VI CONGRESO NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO
& IX SIMPOSIO NACIONAL MARINO COSTERO

Predicción de caudales en el río Madre Vieja como una herramienta de adaptación al cambio climático

MSc. Cesar Espinosa - ICC

14/10/2026

Contenido

01 Introducción y justificación

02 Marco teórico

03 Objetivo y área de estudio

04 Metodología

05 Resultados

06 Discusión

07 Conclusiones

08 Recomendaciones

Contexto y planteamiento del problema

La vertiente del Pacífico de Guatemala enfrenta cambios en la temperatura y en el régimen de lluvias.

Variabilidad climática en vertiente del Pacífico

→ **Lluvias mas intensas** → **Inundaciones**

→ **Mayor temperatura y déficit de lluvia** → **Sequías**

PRENSA LIBRE | 26/09/2017

Ríos se desbordan e inundan comunidades de la Costa Sur

Chapín TV | 05/09/2026

Sequía provoca aumento en precio del maíz en Retalhuleu y encarece las tortillas

El reto: anticipar cambios en el caudal para apoyar la gestión y la adaptación.

Justificación

¿Por qué predecir caudales en un contexto de cambio climático?

Las herramientas de predicción fortalecen la gestión integrada del recurso hídrico y ayudan a reducir la vulnerabilidad ante eventos extremos.

APFM (2013)



APFM (2013). Flood Forecasting and Early Warning. Integrated Flood Management Tools Series, n.º 19.

Marco teórico: modelos ARIMA

La familia ARIMA es uno de los enfoques clásicos para analizar y predecir series de tiempo, desarrollado en la metodología de Box y Jenkins.

ARIMA (p, d, q)

AR · Autorregresivo

p

Número de rezagos de la serie que utiliza el modelo

Usa valores anteriores de la serie.

I · Integrado

d

Número de veces que se diferencia la serie

d = 1: cambio entre dos valores consecutivos.

MA · Media móvil

q

Número de rezagos de los errores que utiliza el modelo

Usa errores anteriores; no es un promedio móvil simple.

p, d y q definen la estructura del modelo y se seleccionan durante su ajuste.

Box, Jenkins, Reinsel y Ljung (2015). Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5.ª ed., Wiley.

Marco teórico: de ARIMA a SARIMAX

Condiciones para aplicar ARIMA

Intervalos regulares
Observaciones con frecuencia constante.

Estacionariedad
Media y varianza estables tras transformar y diferenciar.

Dependencia temporal
Relaciones representables con términos AR y MA.

+ Estacionalidad

+ Variables externas

ARIMA
(p, d, q)

→

SARIMA
$(p, d, q)(P, D, Q)_s$

→

SARIMAX
+ precipitación, T° y ENSO

P **AR estacional**
Orden de los rezagos estacionales de la serie.

D **Diferenciación estacional**
Número de diferencias estacionales.

Q **MA estacional**
Orden de los rezagos estacionales de los errores.

s = observaciones por ciclo · Serie semanal con ciclo anual: s = 52.

