m3 = 2.00
μ = 1.50
α = 0.80

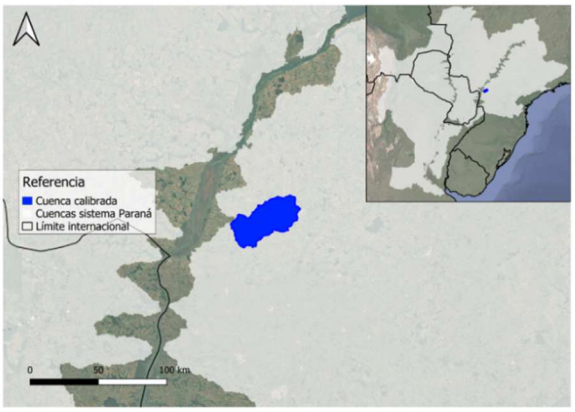
Caudales medios:
Simulado = 33 m³/s
Observado = 39 m³/s

Indicadores:
RMSE = 42
MAE = 16
NSE = 0.34





Sistema Alto Paraná

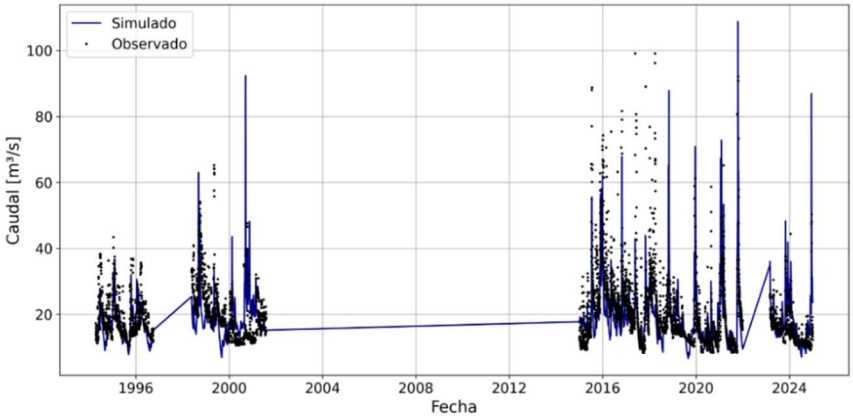


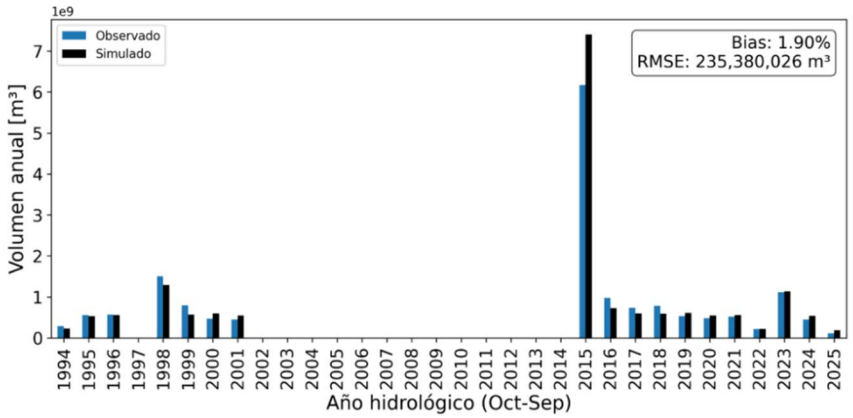
Nombre: Rio Xambre
Área: 1071 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 110
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 2.00
μ = 2.25
α = 0.50

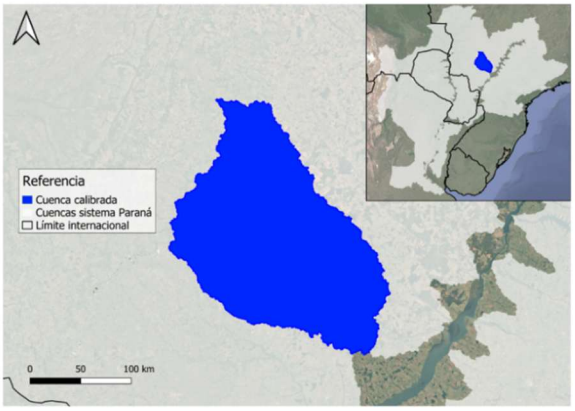
Caudales medios:
Simulado = 18 m³/s
Observado = 19 m³/s

Indicadores:
RMSE = 8
MAE = 5
NSE = 0.29





Sistema Alto Paraná

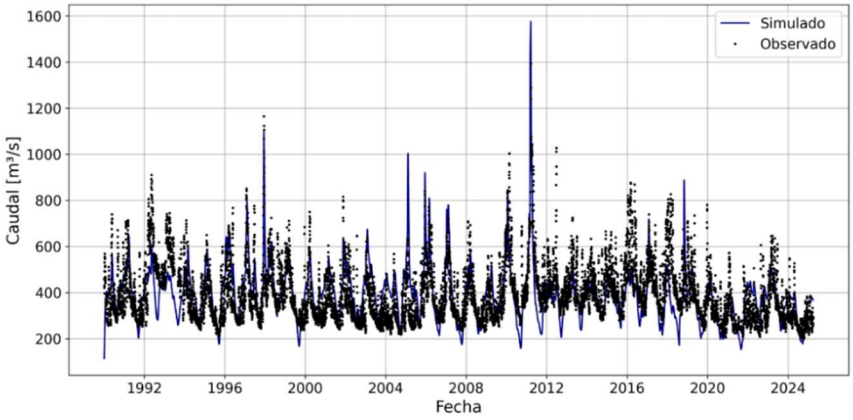


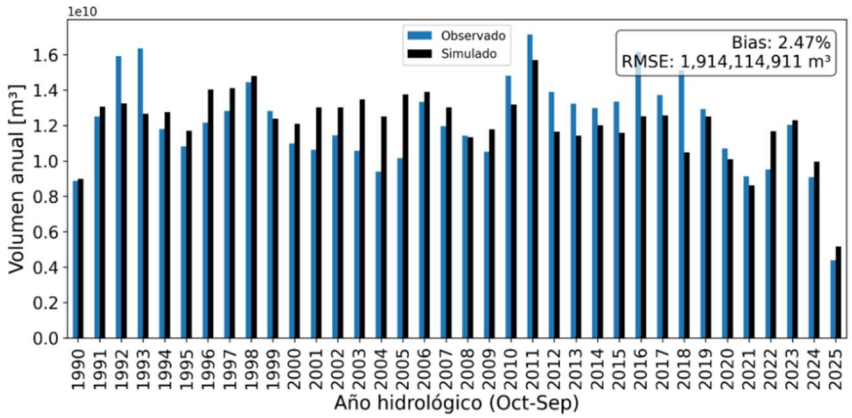
Nombre: Rio Pardo
Área: 31168 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 200
m1 = 2.00
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 2.50
α = 0.15

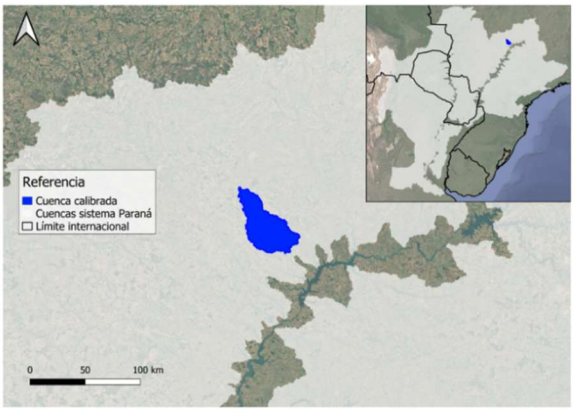
Caudales medios:
Simulado = 392 m³/s
Observado = 392 m³/s

Indicadores:
RMSE = 107
MAE = 81
NSE = 0.28





Sistema Alto Paraná

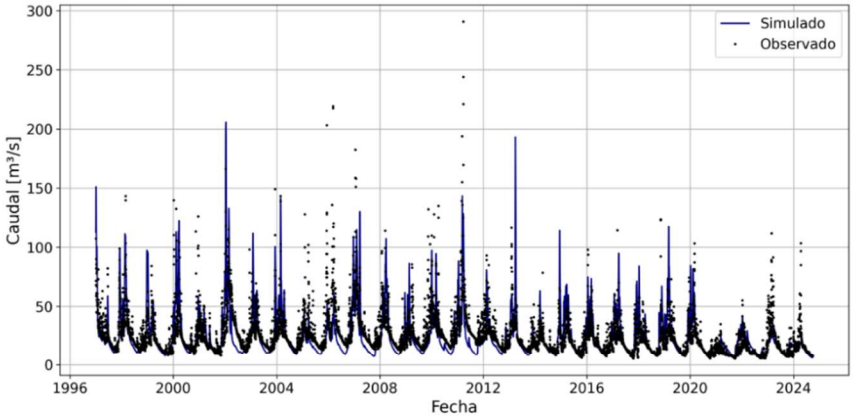


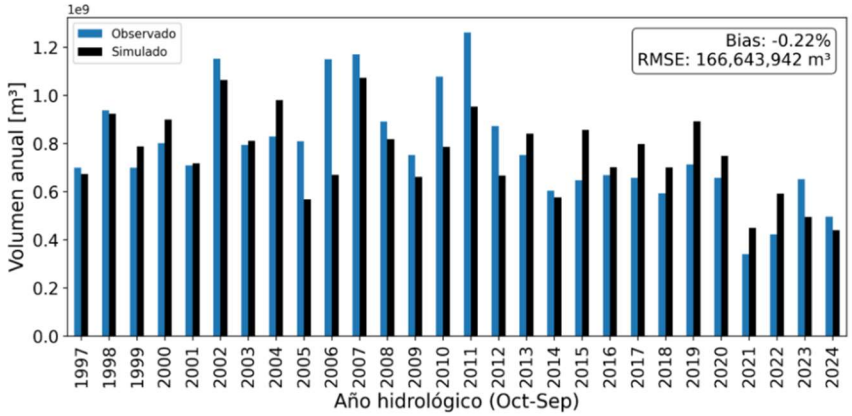
Nombre: Rio Preto
Área: 1631 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 150
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 1.75
α = 0.30

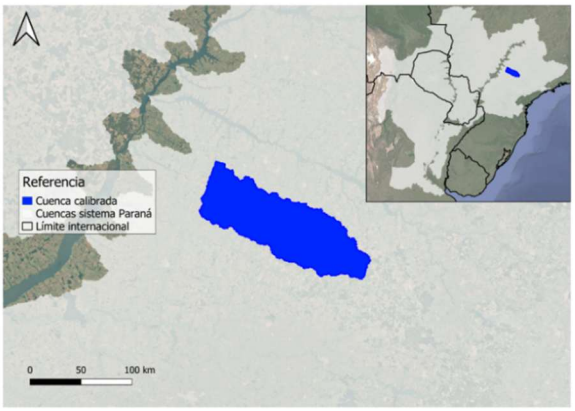
Caudales medios:
Simulado = 24 m³/s
Observado = 24 m³/s

Indicadores:
RMSE = 15
MAE = 8
NSE = 0.25





Sistema Alto Paraná

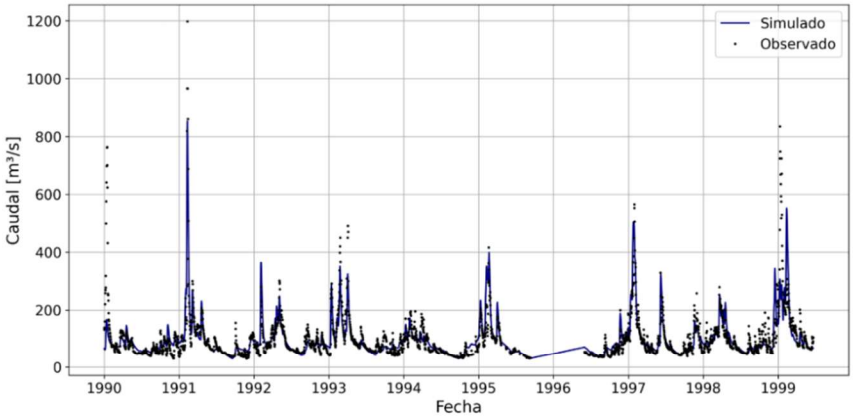


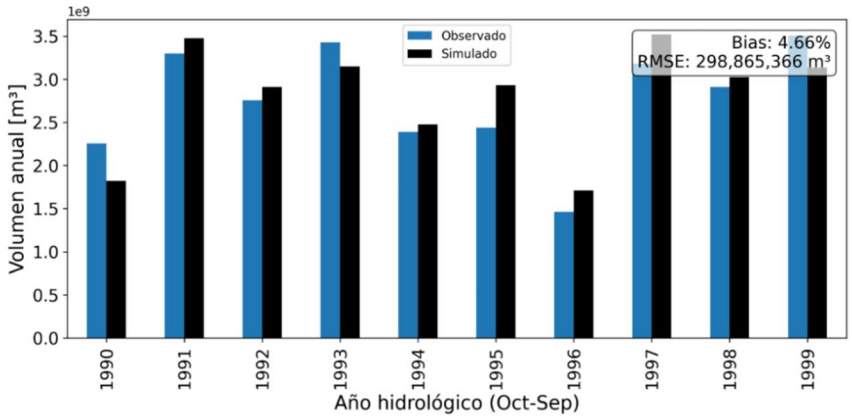
Nombre: Rio Aguapei
Área: 8650 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 150
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 2.00
μ = 3.00
α = 0.33

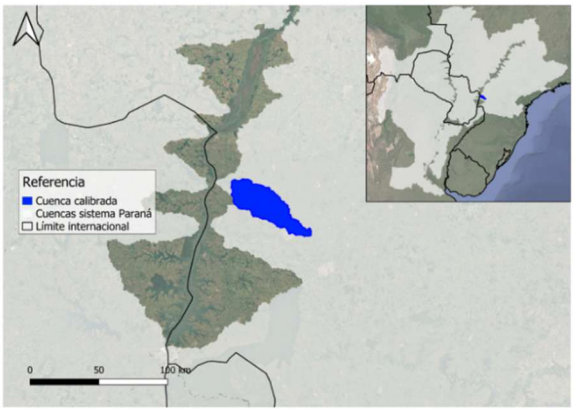
Caudales medios:
Simulado = 98 m³/s
Observado = 97 m³/s

Indicadores:
RMSE = 50
MAE = 23
NSE = 0.64





Sistema Alto Paraná

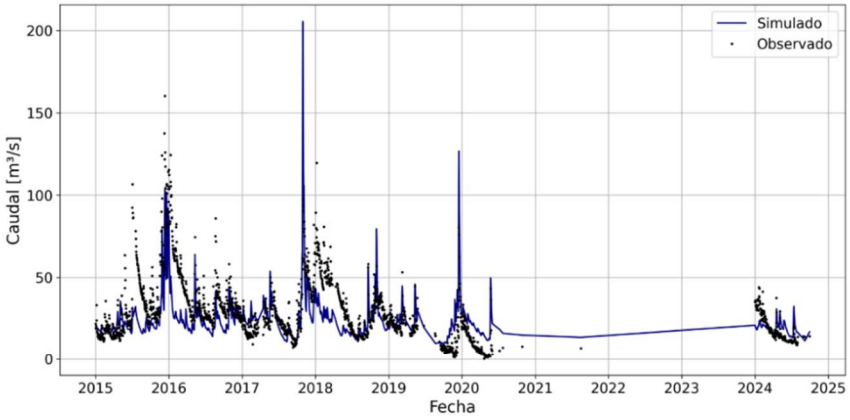


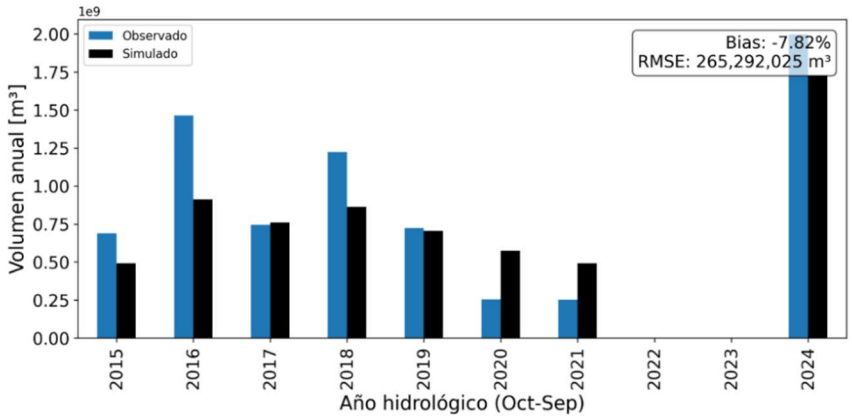
Nombre: Arroio Guacu
Área: 1030 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 80
m1 = 1.25
m2 = 1.50
m3 = 2.00
μ = 1.50
α = 0.60

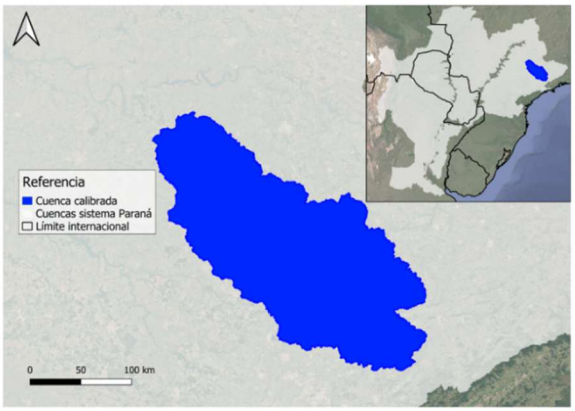
Caudales medios:
Simulado = 24 m³/s
Observado = 28 m³/s

Indicadores:
RMSE = 15
MAE = 10
NSE = 0.38





Sistema Alto Paraná

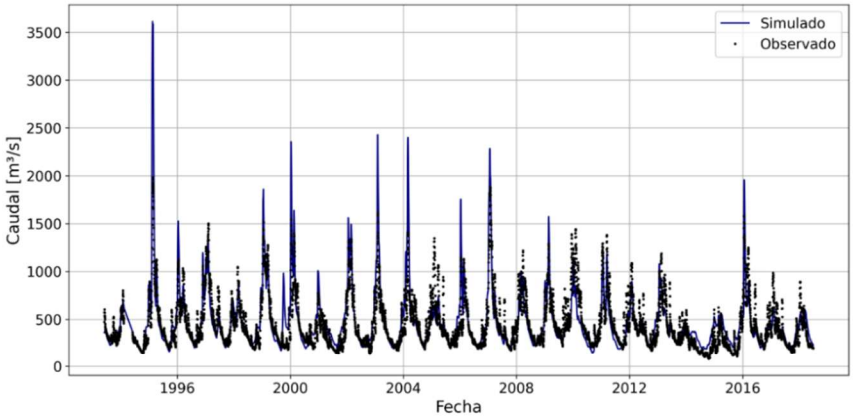


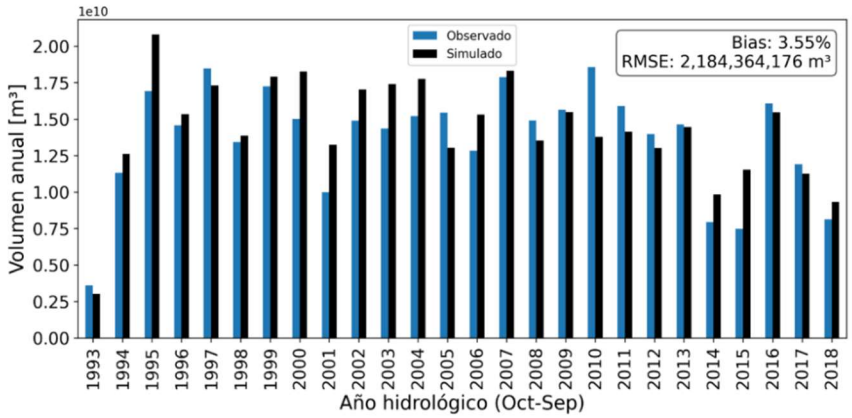
Nombre: Rio Pardo
Área: 34179 km²

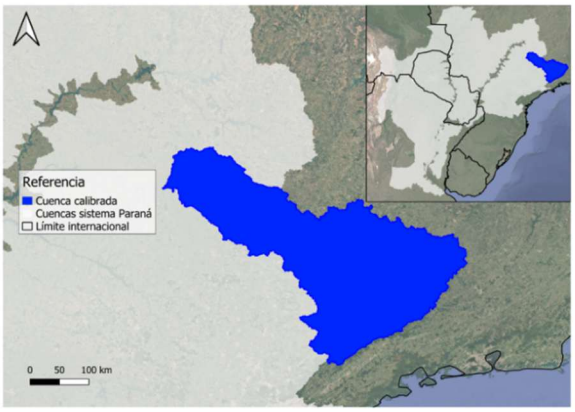
Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 100
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 3.00
α = 0.15

Caudales medios:
Simulado = 470 m³/s
Observado = 450 m³/s

Indicadores:
RMSE = 174
MAE = 107
NSE = 0.60





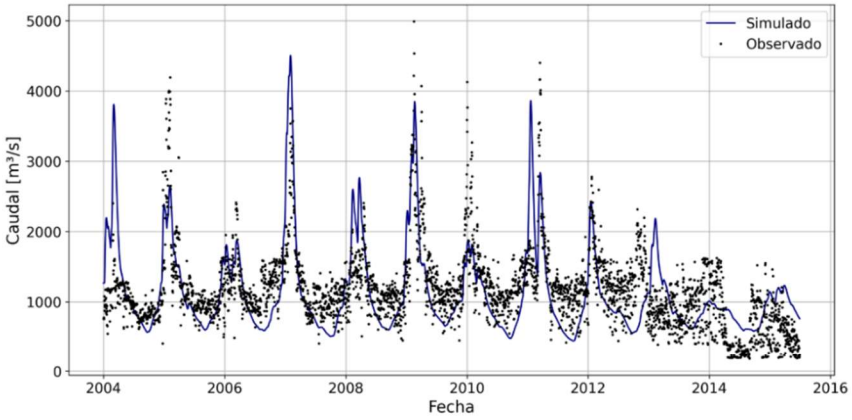


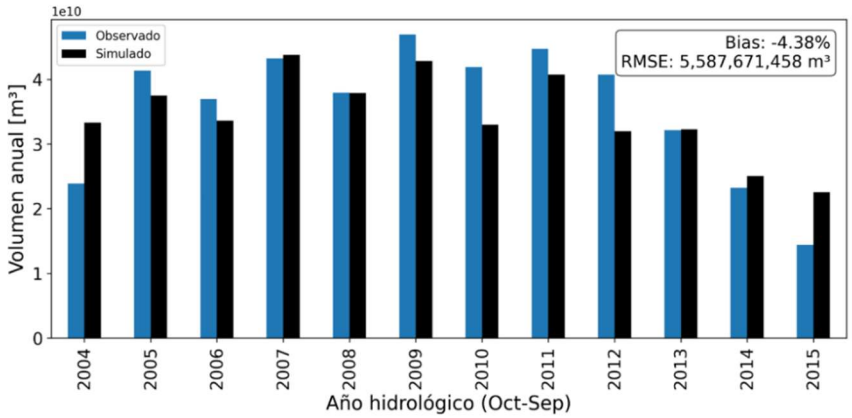
Nombre: Rio Grande
Área: 77129 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.05
C2 = 110
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 2.50
α = 0.10

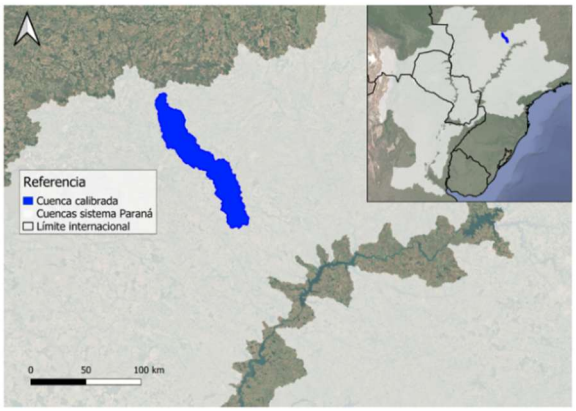
Caudales medios:
Simulado = 1143 m³/s
Observado = 1178 m³/s

Indicadores:
RMSE = 548
MAE = 413
NSE = 0.03





Sistema Alto Paraná

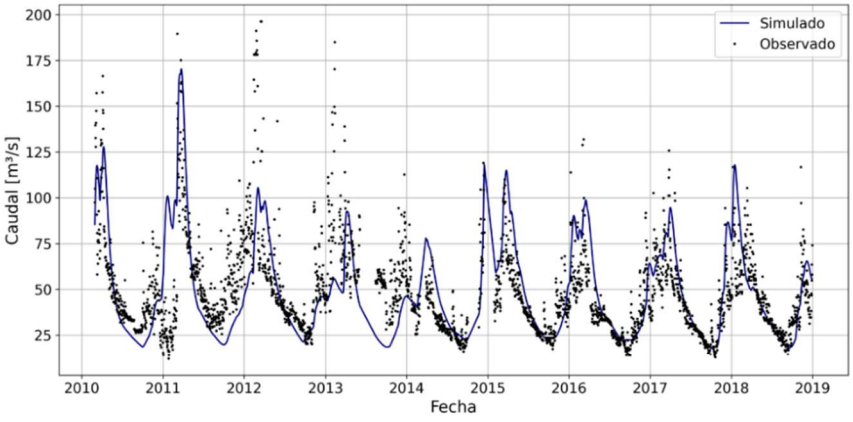


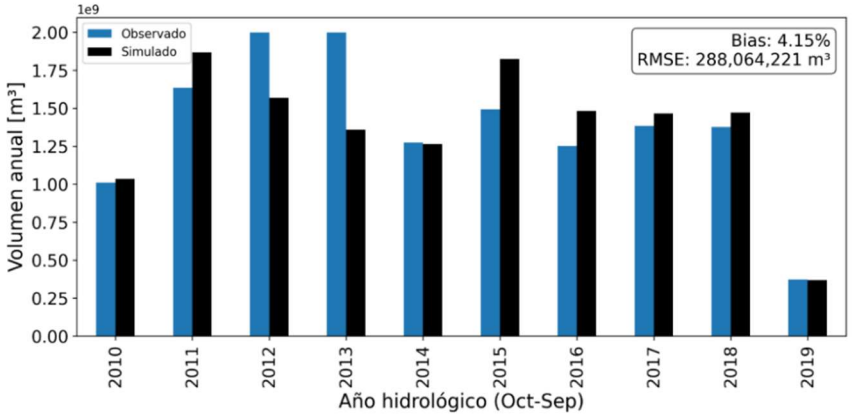
Nombre: Rio Doce
Área: 2672 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 250
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 3.50
μ = 1.25
α = 0.12