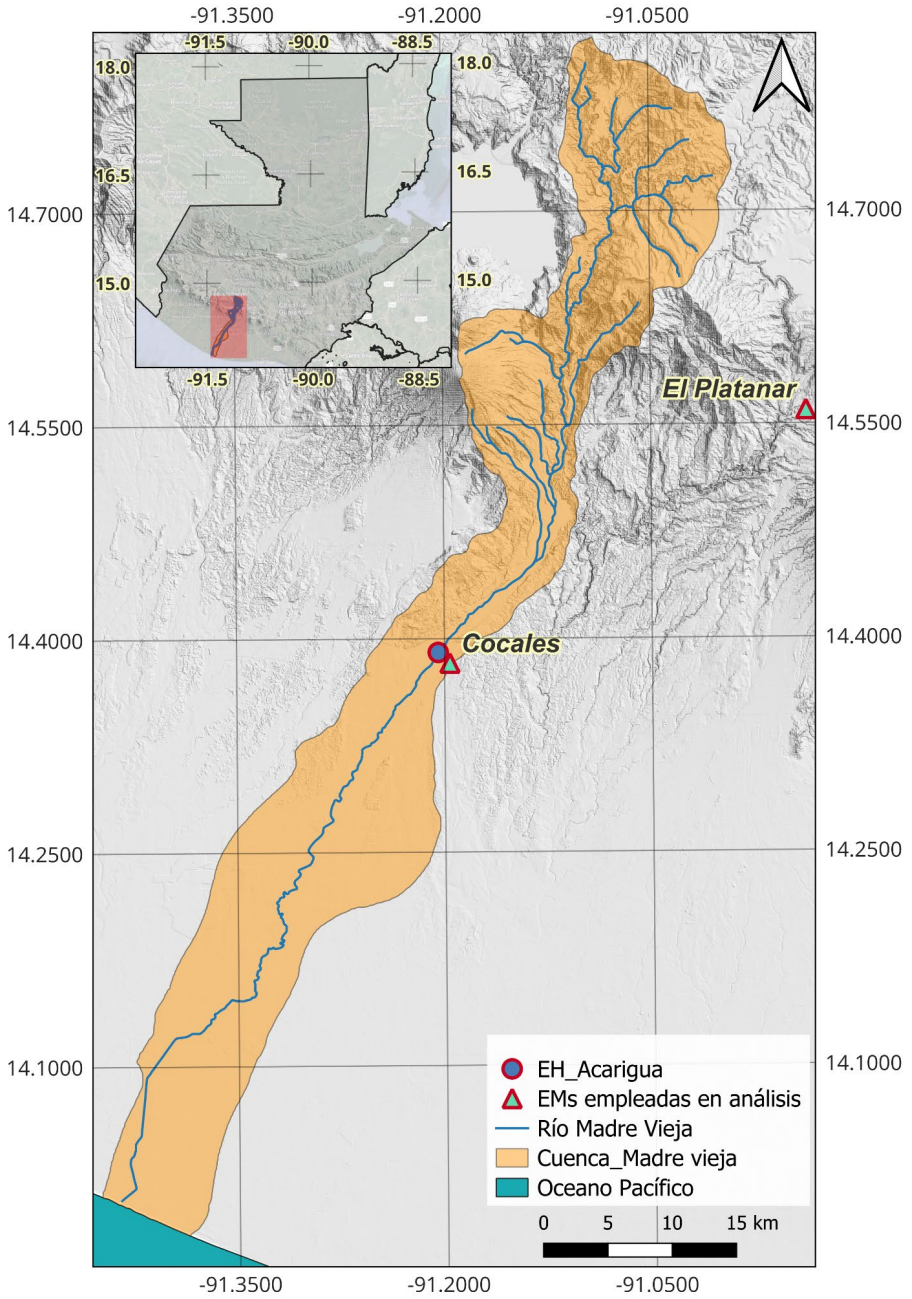
Diagnóstico del ajuste: residuos sin autocorrelación, con media cercana a cero y varianza estable.

Hyndman y Athanasopoulos (2021). Forecasting: Principles and Practice, 3.ª ed., caps. 9–10.

Objetivo principal

Evaluar la capacidad predictiva de tres modelos estadísticos de series de tiempo de la familia ARIMA (ARIMA, SARIMA y SARIMAX) para estimar el caudal promedio semanal en el río Madre Vieja, ubicado en la vertiente del Pacífico de Guatemala.