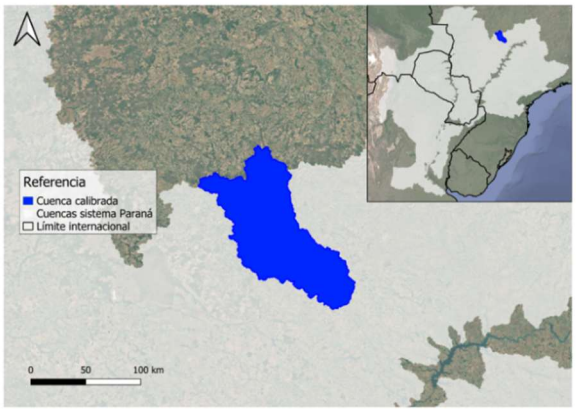
Caudales medios:
Simulado = 49 m³/s
Observado = 49 m³/s

Indicadores:
RMSE = 23
MAE = 16
NSE = 0.19





Sistema Alto Paraná

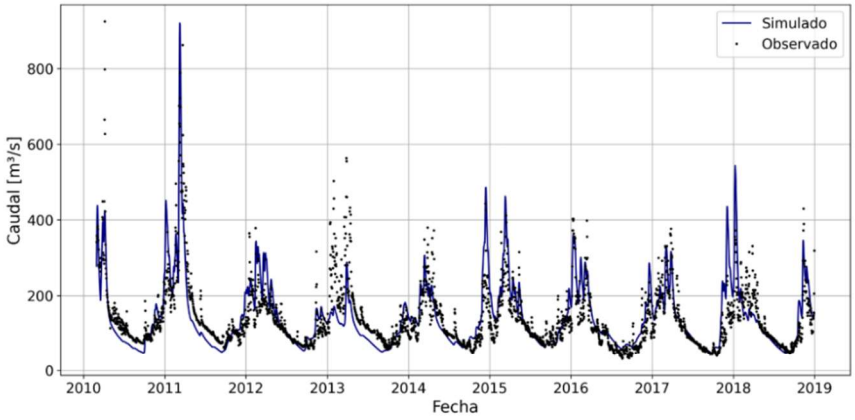


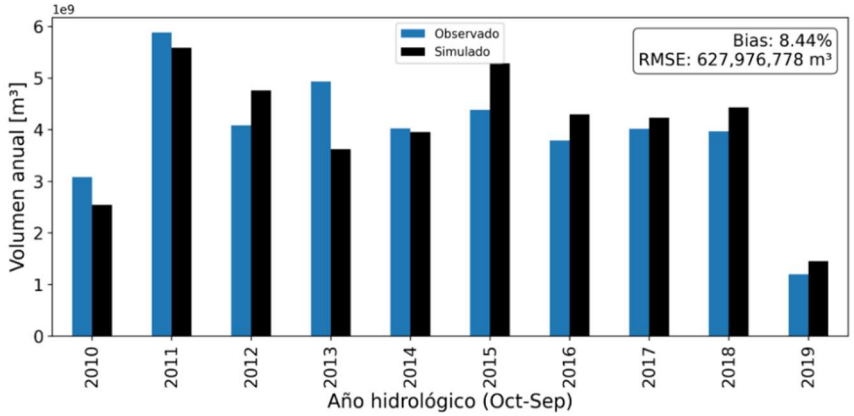
Nombre: Rio Claro
Área: 8726 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 200
m1 = 1.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 1.75
α = 0.25

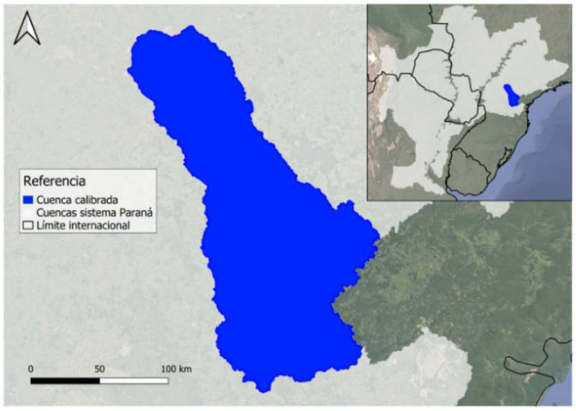
Caudales medios:
Simulado = 143 m³/s
Observado = 140 m³/s

Indicadores:
RMSE = 57
MAE = 37
NSE = 0.57





Sistema Alto Paraná

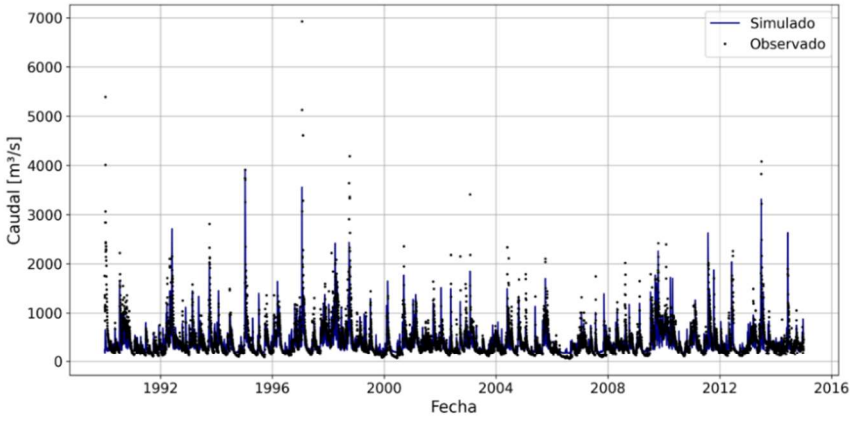


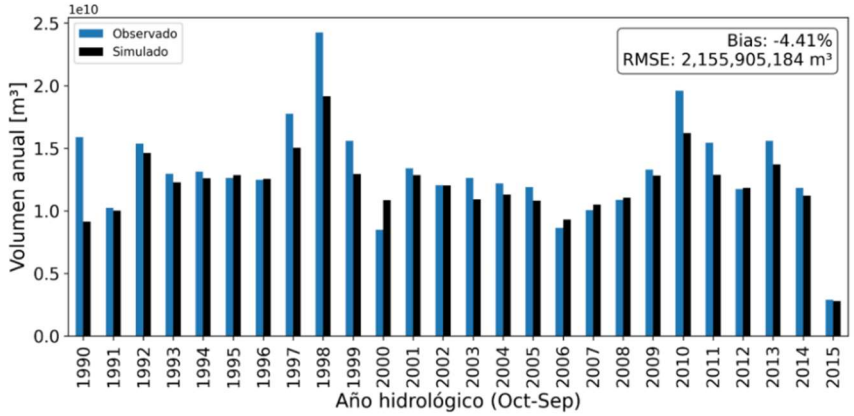
Nombre: Rio Tibagi
Área: 21921 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 175
m1 = 1.50
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 2.50
α = 0.50

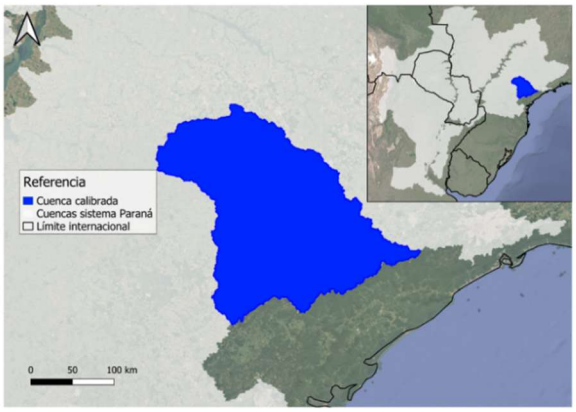
Caudales medios:
Simulado = 395 m³/s
Observado = 432 m³/s

Indicadores:
RMSE = 241
MAE = 142
NSE = 0.59





Sistema Alto Paraná

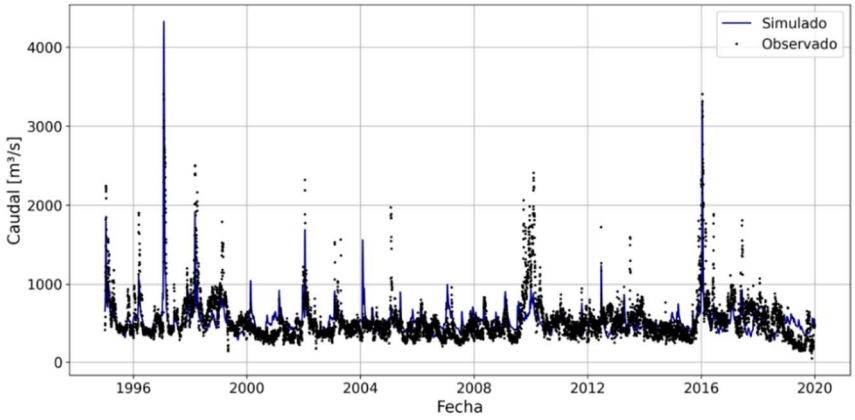


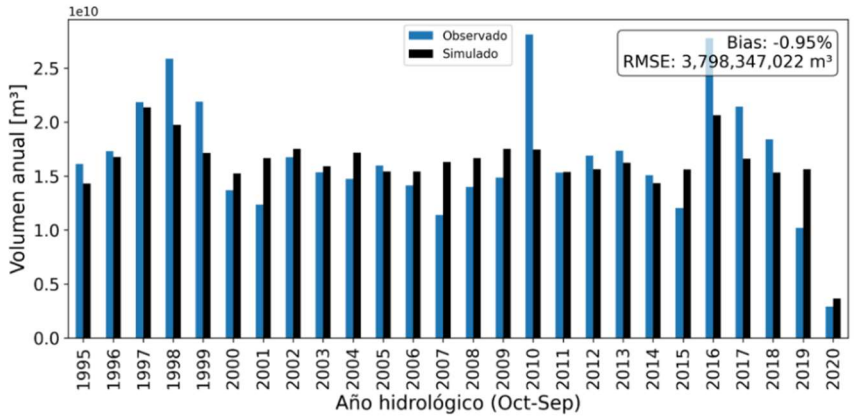
Nombre: Rio Paranapanema
Área: 41347 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 175
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 2.00
μ = 3.25
α = 0.25

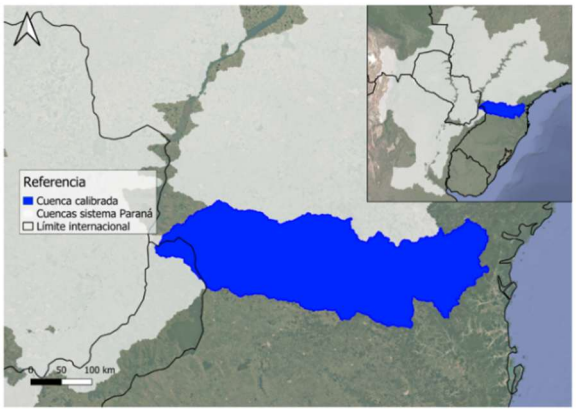
Caudales medios:
Simulado = 531 m³/s
Observado = 546 m³/s

Indicadores:
RMSE = 219
MAE = 149
NSE = 0.46





Sistema Alto Paraná

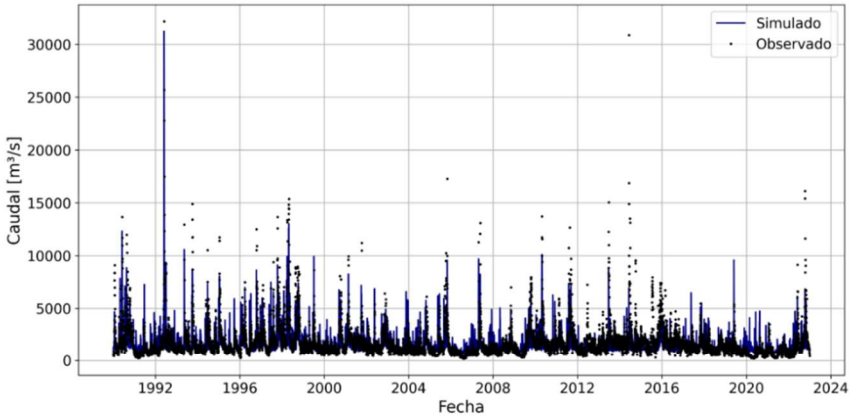


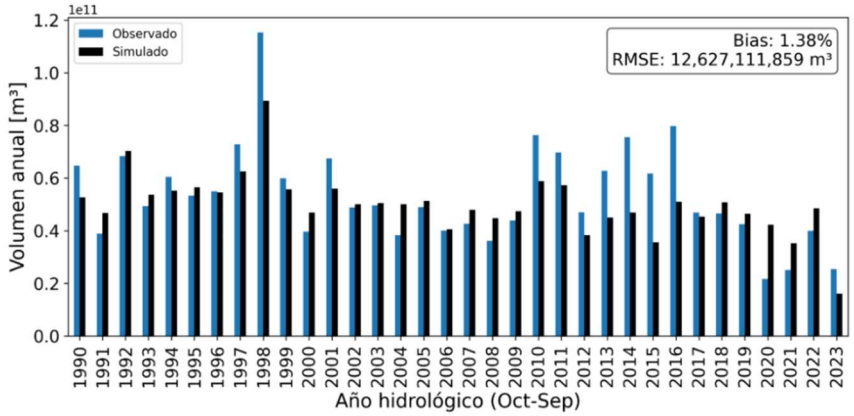
Nombre: Iguazú
Área: 67166 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 150
m1 = 1.00
m2 = 3.50
m3 = 3.50
μ = 2.25
α = 0.70

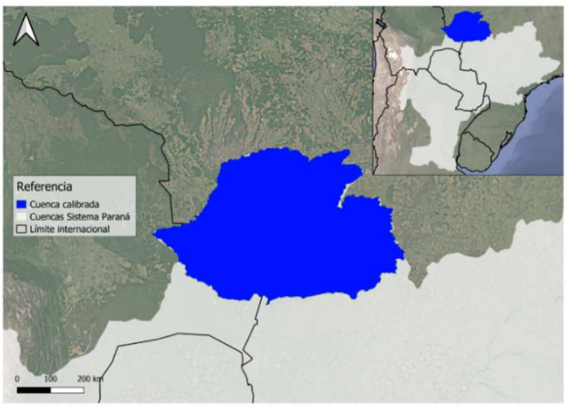
Caudales medios:
Simulado = 1633 m³/s
Observado = 1743 m³/s

Indicadores:
RMSE = 1191
MAE = 729
NSE = 0.42





Sistema Iguazú

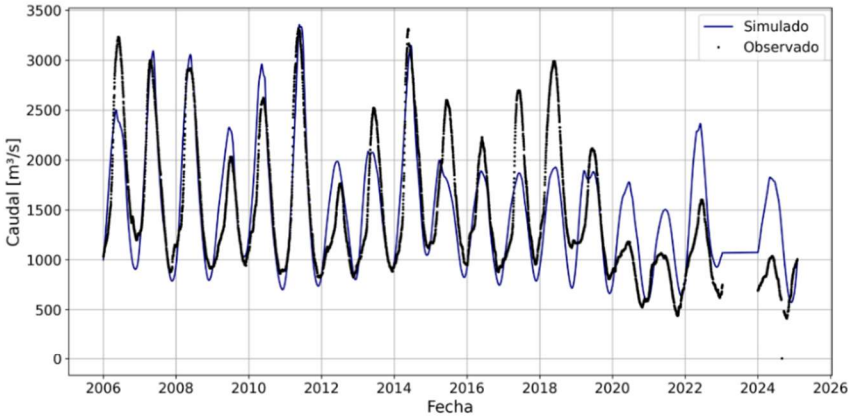


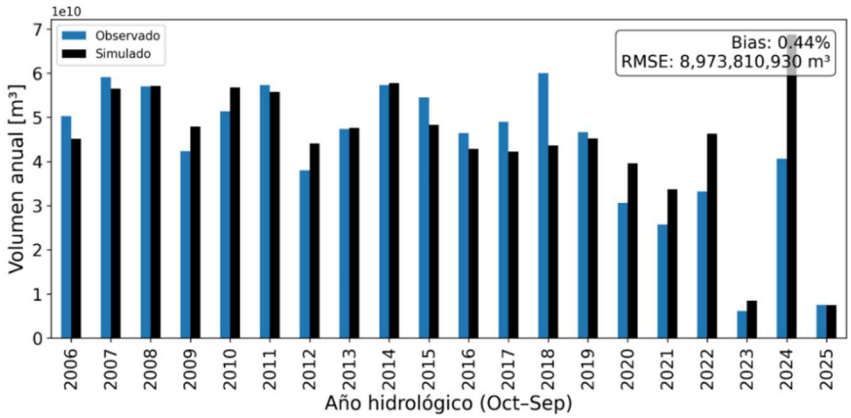
Nombre: Aportes Sao Francisco
Área: 243820 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 100
m1 = 2.00
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 8.00
α = 0.21

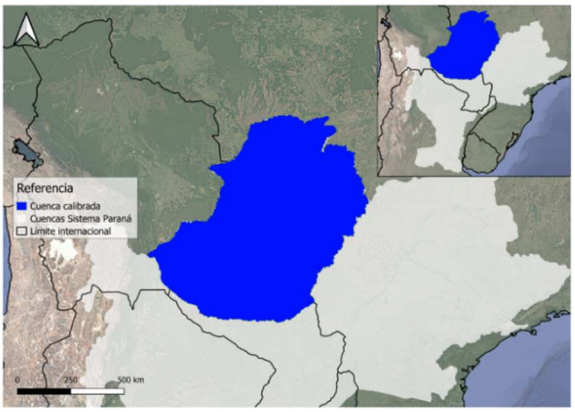
Caudales medios:
Simulado = 1511 m³/s
Observado = 1472 m³/s

Indicadores:
RMSE = 375
MAE = 291
NSE = 0.68





Sistema Paraguay

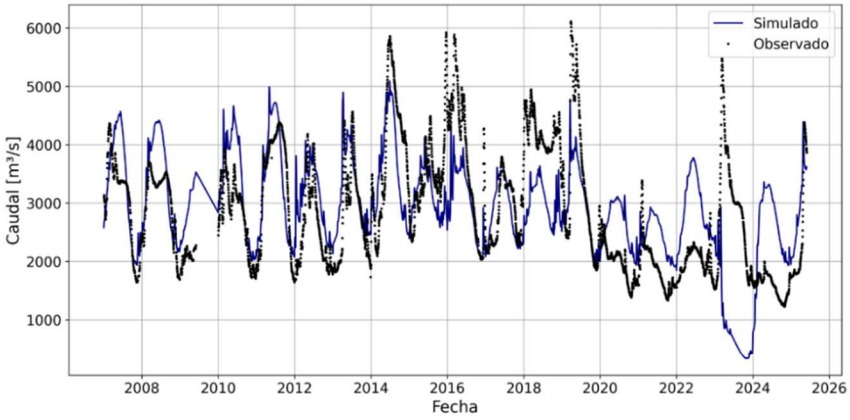


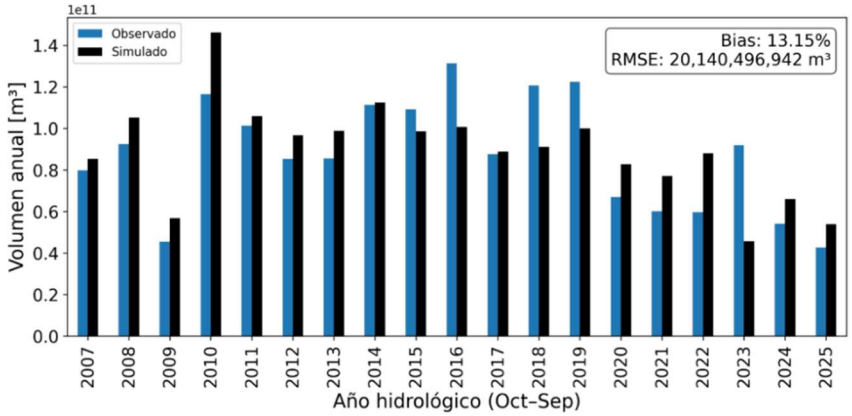
Nombre: Aportes Concepción
Área: 682919 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 100
m1 = 2.00
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 8.00
α = 0.21

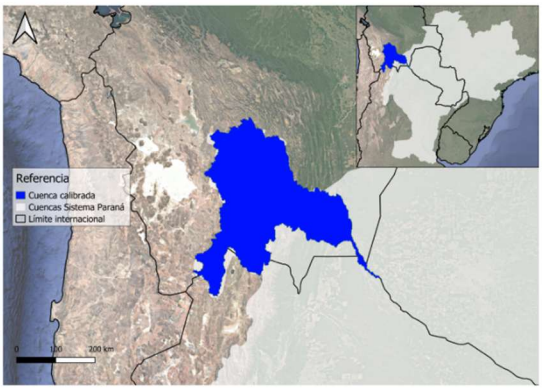
Caudales medios:
Simulado = 2915 m³/s
Observado = 2890 m³/s

Indicadores:
RMSE = 966
MAE = 753
NSE = 0.14





Sistema Paraguay

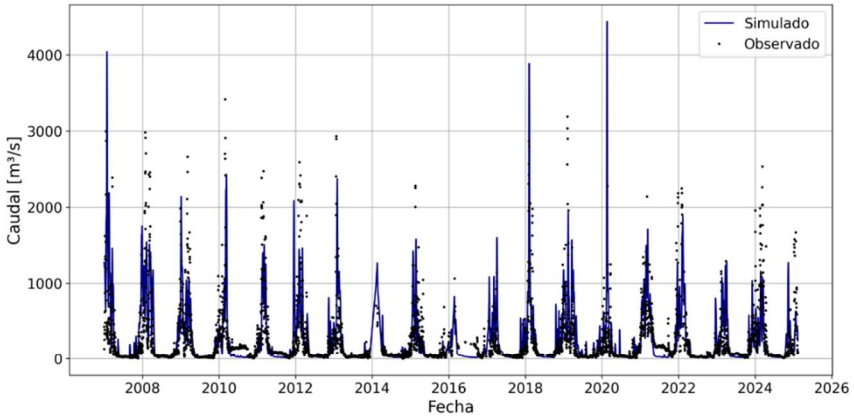


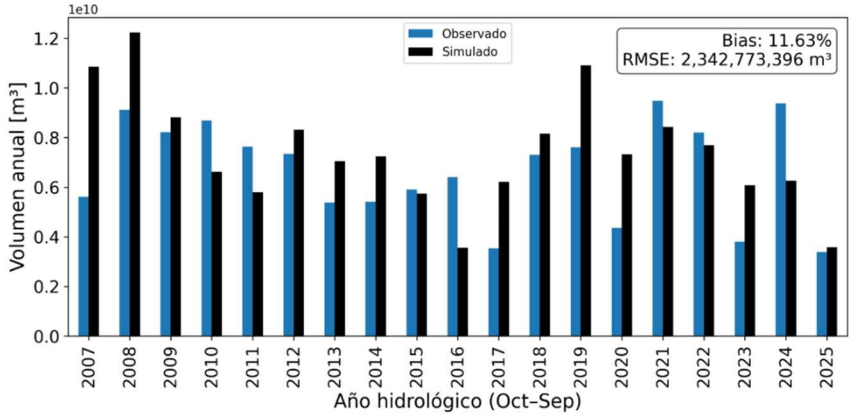
Nombre: Pilcomayo - Misión La Paz
Área: 87869 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 100
m1 = 1.00
m2 = 2.80
m3 = 3.00
μ = 20.00
α = 0.70

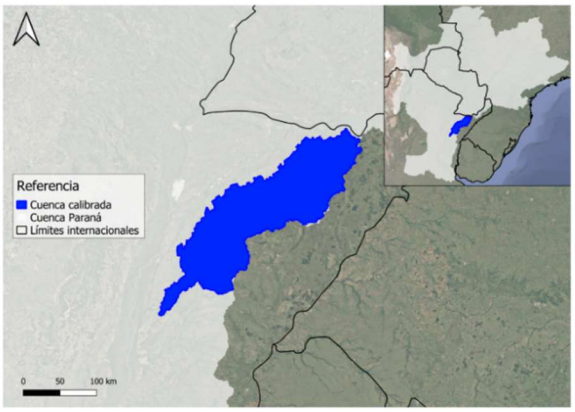
Caudales medios:
Simulado = 246 m³/s
Observado = 218 m³/s

Indicadores:
RMSE = 405
MAE = 188
NSE = -0.13





Sistema Pilcomayo

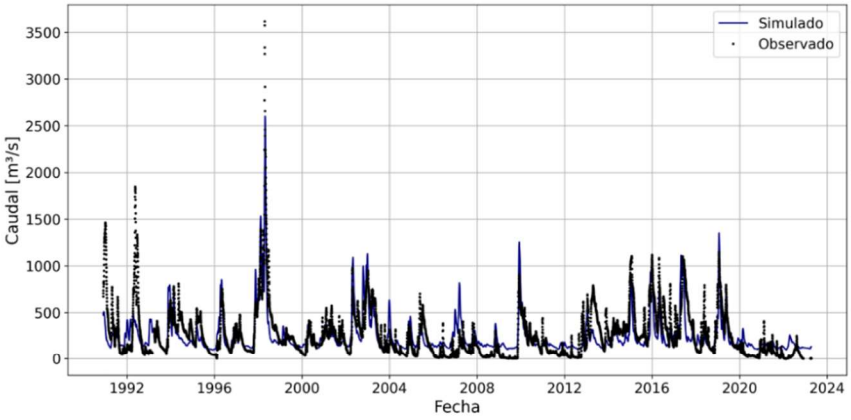


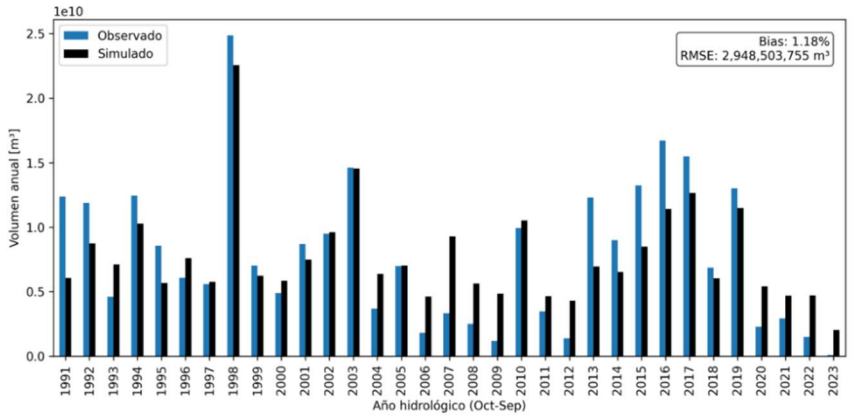
Nombre: Río Corriente
Área: 23792 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 150
m1 = 2.00
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 4.00
α = 0.10