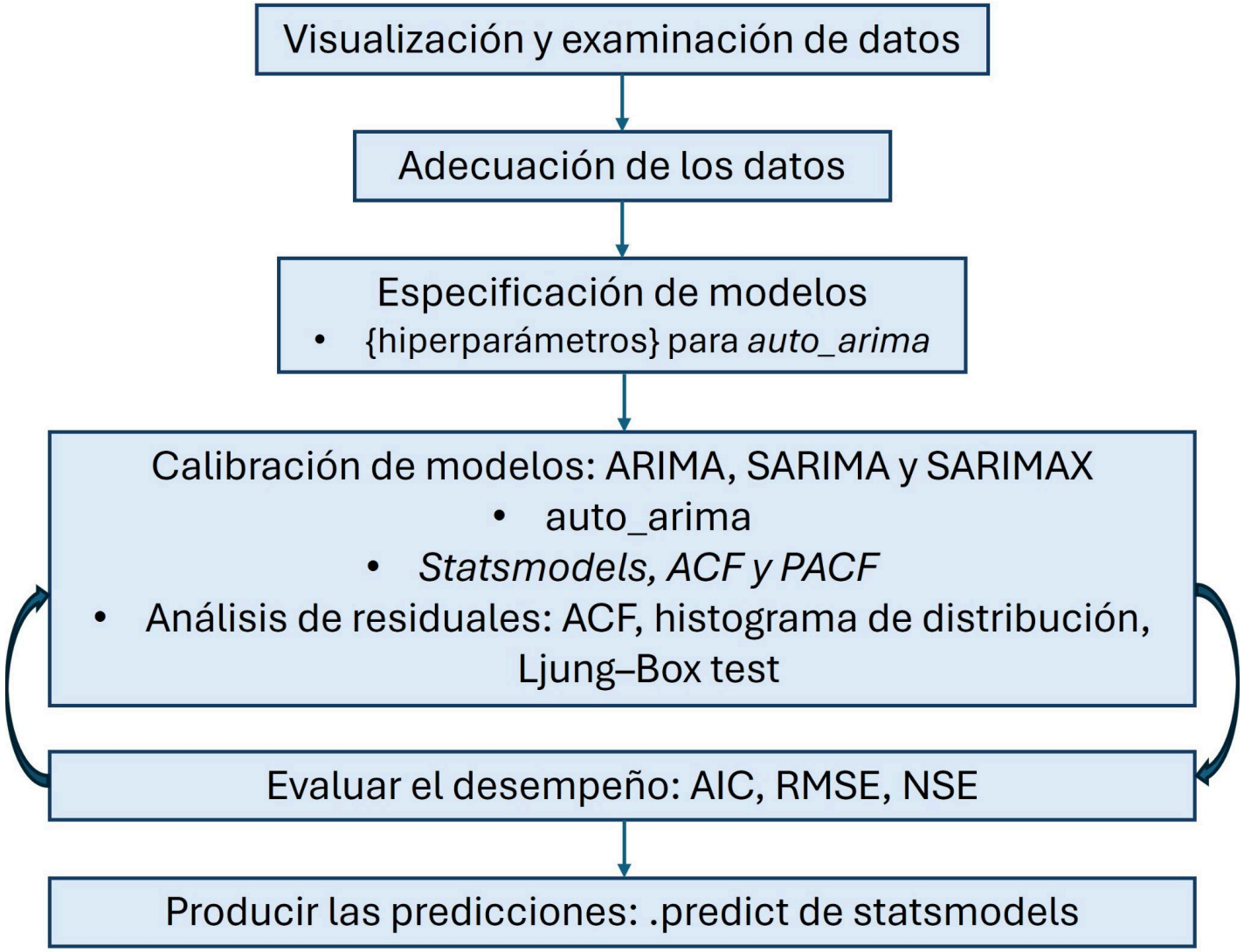
ARIMA **SARIMA** **SARIMAX**



Metodología

Calibración y validación

Se calibraron y validaron los modelos ARIMA, SARIMA y SARIMAX para comparar su capacidad predictiva y determinar cuál estima mejor el caudal medio semanal en el tramo medio del río Madre Vieja.

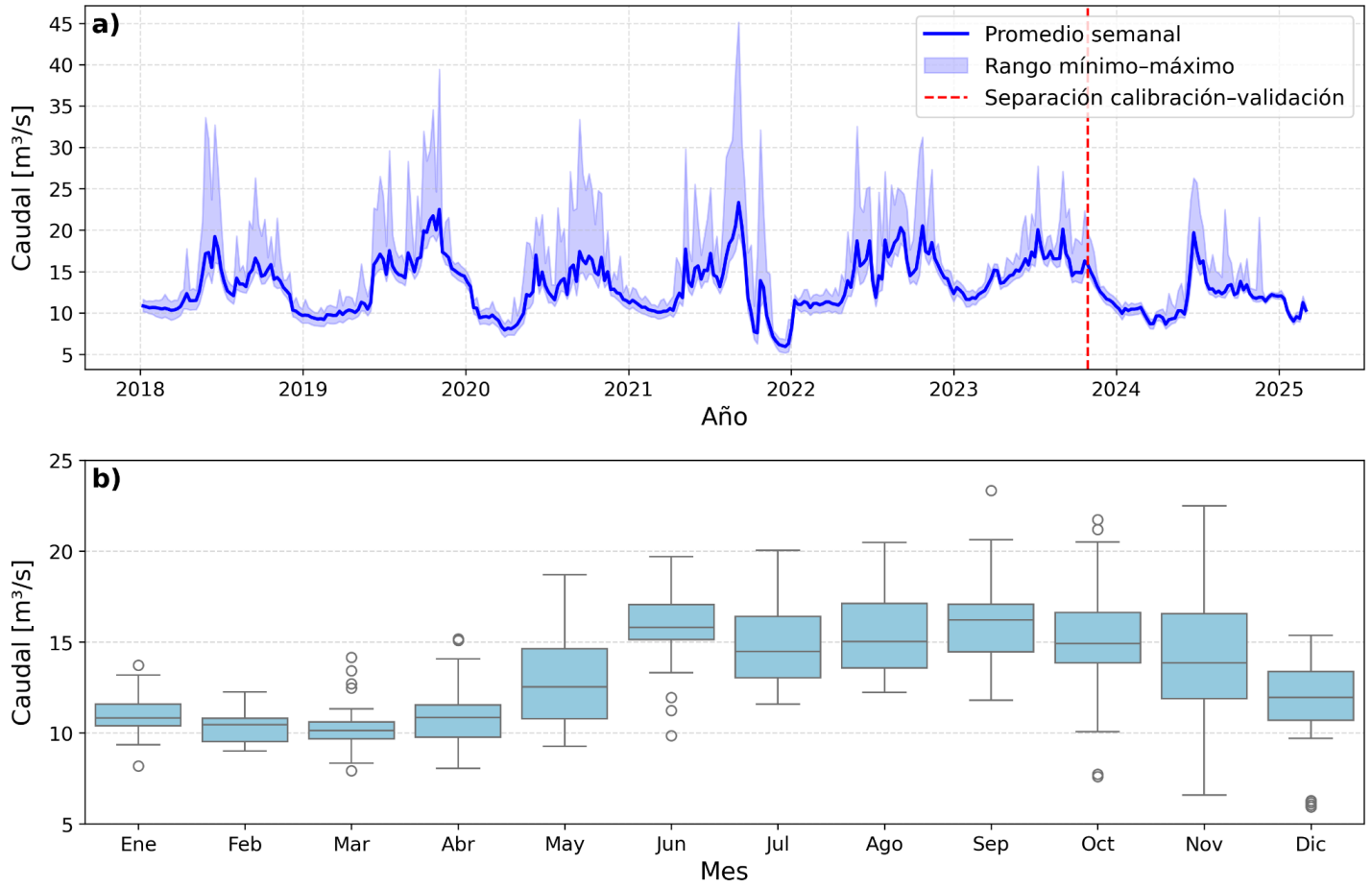


Resultados: descripción general de los caudales

Resumen de 374 semanas

Estadístico	Valor
N.º de semanas	374
Media	13,14
SD	3,16
Mínimo	5,94
Mediana	12,65
Máximo	23,34
Rango	17,40
Asimetría	0,43

Calibración de semana 1 a 304 (81%)
Validación de 305 a 374 (19%)

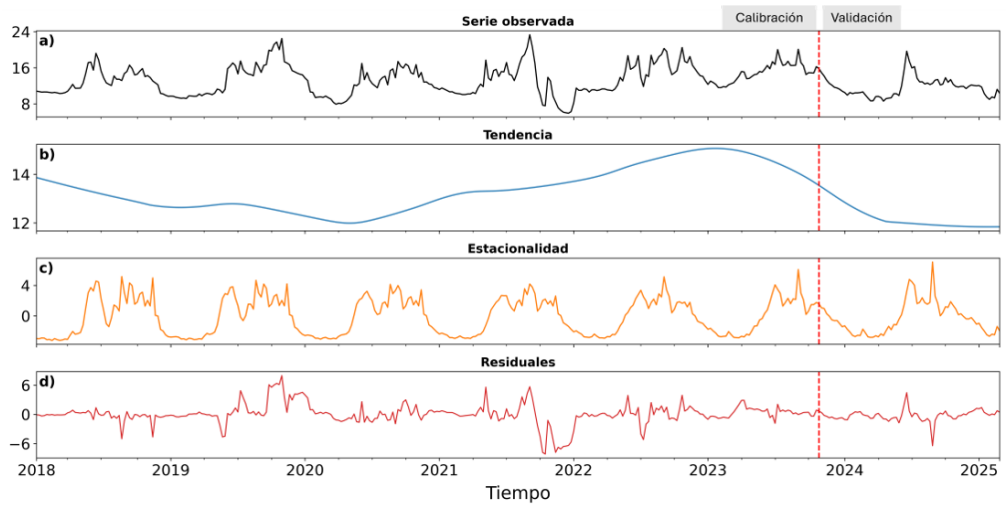


- **Clara estacionalidad**
- **Caudales menores: diciembre–abril; aumento: mayo–octubre.**
- **Medianas más altas en junio y septiembre; noviembre es de transición.**