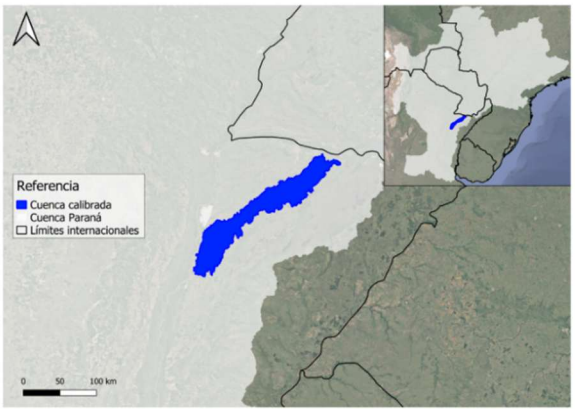
Caudales medios:
Simulado = 251 m³/s
Observado = 257 m³/s

Indicadores:
RMSE = 176
MAE = 121
NSE = 0.56





Sistema Argentina Margen Izquierda

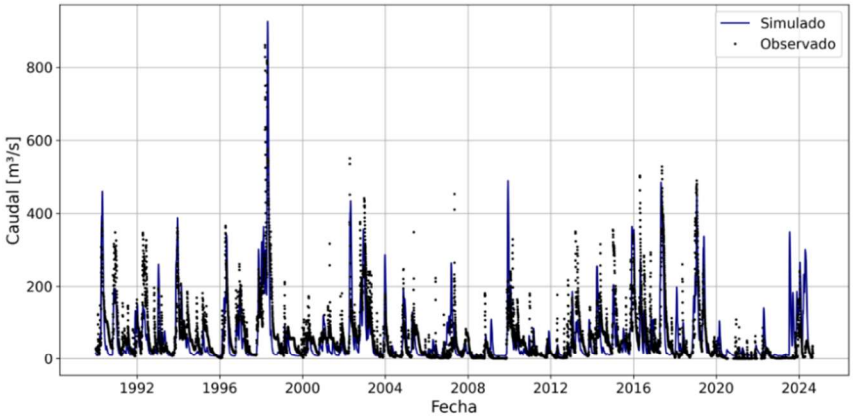


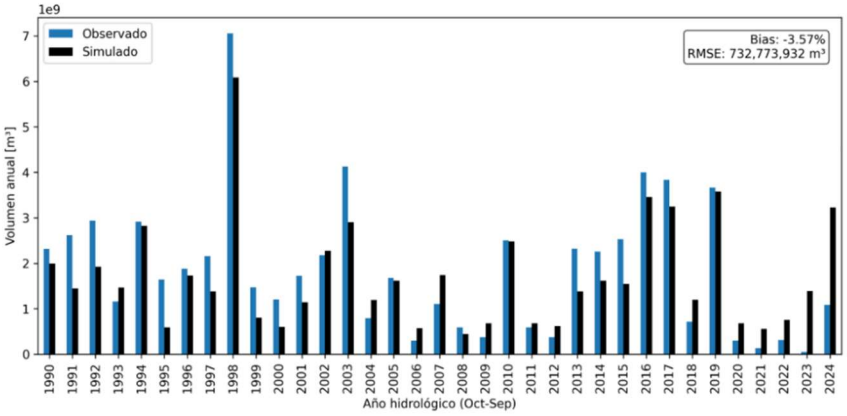
Nombre: Río Santa Lucia
Área: 6888 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 100
m1 = 3.50
m2 = 1.25
m3 = 3.00
μ = 12.00
α = 0.10

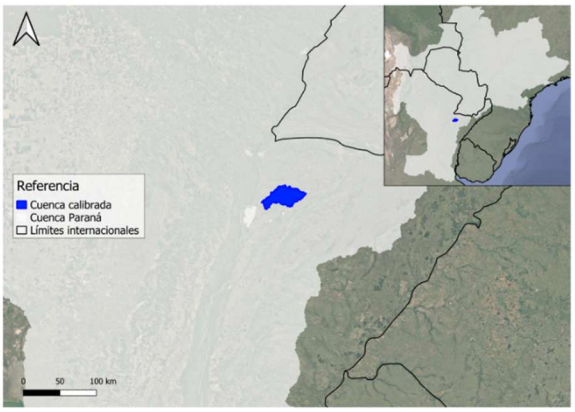
Caudales medios:
Simulado = 55 m³/s
Observado = 61 m³/s

Indicadores:
RMSE = 62
MAE = 37
NSE = 0.41





Sistema Argentina Margen Izquierda

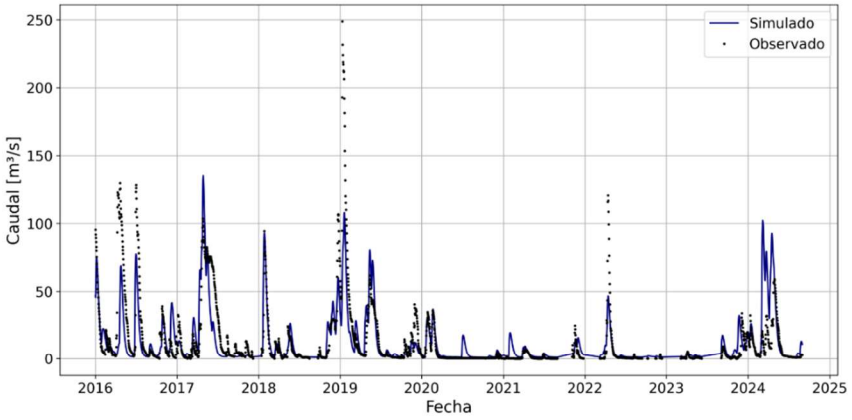


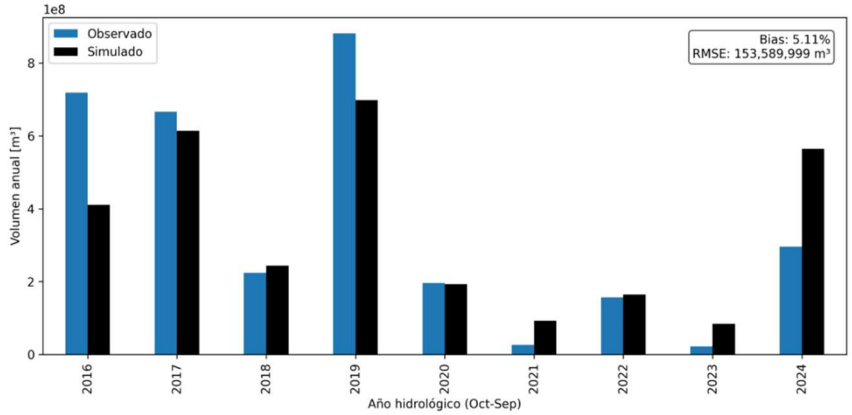
Nombre: Río San Lorenzo
Área: 1073 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 60
m1 = 3.50
m2 = 1.50
m3 = 3.00
μ = 14.00
α = 0.17

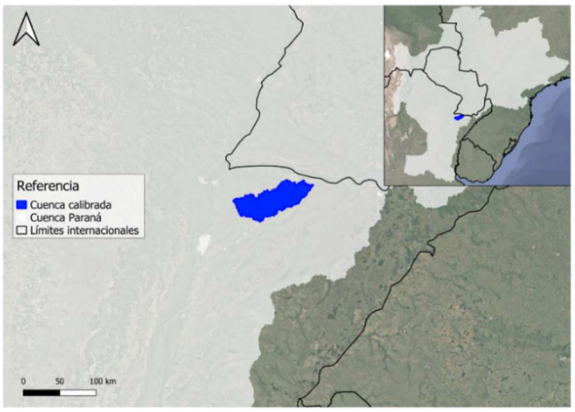
Caudales medios:
Simulado = 12 m³/s
Observado = 13 m³/s

Indicadores:
RMSE = 17
MAE = 8
NSE = 0.54





Sistema Argentina Margen Izquierda

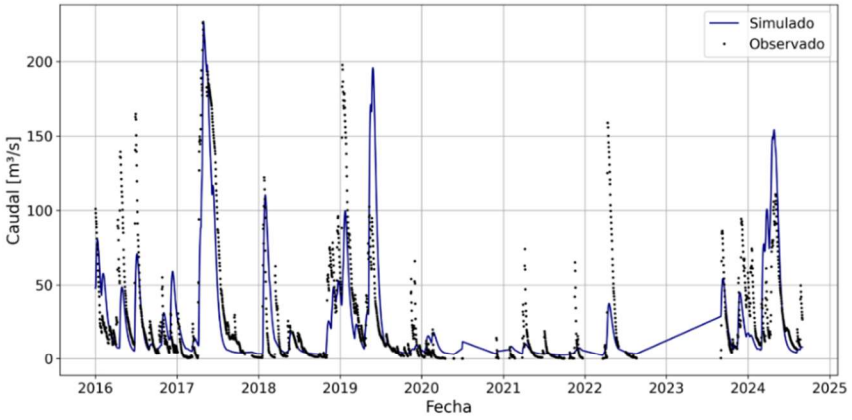


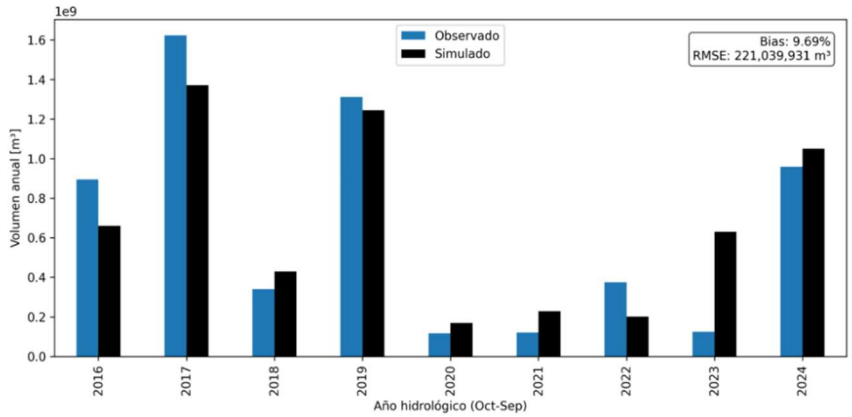
Nombre: Río Empedrado
Área: 3191 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 50
m1 = 4.50
m2 = 1.00
m3 = 1.25
μ = 14.00
α = 0.10

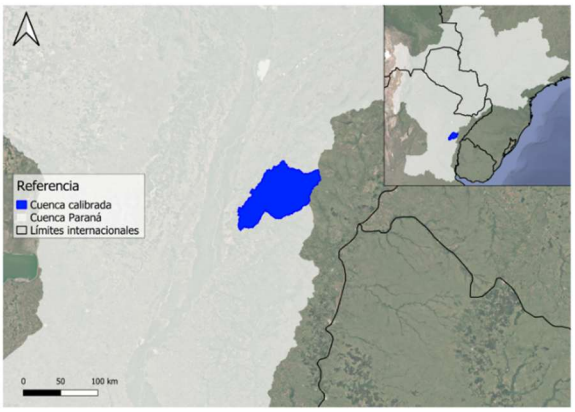
Caudales medios:
Simulado = 25 m³/s
Observado = 28 m³/s

Indicadores:
RMSE = 29
MAE = 16
NSE = 0.47





Sistema Argentina Margen Izquierda

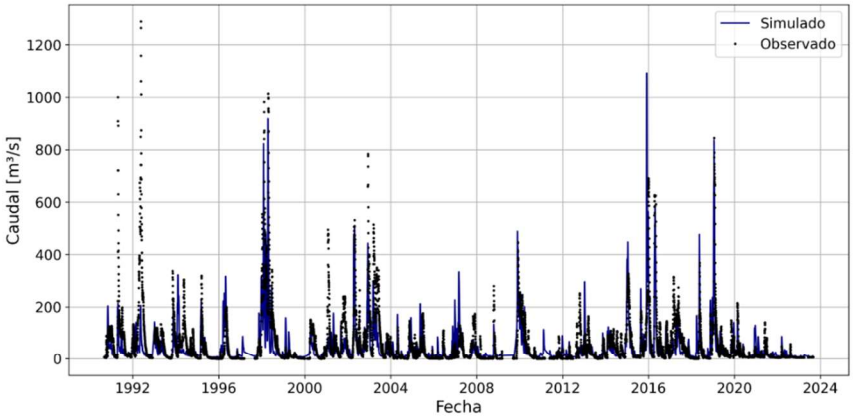


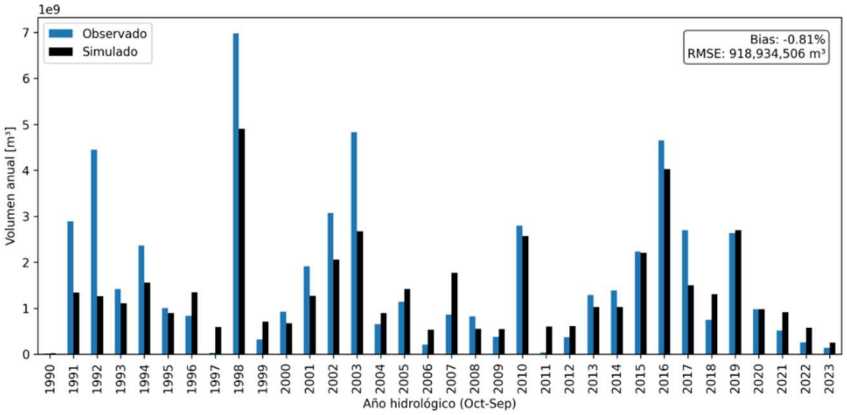
Nombre: Río Barrancas
Área: 5520 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 130
m1 = 2.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 14.00
α = 0.25