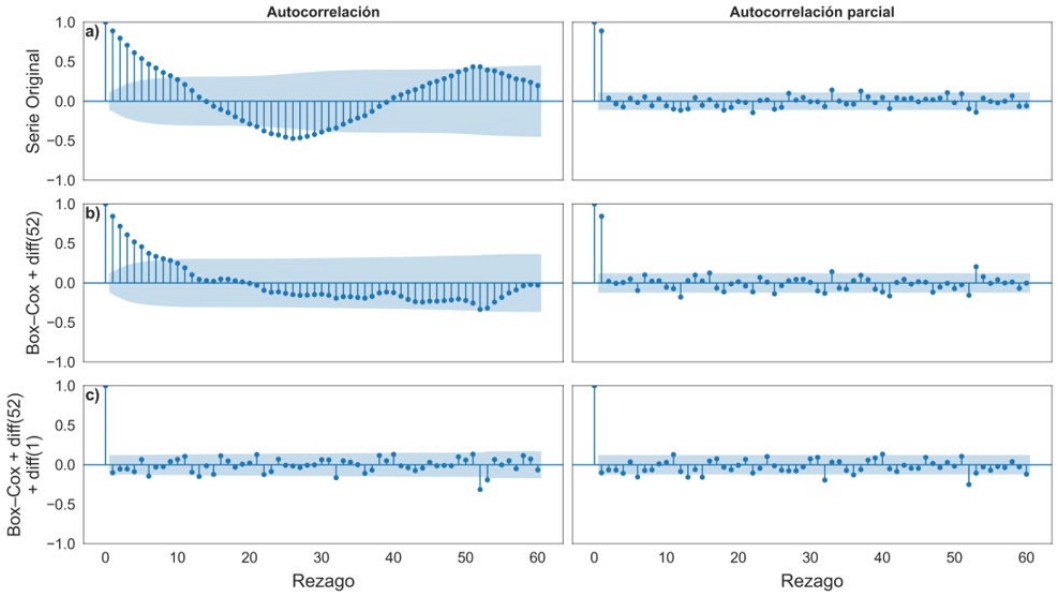
Caudales en m^3/s; asimetría sin m^3/s.

Resultados: preparación de la serie para ARIMA

Serie original: descomposición STL



ACF y PACF: efecto del tratamiento



Antes del ajuste

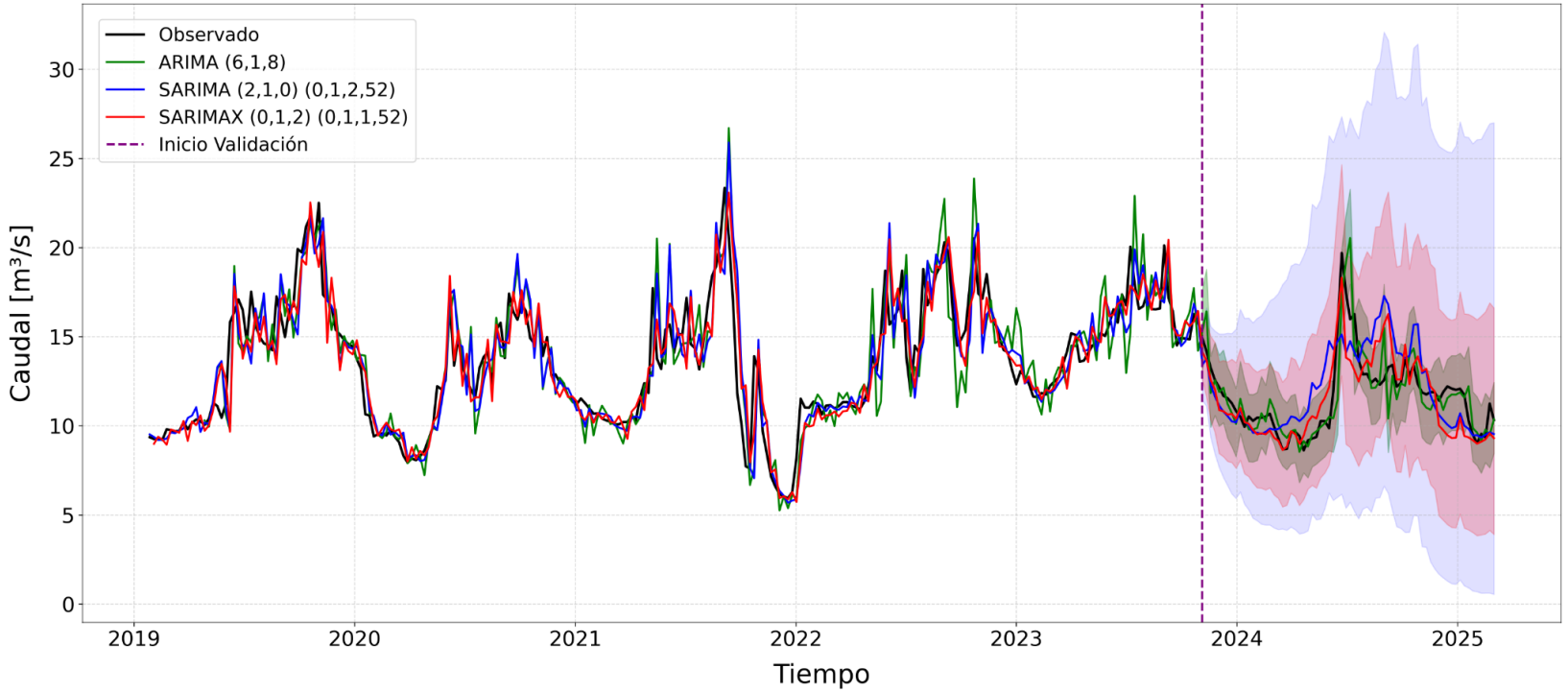
La tendencia variable y la estacionalidad anual requieren tratamiento antes del ajuste. La ACF persistente muestra una fuerte dependencia temporal.

Después del tratamiento

Box–Cox busca estabilizar la varianza. Las diferencias a 52 y 1 semanas reducen la persistencia en ACF/PACF.

Referencia metodológica: Hyndman y Athanasopoulos (2021), Forecasting: Principles and Practice, caps. 9.1 y 9.9.

Resultados: comparación entre modelos

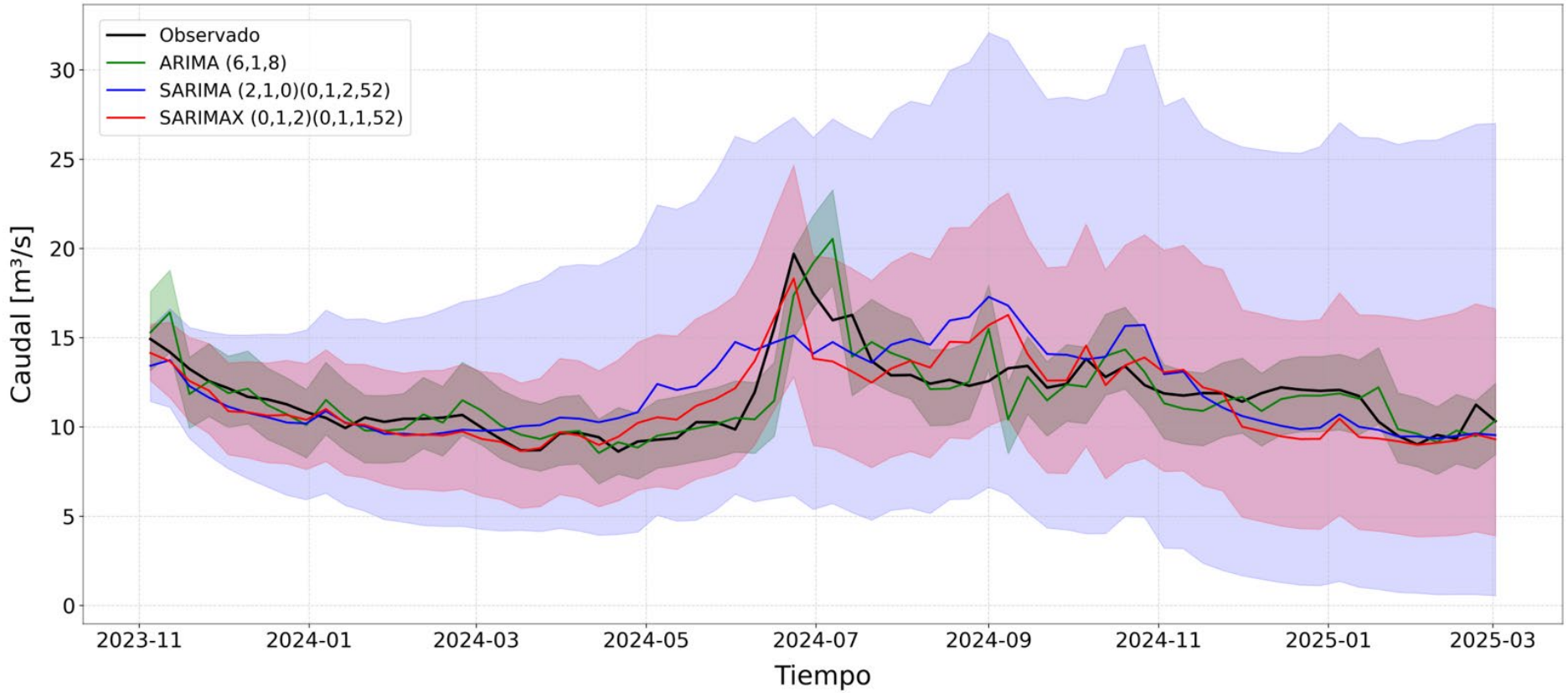


Modelo	RMSE cal. ↓	NSE cal. ↑	RMSE val. ↓	NSE val. ↑
ARIMA (6,1,8)	1,98	0,65	**1,23**	**0,65**
SARIMA $(2,1,0)(0,1,2)_{52}$	1,83	0,70	1,90	0,19
SARIMAX $(0,1,2)(0,1,1)_{52}$	1,51	0,80	1,40	0,55

ARIMA lidera en validación; el mejor SARIMAX logra el mayor ajuste en calibración.

RMSE: m^3/s (menor es mejor); NSE: sin unidad (mayor es mejor).

Resultados: capacidad predictiva en validación



- Dificultad para reproducir los picos de caudal.
- Mejor ajuste al inicio de la época seca.
- SARIMAX, con covariables, aproxima algunos picos mejor que SARIMA.

Bandas de incertidumbre del 75 %

Los modelos con componentes estacionales muestra bändas más amplias y mayor incertidumbren.

Discusión: puntos principales

01 **Estructura temporal de la serie**

La estacionalidad y la autocorrelación respaldan el enfoque ARIMA, tras el preprocesamiento.

02 **Buen ajuste no garantiza buena predicción**

SARIMAX mejora la calibración; ARIMA mantiene mayor consistencia y mejor desempeño en validación.

03 **Aporte de las covariables y viabilidad operativa**

SARIMAX supera a SARIMA, pero requieró hasta ocho series externas y disponibilidad futura de datos.