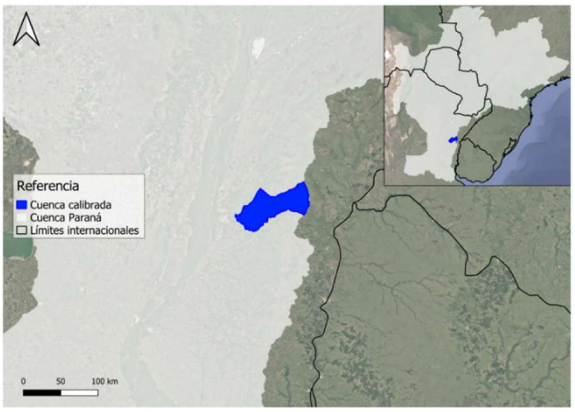
Caudales medios:
Simulado = 46 m³/s
Observado = 58 m³/s

Indicadores:
RMSE = 80
MAE = 38
NSE = 0.41





Sistema Argentina Margen Izquierda

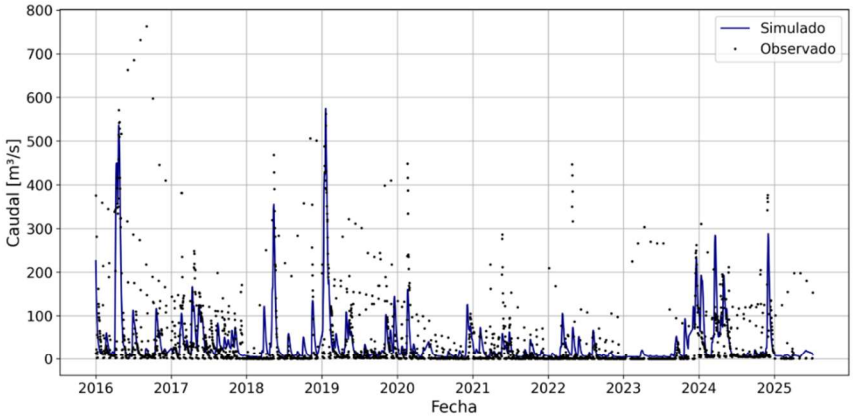


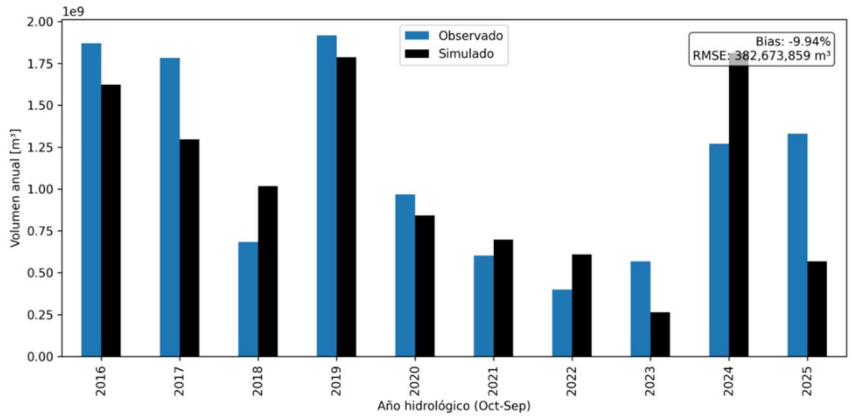
Nombre: Río Guayquiraró
Área: 3170 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 120
m1 = 2.50
m2 = 2.50
m3 = 3.00
μ = 12.00
α = 0.25

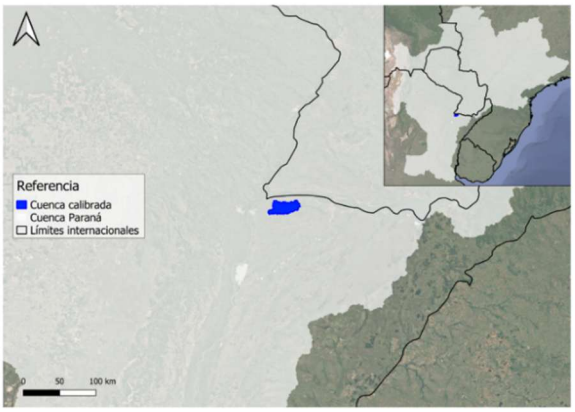
Caudales medios:
Simulado = 36 m³/s
Observado = 35 m³/s

Indicadores:
RMSE = 67
MAE = 32
NSE = 0.29





Sistema Argentina Margen Izquierda

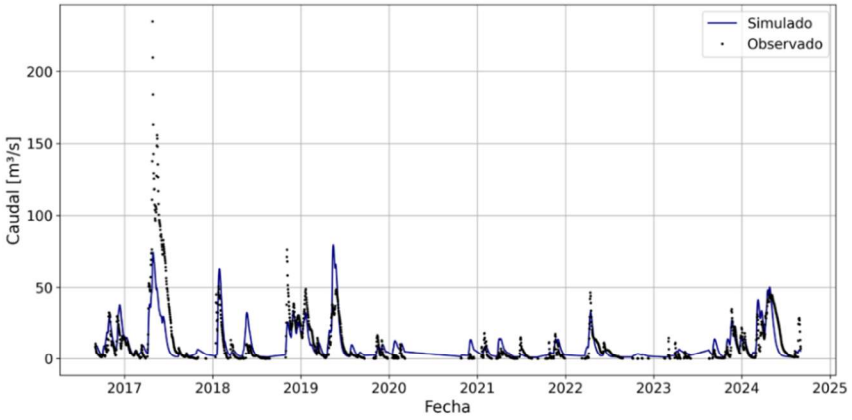


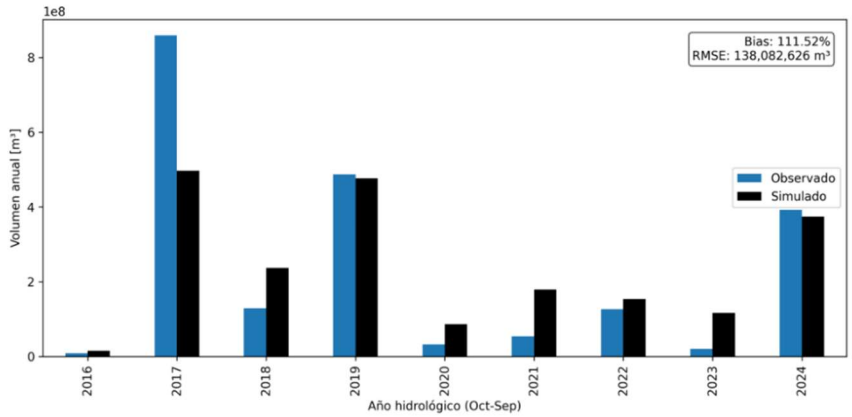
Nombre: Río Riachuelo
Área: 589 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.01
C2 = 120
m1 = 2.00
m2 = 1.00
m3 = 3.00
μ = 5.00
α = 0.15

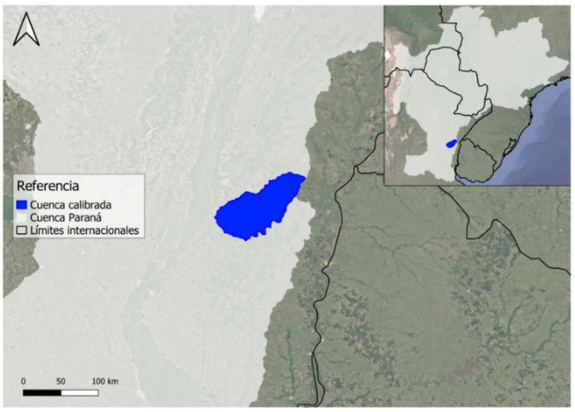
Caudales medios:
Simulado = 11 m³/s
Observado = 12 m³/s

Indicadores:
RMSE = 14
MAE = 7
NSE = 0.54





Sistema Argentina Margen Izquierda

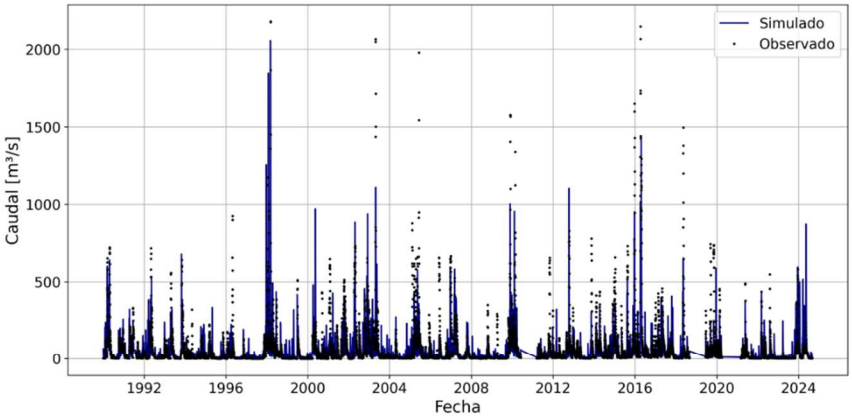


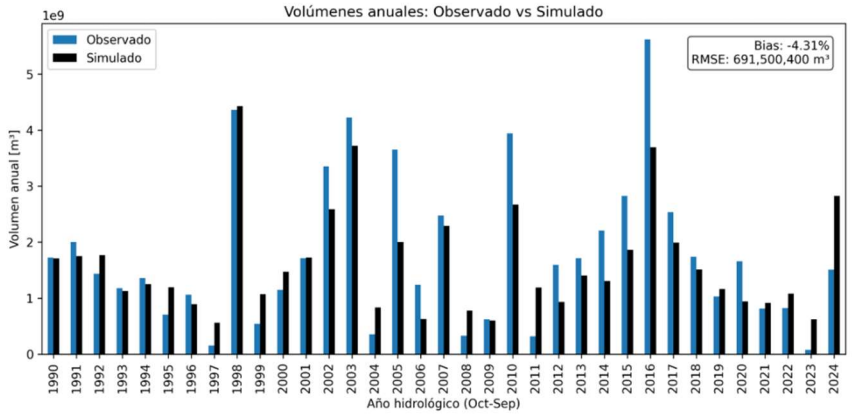
Nombre: A° Feliciano
Área: 5562 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.02
C2 = 80
m1 = 3.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 20.00
α = 0.15

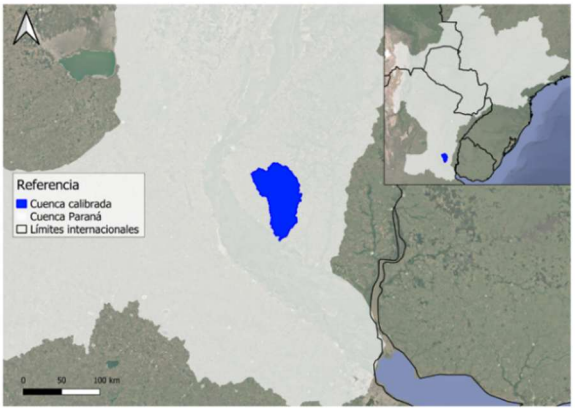
Caudales medios:
Simulado = 53 m³/s
Observado = 60 m³/s

Indicadores:
RMSE = 109
MAE = 48
NSE = 0.44





Sistema Argentina Margen Izquierda

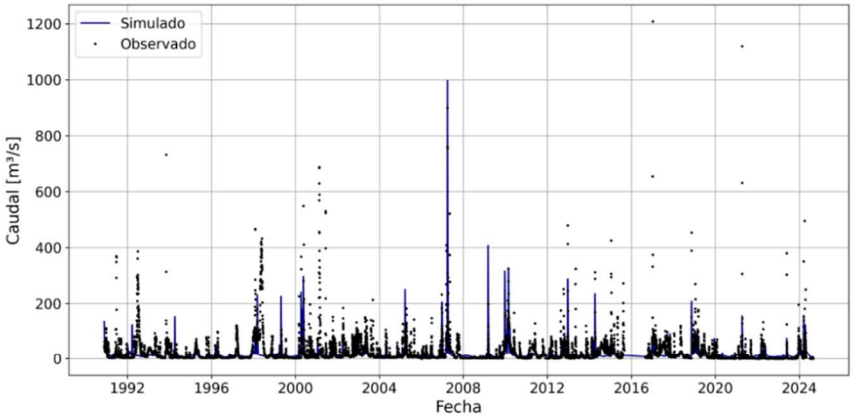


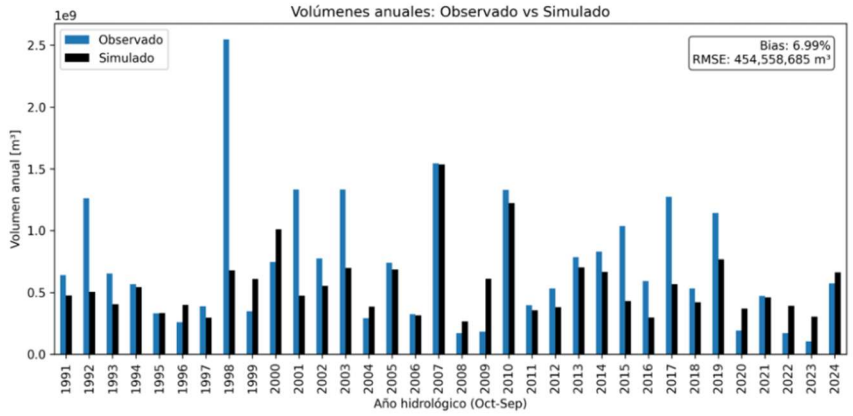
Nombre: Río Nogoyá
Área: 3874 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.02
C2 = 80
m1 = 3.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 20.00
α = 0.15

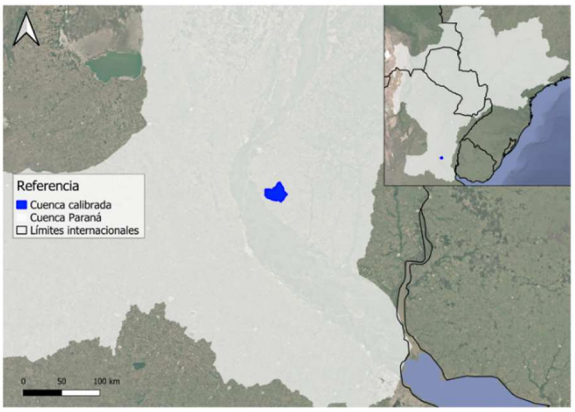
Caudales medios:
Simulado = 17 m³/s
Observado = 23 m³/s

Indicadores:
RMSE = 46
MAE = 18
NSE = 0.12





Sistema Argentina Margen Izquierda

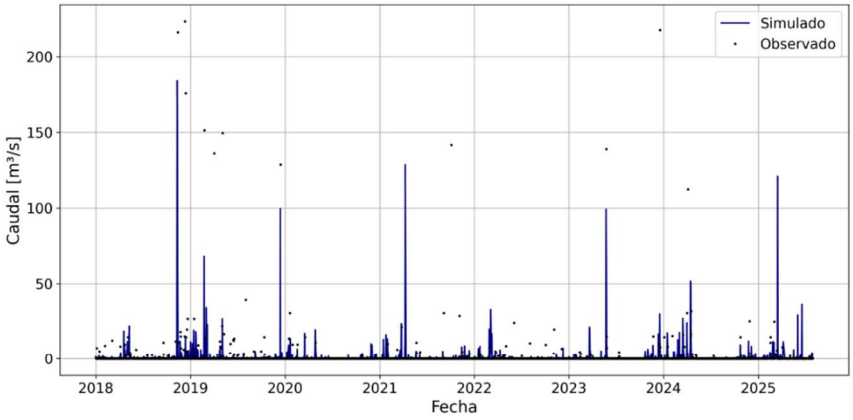


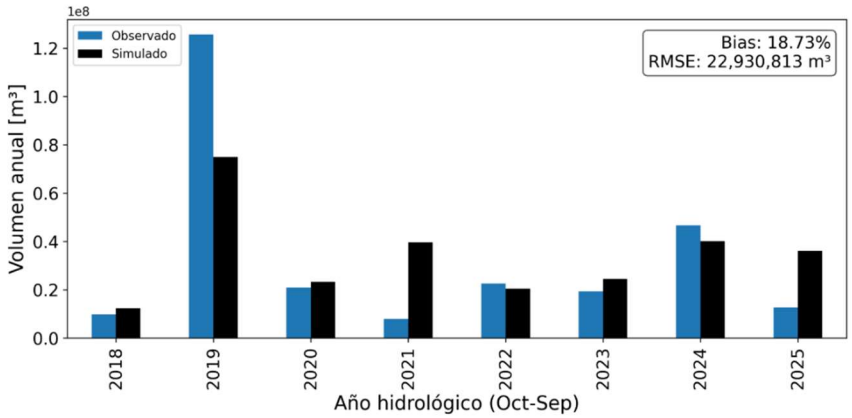
Nombre: Río Doll
Área: 451 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.02
C2 = 80
m1 = 3.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 20.00
α = 0.15

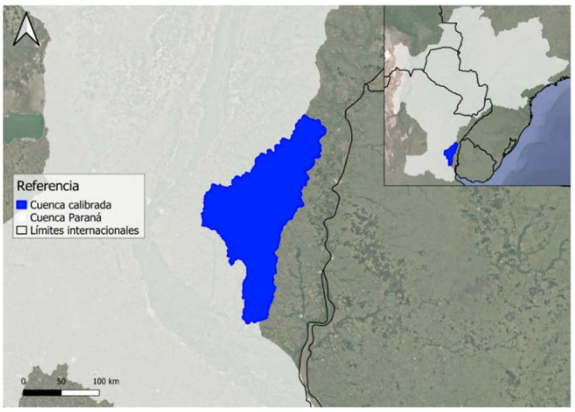
Caudales medios:
Simulado = 1 m³/s
Observado = 1 m³/s

Indicadores:
RMSE = 12
MAE = 1
NSE = -0.29





Sistema Argentina Margen Izquierda

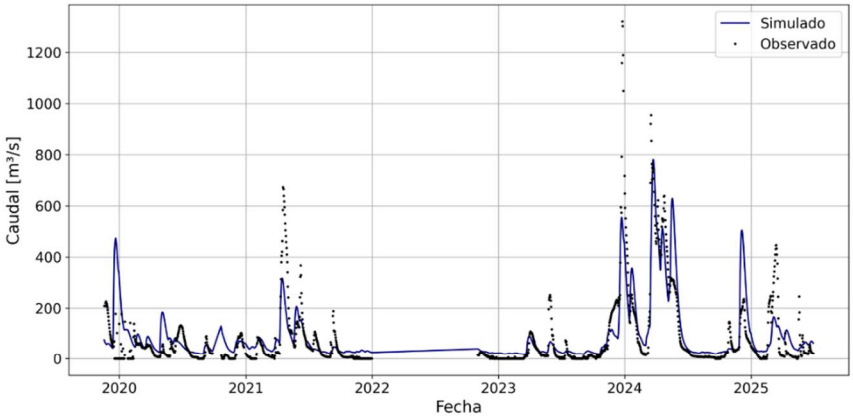


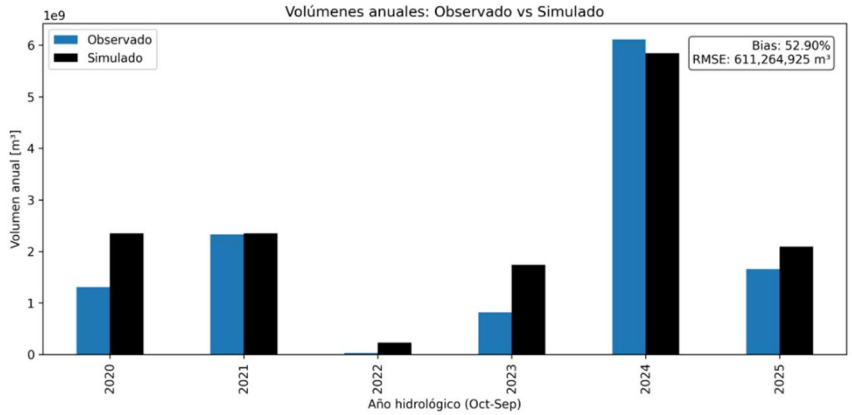
Nombre: Río Gualeguay
Área: 19191 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.02
C2 = 80
m1 = 3.50
m2 = 2.25
m3 = 3.00
μ = 20.00
α = 0.15

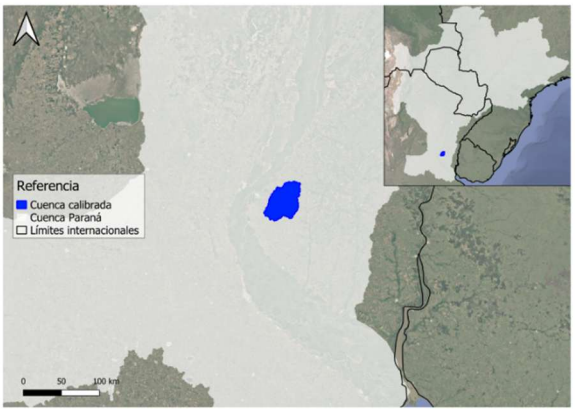
Caudales medios:
Simulado = 90 m³/s
Observado = 80 m³/s

Indicadores:
RMSE = 92
MAE = 52
NSE = 0.61





Sistema Argentina Margen Izquierda

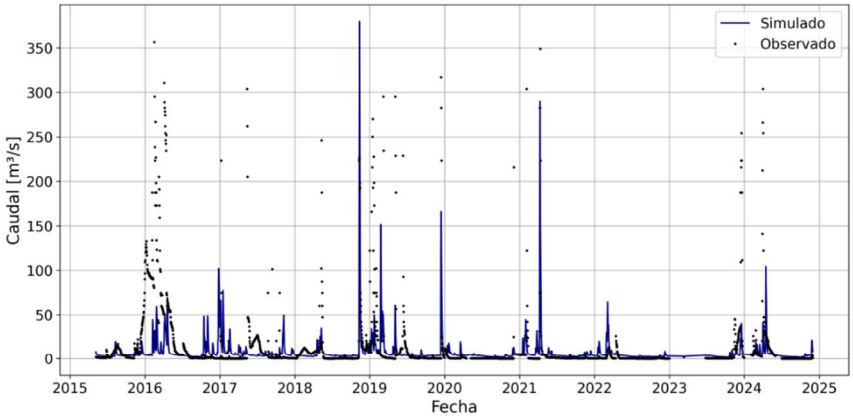


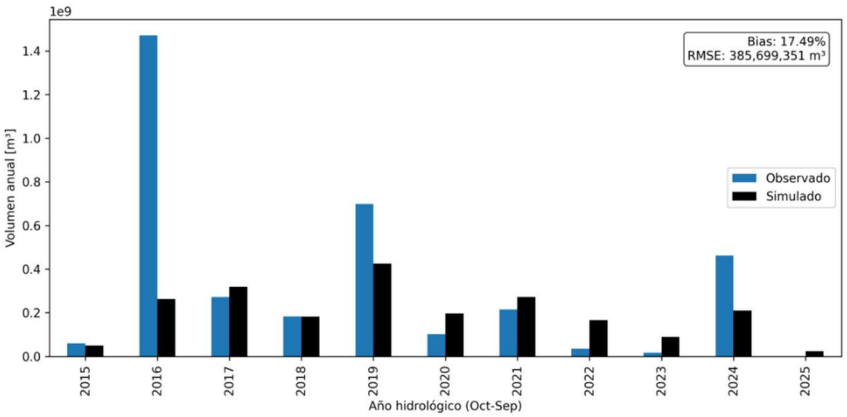
Nombre: A° Las Conchas
Área: 1725 km²

Parámetros de calibración:
C1 = 0.00
C2 = 100
m1 = 1.75
m2 = 1.25
m3 = 3.00
μ = 12.00
α = 0.70

Caudales medios:
Simulado = 7 m³/s
Observado = 12 m³/s

Indicadores:
RMSE = 35
MAE = 12
NSE = 0.18





Sistema Argentina Margen Izquierda

ANEXO II: Resumen de forzantes y escenarios de CC

Tabla 1. Precipitación [mm]. Sistema Alto Paraná. Horizonte Corto Plazo (2020-2040).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	25	121	242
	BCC-CSM2-MR	24	125	213
	INM-CM5-0	27	122	232
	MIROC-ES2L	19	124	228
	NorESM2-MM	20	126	239
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	26	133	243
	BCC-CSM2-MR	28	125	226
	INM-CM5-0	13	116	219
	MIROC-ES2L	13	116	219
	NorESM2-MM	13	115	228
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	22	129	250
	BCC-CSM2-MR	25	121	224
	INM-CM5-0	28	118	237
	MIROC-ES2L	17	113	224
	NorESM2-MM	8	99	246

Tabla 2. Precipitación [mm]. Sistema Alto Paraná. Horizonte Mediano Plazo (2041-2060).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	29	131	236
	BCC-CSM2-MR	23	128	218
	INM-CM5-0	25	130	245
	MIROC-ES2L	17	126	219
	NorESM2-MM	15	122	245
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	24	122	233
	BCC-CSM2-MR	17	128	232
	INM-CM5-0	22	138	238
	MIROC-ES2L	15	120	221
	NorESM2-MM	12	118	228
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	22	128	250
	BCC-CSM2-MR	26	128	231
	INM-CM5-0	26	119	228
	MIROC-ES2L	20	119	228
	NorESM2-MM	8	114	239

Tabla 3. Precipitación [mm]. Sistema Alto Paraná. Horizonte Largo Plazo (2081-2100).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	14	114	241
	BCC-CSM2-MR	18	107	213
	INM-CM5-0	17	119	213
	MIROC-ES2L	11	110	232
	NorESM2-MM	7	108	228
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	18	122	242
	BCC-CSM2-MR	12	101	232
	INM-CM5-0	9	110	210
	MIROC-ES2L	13	110	221
	NorESM2-MM	6	98	244
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	14	133	260
	BCC-CSM2-MR	6	109	228
	INM-CM5-0	23	124	215
	MIROC-ES2L	7	98	218
	NorESM2-MM	3	107	229

Tabla 4. Evapotranspiración [mm]. Sistema Alto Paraná. Horizonte Corto Plazo (2020-2040).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	100	149	176
	BCC-CSM2-MR	99	147	177
	INM-CM5-0	102	145	174
	MIROC-ES2L	100	144	175
	NorESM2-MM	102	148	171
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	101	148	174
	BCC-CSM2-MR	98	144	176
	INM-CM5-0	99	146	174
	MIROC-ES2L	100	147	175
	NorESM2-MM	100	147	175
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	101	148	176
	BCC-CSM2-MR	97	146	173
	INM-CM5-0	101	147	176
	MIROC-ES2L	102	149	179
	NorESM2-MM	102	147	172

Tabla 5. Evapotranspiración [mm]. Sistema Alto Paraná. Horizonte Mediano Plazo (2041-2060).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	102	153	180
	BCC-CSM2-MR	101	148	178
	INM-CM5-0	99	146	174
	MIROC-ES2L	102	147	175
	NorESM2-MM	103	149	174
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	102	154	181
	BCC-CSM2-MR	103	148	175
	INM-CM5-0	96	145	174
	MIROC-ES2L	97	147	177
	NorESM2-MM	104	151	175
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	106	155	180
	BCC-CSM2-MR	100	151	179
	INM-CM5-0	101	151	183
	MIROC-ES2L	101	150	178
	NorESM2-MM	104	151	174

Tabla 6. Evapotranspiración [mm]. Sistema Alto Paraná. Horizonte Largo Plazo (2081-2100).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	99	150	180
	BCC-CSM2-MR	97	144	177
	INM-CM5-0	93	145	173
	MIROC-ES2L	95	149	179
	NorESM2-MM	94	146	173
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	99	154	189
	BCC-CSM2-MR	99	150	185
	INM-CM5-0	102	149	187
	MIROC-ES2L	96	147	181
	NorESM2-MM	98	155	178
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	101	170	202
	BCC-CSM2-MR	103	155	194
	INM-CM5-0	104	158	193
	MIROC-ES2L	102	160	191
	NorESM2-MM	102	160	188

Tabla 7. Caudales históricos [m³/s] en Itaipu (Sistema Alto Paraná).

Escenario	Modelo climático	P10	P25	Mediana	P75	P90
Histórico Simulado	ACCESS-CM2	8714	9866	11882	13940	15385
	BCC-CSM2-MR	7873	9311	11879	13254	14463
	INM-CM5-0	8526	9646	11623	13400	15067
	MIROC-ES2L	8538	10315	12052	13585	14976
	NorESM2-MM	7229	9285	11993	13730	15135
Histórico Observado		7972	9062	11276	13662	16220

Tabla 8. Proyecciones de caudal [m³/s] en Itaipu (Sistema Alto Paraná). Horizonte Corto Plazo (2020-2040).

Escenario	Modelo climático	p10	Mediana	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	8351	12064	15684
	BCC-CSM2-MR	8141	11812	14385
	INM-CM5-0	8771	11840	15156
	MIROC-ES2L	8128	12387	14955
	NorESM2-MM	7869	11877	15365
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	8631	12082	15579
	BCC-CSM2-MR	8496	11961	14720
	INM-CM5-0	9021	12392	14883
	MIROC-ES2L	8332	11702	14268
	NorESM2-MM	7118	11597	14627
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	8450	12286	15796
	BCC-CSM2-MR	8280	11756	14601
	INM-CM5-0	8994	11794	15498
	MIROC-ES2L	8097	11608	14527
	NorESM2-MM	6395	11399	14790

Tabla 9. Proyecciones de caudal [m3/s] en Itaipu (Sistema Alto Paraná). Horizonte Mediano Plazo (2041-2060).

Escenario	Modelo climático	p10	Mediana	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	8643	12410	15367
	BCC-CSM2-MR	7839	11695	14537
	INM-CM5-0	8730	12113	16093
	MIROC-ES2L	8099	12206	14719
	NorESM2-MM	7599	11501	15011
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	8653	12097	14940
	BCC-CSM2-MR	7982	11636	14880
	INM-CM5-0	8576	12527	15693
	MIROC-ES2L	7897	11960	14839
	NorESM2-MM	7109	11453	14771
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	8288	12168	16158
	BCC-CSM2-MR	8074	11761	14539
	INM-CM5-0	8323	11805	14742
	MIROC-ES2L	8421	11952	15009
	NorESM2-MM	6801	11619	15752

Tabla 10. Proyecciones de caudal [m³/s]en Itaipu (Sistema Alto Paraná). Horizonte Largo Plazo (2081-2100).

Escenario	Modelo climático	P10	Mediana	P90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	8271	12013	15337
	BCC-CSM2-MR	8026	11343	14256
	INM-CM5-0	8726	12180	15217
	MIROC-ES2L	8102	11870	14520
	NorESM2-MM	7433	11624	15236
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	8746	12194	15337
	BCC-CSM2-MR	8036	11306	14621
	INM-CM5-0	7910	11899	13611
	MIROC-ES2L	8202	12257	14929
	NorESM2-MM	6789	11597	15091
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	8699	12825	16621
	BCC-CSM2-MR	7589	11697	14420
	INM-CM5-0	8384	12031	14435
	MIROC-ES2L	7487	11494	14317
	NorESM2-MM	6417	11483	15306

Tabla 11. Precipitación [mm]. Sistema Paraguay. Horizonte Corto Plazo (2020-2040).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	20	107	189
	BCC-CSM2-MR	25	102	172
	INM-CM5-0	20	102	195
	MIROC-ES2L	18	104	187
	NorESM2-MM	11	103	191
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	29	107	178
	BCC-CSM2-MR	24	104	175
	INM-CM5-0	25	114	186
	MIROC-ES2L	11	99	177
	NorESM2-MM	13	99	196
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	24	107	189
	BCC-CSM2-MR	20	103	176
	INM-CM5-0	24	99	190
	MIROC-ES2L	18	105	172
	NorESM2-MM	7	98	188

Tabla 12. Precipitación [mm]. Sistema Paraguay. Horizonte Mediano Plazo (2041-2060).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	25	99	184
	BCC-CSM2-MR	16	99	175
	INM-CM5-0	27	110	203
	MIROC-ES2L	14	108	183
	NorESM2-MM	12	108	200
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	22	101	170
	BCC-CSM2-MR	17	97	182
	INM-CM5-0	16	116	199
	MIROC-ES2L	14	98	195
	NorESM2-MM	11	107	179
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	24	106	191
	BCC-CSM2-MR	21	97	173
	INM-CM5-0	19	98	187
	MIROC-ES2L	20	103	188
	NorESM2-MM	9	98	195

Tabla 13. Precipitación [mm]. Sistema Paraguay. Horizonte Largo Plazo (2081-2100).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	17	105	181
	BCC-CSM2-MR	17	88	172
	INM-CM5-0	14	97	189
	MIROC-ES2L	9	89	183
	NorESM2-MM	5	97	193
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	14	100	184
	BCC-CSM2-MR	9	84	171
	INM-CM5-0	7	95	175
	MIROC-ES2L	13	95	184
	NorESM2-MM	4	88	185
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	10	101	198
	BCC-CSM2-MR	5	95	164
	INM-CM5-0	22	106	189
	MIROC-ES2L	5	98	176
	NorESM2-MM	2	96	192

Tabla 14. Evapotranspiración [mm]. Sistema Paraguay. Horizonte Corto Plazo (2020-2040).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	94	153	190
	BCC-CSM2-MR	94	153	188
	INM-CM5-0	96	146	191
	MIROC-ES2L	96	148	191
	NorESM2-MM	97	152	188
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	97	152	190
	BCC-CSM2-MR	93	150	187
	INM-CM5-0	92	145	188
	MIROC-ES2L	96	147	188
	NorESM2-MM	96	153	190
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	95	153	191
	BCC-CSM2-MR	96	150	186
	INM-CM5-0	93	150	188
	MIROC-ES2L	97	150	189
	NorESM2-MM	97	155	190

Tabla 15. Evapotranspiración [mm]. Sistema Paraguay. Horizonte Mediano Plazo (2041-2060).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	96	157	193
	BCC-CSM2-MR	99	152	191
	INM-CM5-0	93	149	186
	MIROC-ES2L	98	151	190
	NorESM2-MM	99	155	189
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	97	158	197
	BCC-CSM2-MR	101	152	186
	INM-CM5-0	91	142	190
	MIROC-ES2L	98	151	194
	NorESM2-MM	99	158	190
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	100	162	199
	BCC-CSM2-MR	100	156	192
	INM-CM5-0	95	154	201
	MIROC-ES2L	97	152	194
	NorESM2-MM	100	161	190

Tabla 16. Evapotranspiración [mm]. Sistema Paraguay. Horizonte Largo Plazo (2081-2100).

Escenario	Modelo Climático	p10	p50	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	92	155	195
	BCC-CSM2-MR	92	151	190
	INM-CM5-0	89	146	188
	MIROC-ES2L	92	151	194
	NorESM2-MM	92	154	190
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	95	161	202
	BCC-CSM2-MR	94	152	193
	INM-CM5-0	94	151	199
	MIROC-ES2L	92	147	191
	NorESM2-MM	94	159	194
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	96	177	221
	BCC-CSM2-MR	100	163	206
	INM-CM5-0	95	156	205
	MIROC-ES2L	96	160	204
	NorESM2-MM	99	166	205

Tabla 17. Caudales históricos en Asunción [m³/s]. Sistema Paraguay.

Escenario	Modelo climático	P10	P25	Mediana	P75	P90
Histórico Simulado	ACCESS-CM2	3093	3299	3827	4471	4846
	BCC-CSM2-MR	2886	3134	3588	4213	4558
	INM-CM5-0	2846	3134	3599	4105	4351
	MIROC-ES2L	2914	3254	3719	4267	4511
	NorESM2-MM	2613	2838	3487	4093	4426
Histórico Calibrado		2848	3210	3658	4461	4849

Tabla 18. Proyecciones de caudal [m³/s] en Asunción (Sistema Paraguay). Horizonte Corto Plazo (2020-2040).

Escenario	Modelo climático	p10	Mediana	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	2855	3631	4482
	BCC-CSM2-MR	2906	3613	4514
	INM-CM5-0	2918	3713	4706
	MIROC-ES2L	2898	3711	4576
	NorESM2-MM	2564	3565	4799
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	2901	3635	4550
	BCC-CSM2-MR	2851	3707	4503
	INM-CM5-0	3130	3749	4798
	MIROC-ES2L	2869	3564	4408
	NorESM2-MM	2539	3493	4606
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	2916	3586	4562
	BCC-CSM2-MR	2901	3590	4394
	INM-CM5-0	2984	3674	5109
	MIROC-ES2L	2805	3564	4564
	NorESM2-MM	2402	3326	4463

Tabla 19. Proyecciones de caudal [m³/s] en Asunción (Sistema Paraguay). Horizonte Mediano Plazo (2041-2060).

Escenario	Modelo climático	p10	Mediana	p90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	2862	3539	4348
	BCC-CSM2-MR	2767	3543	4495
	INM-CM5-0	2980	3935	5377
	MIROC-ES2L	2957	3727	4622
	NorESM2-MM	2591	3385	4660
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	2823	3440	4309
	BCC-CSM2-MR	2768	3568	4456
	INM-CM5-0	3062	3915	5331
	MIROC-ES2L	2763	3533	4512
	NorESM2-MM	2549	3380	4437
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	2837	3525	4528
	BCC-CSM2-MR	2840	3482	4407
	INM-CM5-0	2834	3635	4701
	MIROC-ES2L	2829	3664	4621
	NorESM2-MM	2379	3333	4513

Tabla 20. Proyecciones de caudal [m^3/s] en Asunción (Sistema Paraguay). Horizonte Largo Plazo (2081-2100).

Escenario	Modelo climático	P10	Mediana	P90
SSP1-2.6	ACCESS-CM2	2898	3488	4412
	BCC-CSM2-MR	2846	3519	4410
	INM-CM5-0	2957	3669	4750
	MIROC-ES2L	2852	3596	4478
	NorESM2-MM	2573	3419	4620
SSP2-4.5	ACCESS-CM2	2770	3438	4422
	BCC-CSM2-MR	2616	3340	4176
	INM-CM5-0	2828	3423	4438
	MIROC-ES2L	2884	3668	4745
	NorESM2-MM	2509	3280	4237
SSP5-8.5	ACCESS-CM2	2776	3411	4461
	BCC-CSM2-MR	2609	3287	4287
	INM-CM5-0	2911	3649	4949
	MIROC-ES2L	2624	3529	4658
	NorESM2-MM	2455	3305	4240