04 **Respuesta hidrológica y episodios de alta variabilidad**

Los órdenes altos sugieren memoria hidrológica; los picos lluviosos son más difíciles de reproducir que los descensos secos.

05 **Representatividad de los datos y escala temporal**

Los años atípicos y la variabilidad semanal limitan la generalización; la escala mensual merece evaluación.

Conclusiones principales

01 **ARIMA (6,1,8): la alternativa más adecuada en este estudio**

Presenta el mejor desempeño en validación: RMSE = 1,239 m^3/s y NSE = 0,655.

02 **Los modelos representan la dinámica anual del caudal**

Reproducen mejor la época seca; mantienen limitaciones durante la época lluviosa y ante fluctuaciones altas.

03 **La validación determina la capacidad de generalización**

Aunque SARIMA y SARIMAX ajustan mejor en calibración, ARIMA resulta más consistente fuera de muestra.

04 **SARIMA y SARIMAX conservan potencial de aplicación**

Series más extensas y representativas podrían fortalecer su robustez y la representación de episodios variables.

Recomendaciones

01 **Ampliar y consolidar los registros**

Extender las series hidrométricas y meteorológicas y reevaluar los modelos estacionales.

02 **Priorizar ARIMA y explorar ARIMAX**

Evaluar covariables seleccionadas por su relación con el caudal, mediante ARIMAX.

03 **Evaluar pronósticos a cuatro semanas**

Anticipar caudales bajos en época seca y apoyar la toma de decisiones.

04 **Actualizar el modelo de forma continua**

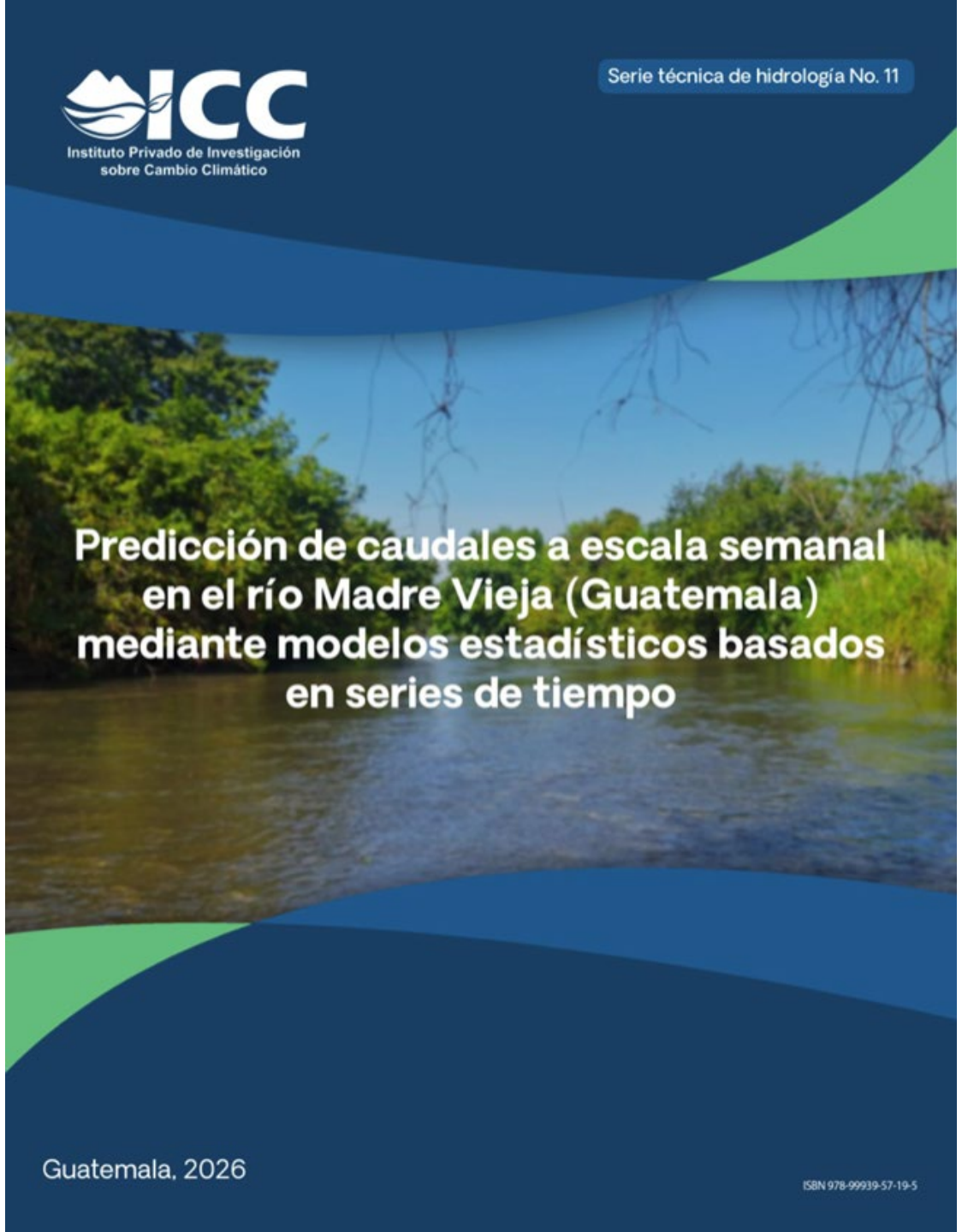
Recalibrar y evaluar con nuevas observaciones mediante rolling forecast origin.

05 **Usar mayor resolución para pronosticar crecidas**

Explorar escalas diarias u horarias, especialmente durante la época lluviosa.

06 **Comparar enfoques complementarios**

Comparar aprendizaje automático para no linealidad y modelos físicos para procesos hidrológicos.



Autor: César Espinosa, Ricardo Marroquín, ICC

Categoria: Series Técnicas

Publicada el: abril 16, 2026

Organizado por:

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales

SGCCC
Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático

Alianza Intersectorial Marino Costera GT
#UnidosXNuestrosOcéanos

DEFENSORES DE LA NATURALEZA

Galileo UNIVERSIDAD

ICC
Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático

FUNDAECO

Gobierno Municipal Puerto Barrios

MAR FUND

UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

VI CNCC
Plataforma Impulsora Local Izabal

Con el apoyo de:

CATIE
Solutions for Inclusive Green Development
Soluciones para el Desarrollo Verde Inclusivo

DEFENSORES
DE LA NATURALEZA

FUNDAECO

France
FFEM
FONDS
FRANÇAIS POUR
L'ENVIRONNEMENT
MONDIAL

ICC
Instituto Privado de Investigación
sobre Cambio Climático

Gobierno
Municipal
Puerto Barrios

MAR
FUND

UICN

WWF

¡Muchas gracias!

Cesar Espinosa
Investigador en hidrogeología del ICC
inv.hidrogeología@icc.org.gt

VI CONGRESO NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO
& IX SIMPOSIO NACIONAL MARINO COSTERO

Con el aval de:

2021 2030 Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible