

Ribagua

Revista Iberoamericana del Agua

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/trib20>

Evaluación de un sistema operativo de pronósticos hidrológicos por ensambles para la gestión del sistema eléctrico en Uruguay

Alejandra De Vera, Guillermo Flieller, Ruben Chaer & Rafael Terra

To cite this article: Alejandra De Vera, Guillermo Flieller, Ruben Chaer & Rafael Terra (2022) Evaluación de un sistema operativo de pronósticos hidrológicos por ensambles para la gestión del sistema eléctrico en Uruguay, Ribagua, 9:1, 10-24, DOI: [10.1080/23863781.2023.2213843](https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2213843)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2213843>



© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 22 May 2023.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Evaluación de un sistema operativo de pronósticos hidrológicos por ensambles para la gestión del sistema eléctrico en Uruguay

Alejandra De Vera^a, Guillermo Flieller^b, Ruben Chaer^b and Rafael Terra^a

^aFacultad de Ingeniería (UdelaR), Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) Montevideo, Uruguay; ^bGerencia Técnica y Despacho Nacional de Cargas, Administración del Mercado Eléctrico (ADME), Uruguay

RESUMEN

Se presenta la evaluación de un sistema operativo de pronósticos hidrológicos por ensambles acoplado con la simulación del sistema eléctrico de Uruguay, que permite optimizar la operación del sistema y definir el despacho energético. En primer lugar, se presenta la evaluación del pronóstico por ensambles de precipitación a 15 días del modelo GEFS (NCEP-NOAA) en la cuenca del río Negro, tomando como referencia una estimación en base a la combinación de imágenes satelitales y observaciones en superficie. Luego, se evalúa el desempeño de los pronósticos de caudales diarios de aporte a las centrales hidroeléctricas, obtenidos con el modelo hidrológico GR4J forzado por los ensambles del GEFS, en comparación con las series 'teóricas' de aportes. En general se observa que, tanto para la precipitación como para los caudales, los pronósticos capturan satisfactoriamente el comportamiento de las series observadas. En ambos casos se identifica una tendencia en el error de la media del ensamble a la sobreestimación (sesgos positivos). Durante los primeros días el ensamble tiene una dispersión excesivamente baja; luego, a medida que avanza el horizonte de pronóstico el ensamble tiende a estar mejor distribuido. Este resultado es aún más notorio en el caso de los caudales.

Evaluation of an operational hydrological ensemble prediction system for the management of the electric system in Uruguay

ABSTRACT

We present the evaluation of an operational hydrological ensemble prediction system coupled with an electric system modeling for Uruguay used for management, optimization and dispatch. First, the 15-day ensemble precipitation forecast from the Global Ensemble Forecast System (GEFS, NCEP-NOAA) is evaluated over the Rio Negro basin against an estimation that combines satellite retrievals with rain gauge data. Next, forecasts of the daily inflows to the hydroelectric reservoirs - obtained with the GR4J hydrological model forced by the GEFS ensembles- are compared to the 'theoretical' inflows derived from a reservoir mass budget. Results suggests that, for both precipitation and hydrological inflows, the ensemble forecasts achieve a good representation of the observed series. In both cases, the ensemble mean shows a tendency for overestimation (positive biases). During the first days the ensemble has an excessively low dispersion. Then, as the forecast lead time advances, the ensemble tends to be better distributed. This behavior is even more pronounced for the hydrological inflows.

ARTICLE HISTORY

Received 1 September 2022
Revised 3 May 2023
Accepted 9 May 2023

PALABRAS CLAVE

Modelación hidrológica;
pronóstico por ensambles;
modelo operacional;
generación hidroeléctrica;
simulación del sistema
eléctrico

KEYWORDS

Hydrological modeling;
ensemble forecasting;
operational modeling;
hydropower generation;
electric system modeling

1. Introducción

La creciente incorporación de energías renovables en Uruguay (hidroeléctrica, eólica y solar) ha complejizado la operación y el despacho de energía eléctrica por su alto grado de incertidumbre meteorológica. En la [Figura 1](#) se presenta la participación por fuente en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) durante el año 2021, identificado

particularmente como un año con baja hidráulicidad y un aumento de las exportaciones [1].

La energía hidráulica, además de contribuir significativamente a la generación, es un recurso almacenable. Por esta razón la previsión de disponibilidad de agua en los embalses de las centrales hidroeléctricas es clave para la planificación del SIN, contribuyendo a optimizar el uso

CONTACT Alejandra De Vera  adevera@fing.edu.uy  Facultad de Ingeniería (UdelaR), Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), 11300 Montevideo, Uruguay

© 2023 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. The terms on which this article has been published allow the posting of the Accepted Manuscript in a repository by the author(s) or with their consent.

Fuente	Generación (GWh)	Participación (%)
■ Hidráulica RN	2366	16,8
■ Hidráulica SG	2793	19,8
■ Eólica	4965	35,3
■ Solar	435	3,1
■ Biomasa	1018	7,3
■ Térmica	2401	17,4
■ Importación	55	0,4
TOTAL	14033	100,1
Exportación	2844	
ABASTECIMIENTO DEMANDA NACIONAL	10962	

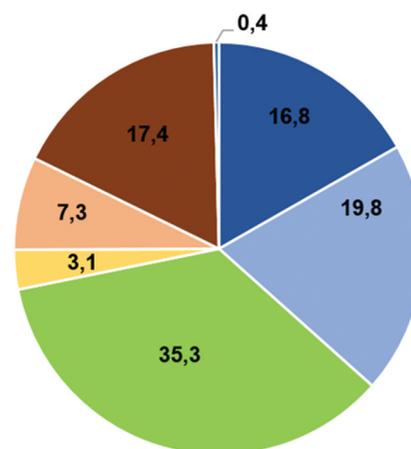


Figura 1. Participación por fuente en la generación total del Sistema Interconectado Nacional (SIN) durante el año 2021 [Fuente: 1].

de cada fuente de energía, con el correspondiente beneficio económico y ambiental. En particular, conocer condiciones de abundancia o escasez hídrica con antelación, permite elaborar ofertas de intercambio con Argentina y Brasil, de gran impacto económico para el país.

Trabajos previos en Uruguay [2,3] se centraron en la incorporación de información climática asociada al fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS) en la simulación de los aportes hidrológicos dentro de los modelos para la gestión del sistema eléctrico, con el propósito de informar la planificación energética estacional (escala temporal de varias semanas a seis meses). En el presente trabajo, en cambio, el foco es en la predicción del tiempo (hasta una o dos semanas) de manera de informar la programación de corto y mediano plazo.

La realización de previsiones hidrológicas operativas requiere la mejor estimación posible tanto de los parámetros del modelo, como del estado del sistema al inicio del pronóstico (variables de estado del modelo) y de los forzantes meteorológicos. A su vez, la experiencia contemporánea en varias regiones del mundo indica que el empleo de predicciones numéricas de precipitación permite la extensión del horizonte de pronóstico con resultados satisfactorios [4,5].

En la actualidad existe cada vez mayor diversidad de herramientas e información disponibles de gran utilidad: (i) datos de redes de monitoreo automáticas y telemétricas; (ii) productos de teledetección remota que brindan estimaciones de variables hidro-meteorológicas con gran resolución espacial y temporal; (iii) predicción de campos meteorológicos, en particular precipitación, en base a modelos numéricos de la atmósfera.

En las últimas dos décadas la mayoría de los centros operacionales de pronóstico ha comenzado a desarrollar

y emplear modelos probabilísticos basados en simulaciones por ensambles [6]. En contraste con los pronósticos determinísticos, la técnica de simulaciones por ensambles [7] busca representar la incertidumbre asociada a la predicción numérica de la atmósfera que surge como consecuencia de su naturaleza caótica [8], y se basa en la realización de múltiples simulaciones de la atmósfera empleando condiciones iniciales ligeramente perturbadas y/o diferentes modelos. Dicha técnica permite obtener una reducción del error en los pronósticos, a la vez que brinda información sobre la incertidumbre a lo largo del horizonte de la previsión. Este valor agregado en la información, impacta directamente sobre los productos o herramientas que se pueden desarrollar y que asisten al proceso de toma de decisión de los diferentes usuarios del pronóstico [9].

En el sector hidroeléctrico y de gestión de embalses, el empleo del enfoque probabilístico o por ensambles se remonta a la década de 1950 y desde entonces ha estado en continuo desarrollo y aplicación. En sus inicios se aplicó a las escalas estacionales en Estados Unidos [10] y Francia [11]. Recién en las últimas dos décadas las predicciones numéricas de campos meteorológicos de alta resolución y los sistemas de pronósticos por ensambles comenzaron a aplicarse conjuntamente en la previsión hidrometeorológica [11]. Por ejemplo, desde el 2010, la compañía francesa de electricidad (EDF) brinda pronósticos diarios de caudales a corto y largo plazo para 130 cuencas a partir de las predicciones meteorológicas de Météo-France y del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) (<https://hepex.irstea.fr/operational-use-of-ensemble-hydrometeorological-forecasts-at-edf-french-producer-of-energy/>). En nuestra región, una compañía brasilera de energía eléctrica

(CEMIG) recientemente implementó el pronóstico de caudales por ensambles basado en predicciones meteorológicas de múltiples fuentes y modelos hidrológicos semi-distribuidos a gran escala [12,13]. Por otro lado, en la cuenca del río Uruguay, la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG) dispone de un modelo de gestión implementado en FEWS [14] que incluye la previsión de los caudales de aporte al embalse mediante el modelo SAC SMA acoplado al modelo de tránsito Muskingum y un modelo hidrodinámico unidimensional HEC-RAS (https://oss.deltares.nl/web/delft-fews/-/salto_grande). En 15 se presenta una extensa revisión de la evolución de los sistemas de pronósticos hidrológicos por ensambles para generación hidroeléctrica.

En este contexto, desde hace algunos años la Administración del Mercado Eléctrico (ADME) y la Facultad de Ingeniería se encuentran trabajando en el desarrollo de un modelo hidrológico para la simulación de los caudales de aporte a las centrales hidroeléctricas del río Negro, el cual se encuentra operativo desde el año 2019. La generación de los pronósticos de caudales consta de dos pasos: (i) la estimación de la precipitación ocurrida sobre la cuenca del río Negro en base a la combinación de imágenes satelitales y observaciones pluviométricas en superficie; (ii) la ejecución de un modelo hidrológico de manera de obtener un ensamble de pronósticos de caudales de aporte a las centrales hidroeléctricas a partir de un ensamble de predicciones numéricas de precipitación. Como resultado, se obtiene un conjunto de pronósticos a catorce días de los caudales de aporte a las centrales hidroeléctricas del río Negro que ADME incorpora diariamente a la programación de mediano y corto plazo, para luego optimizar la operación del sistema y definir el despacho energético por fuente, los costos de operación y lineamientos para potenciales intercambios.

En este trabajo, en primer lugar, se presenta la metodología desarrollada para la generación y acople del ensamble de pronósticos de aportes hidrológicos a las centrales del río Negro, y su asimilación operativa en las herramientas de operación conjuntamente con los pronósticos de viento y radiación solar. Luego, se presenta la evaluación de la calidad de los pronósticos desde la puesta en operación del modelo: (i) ensambles de precipitación del modelo GEFS del NCEP-NOAA, empleados como forzantes del modelo hidrológico; y (ii) ensambles de caudal, obtenidos con el modelo actualmente en funcionamiento a partir de los ensambles del GEFS.

Los detalles sobre la descripción del modelo hidrológico y el acople en el simulador del sistema eléctrico se encuentran publicados en 16, 17, y 18.

2. Área de estudio

La cuenca del río Negro, cuenca transfronteriza con Brasil, ocupa aproximadamente una superficie de 62.850 km², existiendo sobre su cauce principal tres presas hidroeléctricas: Gabriel Terra (en adelante G. Terra), Baygorria y Constitución, localizadas consecutivamente desde aguas arriba hacia aguas abajo.

El sistema conformado por las tres presas hidroeléctricas del río Negro constituye, a la fecha, aproximadamente el 20% de la energía eléctrica total generada en el país [1]. Complementariamente, sobre el río Uruguay se localiza la central hidroeléctrica binacional (Argentina-Uruguay) de Salto Grande.

En la Figura 2 se presenta la localización de las cuatro centrales (con su respectiva potencia instalada), la delimitación de la cuenca de aporte a la central Constitución y su discretización en subcuencas para la modelación hidrológica (ver sección 4.1), incluyendo una tabla con el área (km²), la pendiente media (%), el tiempo de concentración (hr) y el agua disponible (AD) media (mm) de cada subcuenca (identificada según un ID). En la Tabla 1 se resumen las principales características de las centrales hidroeléctricas.

El aumento de la demanda de agua como consecuencia de nuevos escenarios de producción agrícola y forestal dentro de la cuenca y el aumento de la demanda de energía eléctrica que se viene registrando en los últimos años, ponen de manifiesto la necesidad de generar herramientas para gestionar adecuadamente los recursos hídricos en la cuenca del río Negro [19].

3. Información Disponible

3.1. Precipitación

3.1.1. Datos históricos

Los datos históricos de referencia empleados para evaluar el ensamble de pronósticos de precipitación son las estimaciones en base a la combinación de imágenes satelitales y observaciones pluviométricas en superficie desarrolladas por 17. Las mismas se encuentran disponibles desde febrero de 2017 a la fecha (se actualizan diariamente), con un paso temporal diario y una grilla espacial de 0,1° x 0,1°.

Dicha metodología, denominada Regression Kriging (RK), se basa en el uso de modelos de Kriging Universal [20,21] que permiten la incorporación de información grilla de alta resolución espacial (estimaciones satelitales) y la calibración de la misma en base a información puntual de referencia (estaciones pluviométricas). Para ello, considera 19 estaciones pluviométricas y dos productos satelitales GSMaP (JAXA, Japón) y GPM IMERG (NASA, EEUU).

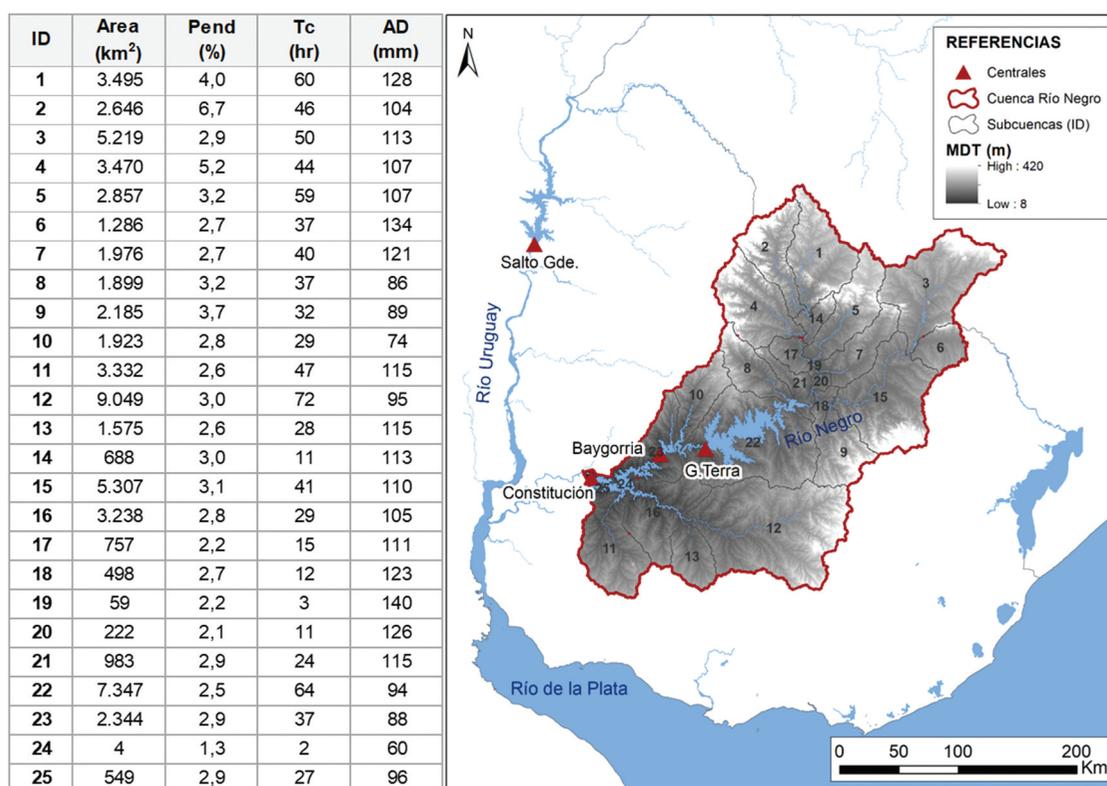


Figura 2. Localización de las centrales hidroeléctricas (triángulos rojos) y delimitación de la cuenca de aporte a la central Constitución.

Tabla 1. Principales características de las centrales hidroeléctricas existentes en Uruguay.

Central	Coordenadas UTM 21S (km)	Potencia instalada (MW)	Volumen máximo embalsado (Hm ³)	Cuenca de aporte (km ²)
Gabriel Terra	(554, 6367)	152	8.800	39.500
Baygorria	(518, 6363)	108	570	4.100 (incremental)
Constitución	(458, 6343)	333	2.854	19.200 (incremental)
Salto Grande	(411, 6540)	945	5.000	244.000

Como resultado se obtiene la precipitación diaria media areal en 25 subcuencas del río Negro consideradas en la modelación hidrológica (ver sección 4.1). Los acumulados diarios se calculan a las 10 UTC por ser la hora de registro en las estaciones pluviométricas.

La estimación RK en la cuenca del río Negro se actualiza diariamente y se emplea para estimar el estado de la cuenca al inicio del pronóstico [17].

3.1.2. Datos de pronóstico

El modelo hidrológico actualmente operativo en ADME es alimentado por el ensamble de predicciones numéricas de precipitación a dieciséis días (384 horas) del modelo GEFS (Global Ensemble Forecast System) del NCEP-NOAA, compuesto por la corrida de control más 20 miembros perturbados, con un paso temporal de 6 hrs y una grilla espacial de 1,0° x 1,0° [22,23]. El mismo se encuentra disponible en <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-ensemble-forecast>. Desde el año 2005 (versión V6.0 en adelante), el ciclo de asimilación

y pronóstico del GEFS se repite cada 6 horas, a las 00UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTC. En la última versión V12.0, disponible desde fines de octubre de 2020, se incrementó el tamaño del ensamble, pasando de 20 a 30 miembros perturbados.

3.2. Caudal

Para la evaluación de los ensambles de pronósticos de caudal, como referencia, se dispuso de las series diarias de caudales de aporte teóricos a los embalses de G. Terra, Baygorria y Constitución brindadas por la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas de Uruguay (UTE). En la Figura 3 se presenta la serie diaria de los caudales de aporte teóricos a la cuenca del río Negro con cierre en la central Constitución, obtenida como la suma de los caudales incrementales en las tres centrales.

Dichas series se denominan ‘teóricas’ ya que consisten en una estimación en base a un balance hídrico en el

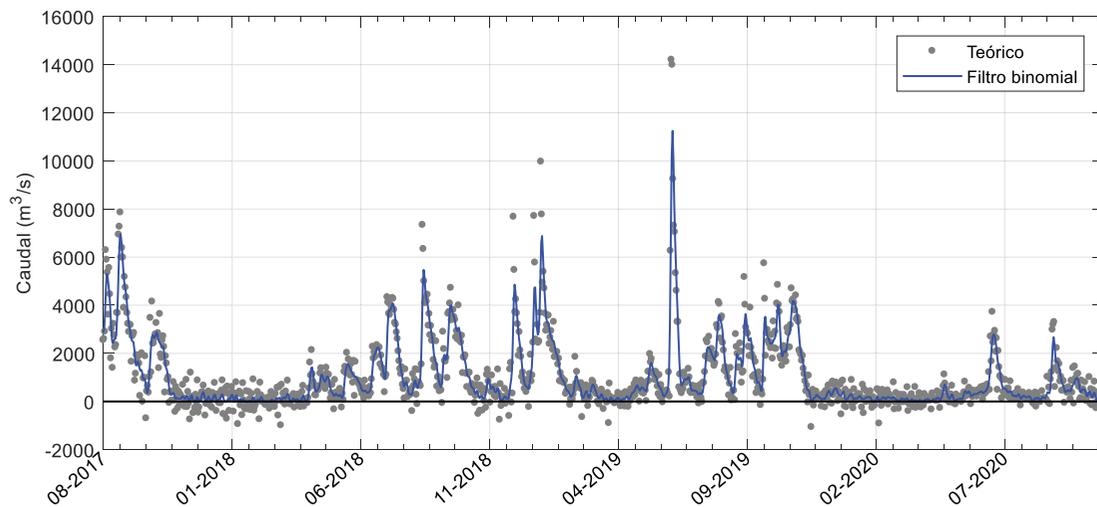


Figura 3. Serie diaria de caudales de aporte teóricos a la cuenca del río Negro con cierre en la central Constitución (puntos grises: serie teórica, línea azul: serie filtrada).

embalse y no a una observación directa. Específicamente, los caudales de aporte teóricos se obtienen (de forma indirecta) a partir de la medida de la variación de la cota del lago, los caudales turbinados y los caudales vertidos, siendo esta estimación sensible al modelado del lago (curvas para el área y volumen del embalse en función de la cota), al efecto del viento en la superficie del mismo y a la propia estimación de los caudales erogados.

Como se observa en la [Figura 3](#), durante el periodo analizado se tienen valores diarios de caudal negativos (del orden del 20% de la longitud de la serie), los cuales pueden deberse al efecto de compensación de valores de caudal excesivos propios de la metodología de estimación (posiblemente asociado a la acción del viento en el embalse). Este tipo de error en la estimación diaria se anula al considerar promedios de varios días (series 'filtradas') y no afecta a los volúmenes acumulados. En este sentido, para la evaluación se consideran las series diarias filtradas mediante un filtro binomial con una ventana centrada de 7 días (representada en trazo continuo azul en la [Figura 3](#)).

3.3. Otros datos

Los siguientes datos son empleados para la modelación hidrológica:

- Ciclo medio anual de evapotranspiración potencial diaria (ETP): construido a partir de datos diarios históricos registrados en el período 1991–2015 en nueve estaciones del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay (INIA) y del

Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) mediante el método de Penman-Monteith. Se ha mostrado en el pasado que el ciclo medio anual de ETP es suficiente para alimentar modelos hidrológicos [24].

- Capacidad de almacenamiento de agua de los suelos presentes en la cuenca: el agua potencialmente disponible (AD) de los suelos se obtuvo a partir del mapa de suelos CONEAT a escala 1:40.000 [25] de la Dirección General de Recursos Naturales (DGRN, MGAP) de Uruguay. En base a esto, se pondera por el área para obtener un valor representativo del suelo en cada subcuenca.
- Se empleó el modelo digital del terreno (MDT) de la NASA SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) con una resolución de 90x90m (disponible en <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>) para la delimitación de las subcuencas y su caracterización geomorfológica.

4. Modelación Hidrológica

4.1. Descripción del esquema de modelación

Para generar los caudales de aporte a las centrales hidroeléctricas se emplea, en cada subcuenca, un modelo simple de paso diario denominado GR4J [26] acoplado con el método de Muskingum para el tránsito de los hidrogramas resultantes.

El modelo GR4J es un modelo del tipo concentrado, de cuatro parámetros (presentados en la [Tabla 2](#)), basado en la cuantificación de la humedad del suelo. El mismo utiliza como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial. En este caso, al ser alimentado por un conjunto de pronósticos de

Tabla 2. Parámetros del modelo ‘GR4J+Muskingum’ y valor adoptado en cada caso (AD: Agua Disponible, L: Longitud de cada tramo del curso principal, Lm: Longitud media de los tramos del curso principal).

Parámetro	Modelo	Descripción del parámetro	Valor
x_1	GR4J	Capacidad del reservorio de producción	AD mm
x_2	GR4J	Coefficiente de intercambio con el agua subterránea	0 mm
x_3	GR4J	Capacidad del reservorio de tránsito (no lineal)	42,4 mm
x_4	GR4J	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	2,4 días
X	Muskingum	Factor de ponderación	0,20
K	Muskingum	Tiempo de tránsito de una onda de creciente	2*L/Lm (días)

precipitación, se obtiene igual número de previsiones para los caudales.

La cuenca de aporte a la presa de Constitución (62.850 km²) se discretizó en 25 subcuencas de área menor a 9.000 km² (según se presenta en la Figura 2), en base al modelo digital del terreno de la NASA SRTM con una resolución de 90x90m. El modelo GR4J se implementa en cada una de estas subcuencas, a partir de los datos diarios de precipitación y evapotranspiración potencial disponibles. La precipitación media areal en cada subcuenca se obtiene a partir del método de los polígonos de Thiessen.

Una vez obtenidos los caudales diarios de aporte de cada subcuenca, los mismos se transitan a lo largo del cauce hasta los puntos de interés aguas abajo, mediante el método de Muskingum, método para el tránsito hidrológico en ríos que requiere de dos parámetros (presentados en la Tabla 2).

En el caso de las centrales Baygorria y Constitución se trabajó con las cuencas incrementales (ver Figura 2) y se calculó el ‘aporte propio,’ con lo cual no fue necesario transitar los caudales erogados (vertido y turbinado) por la central aguas arriba.

Para obtener un buen desempeño del modelo hidrológico es necesario ajustar los parámetros, de forma que el modelo represente lo mejor posible los caudales históricos observados. Los parámetros del modelo GR4J se ajustaron siguiendo las recomendaciones publicadas por 27,y 28, en donde presentan la aplicación y regionalización del modelo GR4J en cuencas de Uruguay. El parámetro x_1 (que representa la capacidad de almacenamiento del suelo) no se considera como un parámetro de calibración, sino que se le asigna el valor del agua disponible media de los suelos presentes en cada subcuenca. El parámetro X (adimensional) del método de Muskingum en corrientes naturales se encuentra entre 0 y 0,3 con un valor medio cercano a 0,2. Dado que los resultados del método son poco sensibles al valor de este parámetro [29], su valor no fue calibrado y se fijó en 0,2. El parámetro K (expresado en unidades de tiempo) fue ajustado, inspirados en el método de Muskingum-Cunge, en base a las características físicas de los cauces (longitud, ancho, pendiente media, rugosidad de Manning) y los caudales

circulantes. En la Tabla 2 se presentan los valores adoptados para cada parámetro.

4.2. Acople al simulador del sistema eléctrico

La modelación del sistema eléctrico se realiza mediante la plataforma de Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica ‘SimSEE’ [31], disponible en <https://simsee.org/>. La misma permite simular la operación óptima del sistema incorporando distintos tipos de pronósticos, tales como generación de energías renovables, demanda eléctrica, precios futuros de tecnologías y combustibles, intercambios internacionales y otros. Es extensamente utilizada en Uruguay [3,32] para simular la operación del sistema energético tanto en el largo plazo (planificación de inversiones) como en el corto plazo (operación del sistema y simulación del mercado).

La operación óptima del sistema consiste en disponer de una política de operación, es decir una valorización de los recursos almacenables del sistema, de forma tal de poder evaluar en todo momento la conveniencia o no de usar cada recurso. El recurso almacenable de mayor importancia en este caso es al agua en las represas hidroeléctricas, en particular en la represa G. Terra por ser la que tiene mayor capacidad de regulación.

La obtención de dicha política de operación se logra a través de una etapa de optimización con el objetivo de minimizar el valor esperado del costo total del sistema en el horizonte de tiempo de estudio (costo futuro, CF) para todas las realizaciones posibles de las variables aleatorias que intervienen (entre las que se encuentran los aportes hidráulicos de las represas). El SimSEE minimiza el valor esperado del CF mediante el procedimiento de ‘Programación Dinámica Estocástica.’

Para simular las distintas realizaciones de las variables aleatorias es necesario tener un proceso estocástico que genere series que describan apropiadamente la incertidumbre asociada a cada variable mediante sorteos sucesivos. Para ello se emplea el modelo CEGH: Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma [33]. Asimismo, de dicho generador estocástico es posible obtener series sintéticas de las variables para ser

utilizadas en la etapa de simulación, para calcular costos esperados y su dispersión.

El ensamble de pronósticos de caudal se incorpora dentro del sintetizador de aportes hidráulicos a través de los sesgos y una serie de atenuadores por paso de tiempo, ajustados por máxima verosimilitud, de forma tal que la salida replique el pronóstico en valor esperado y a su vez presente la misma dispersión que el ensamble [18].

4.3. Implementación operativa

La implementación operativa del acople de las herramientas de modelación hidrológica y simulación del sistema eléctrico comprende cinco pasos, los cuales se describen a continuación y se resumen en la Figura 4 [adaptado de 17].

- **Descarga de datos y acumulación diaria.** Se descargan y procesan los datos de entrada de precipitación: registros de estaciones en tiempo cuasi-real, estimaciones satelitales GSMaP-NRT y IMERG-NRT TARDE RUN y el ensamble de pronósticos del GEFS. Los totales diarios se acumulan a las 10UTC.
- **Control de calidad de datos.** Previo al algoritmo de combinación, se realiza el control de calidad de la información descargada tanto de las observaciones pluviométricas en superficie como de las estimaciones satelitales, en base a la herramienta 'Climate Data Tools' (CDT-IRI, [30]). Dicho control se centra en la identificación de valores anómalos ('outliers') e incluye la implementación de testeos espaciales según 34. Los valores de los umbrales utilizados en los controles fueron ajustados de forma manual, buscando eliminar los

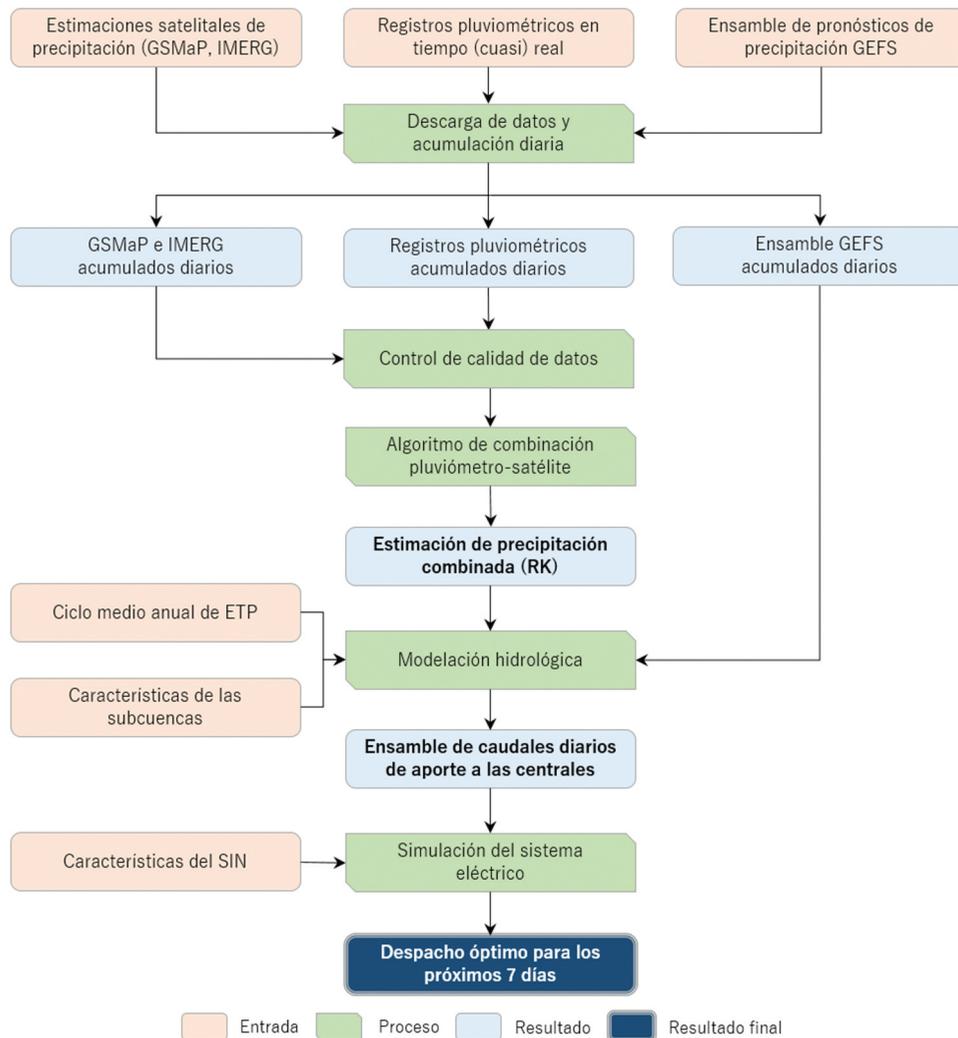


Figura 4. Diagrama de flujo de la implementación operativa del modelo hidrológico acoplado al simulador del sistema eléctrico [adaptado de 17].

valores sospechosos más evidentes en el conjunto de datos históricos disponible.

- **Algoritmo de combinación.** Se implementa el algoritmo de combinación de imágenes satelitales y observaciones pluviométricas en superficie para obtener la estimación de precipitación RK sobre la cuenca de río Negro.
- **Modelación hidrológica.** En base a la estimación RK y el pronóstico por ensambles de precipitación GEFS, se implementa el modelo GR4J en las 25 subcuencas de la cuenca de aporte a la central Constitución. La escorrentía obtenida en cada subcuenca se transita a lo largo de la red de drenaje utilizando el modelo de Muskingum para simular los ensambles de caudales diarios de aporte a las centrales hidroeléctricas del río Negro.
- **Simulación del sistema eléctrico.** El ensamble de pronósticos de caudales es integrado al modelo existente del SIN, particularmente al sintetizador CEGH de la sala de simulación de la programación semanal del SimSEE-VATES, que optimiza la operación del sistema y define el despacho energético por fuente, los costos de operación y lineamientos para potenciales intercambios.

El modelo desarrollado se encuentra integrado al SimSEE desde el 2019 y desde entonces se ha ejecutado bajo la responsabilidad de ADME (cabe destacar que el algoritmo de combinación de imágenes satelitales y observaciones pluviométricas se encuentra operativo desde junio de 2020). La aplicación (llamada VATES) está continuamente actualizando y ejecutando una sala SimSEE con la representación del sistema de generación uruguayo (integrando la información del estado del SIN y los pronósticos de eólica, solar, hidráulica y la demanda) para generar las distribuciones de las variables de interés de las siguientes 168 horas (7 días) de la operación óptima del SIN. Los resultados y la información relevantes para la operación se publican automáticamente en el sitio web de ADME: <https://adme.com.uy/>. También proporcionan la información estadística necesaria para la realización de ofertas de intercambio con otros países, permitiendo especificar el volumen y el precio con niveles de confianza con días de antelación.

5. Evaluación de los pronósticos por ensambles

La metodología seguida para la evaluación de la calidad de pronósticos por ensambles de precipitación y caudal

se basa en una combinación de indicadores de desempeño y gráficos de diagnóstico, de manera de abarcar diferentes aspectos de la calidad del pronóstico, en este caso el sesgo, la precisión, la habilidad y la confiabilidad [35–38].

En particular, se incluye: (1) la inspección visual de las series temporales por ciclo de pronóstico, (2) la caracterización del error del ensamble a lo largo del horizonte de pronóstico, (3) la caracterización de la dispersión del ensamble a lo largo del horizonte de pronóstico (calculada como la desviación estándar de los miembros del ensamble), (4) la evaluación conjunta de la evolución del error y la dispersión del ensamble ('spread-skill evaluation'), (5) la construcción de los histogramas de análisis de rangos (Diagramas de Talagrand) a lo largo del horizonte de pronóstico, (6) el análisis (paramétrico) de la distribución del error del ensamble según intervalos de precipitación/caudal observado a lo largo del horizonte de pronóstico, (7) la evaluación de los indicadores PBIAS (porcentaje de sesgo) y NSE (coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe) a lo largo del horizonte de pronóstico para la media del ensamble de caudales.

5.1. Precipitación

En primer lugar, se evaluó la calidad del pronóstico de precipitación por ensambles a 15 días del modelo GEFS en la cuenca del río Negro, tomando como referencia la estimación (RK) en base a la combinación de imágenes satelitales y observaciones en superficie.

Para la evaluación se empleó la versión V11 del GEFS [22], compuesta por la corrida de control más 20 miembros perturbados, y se consideró únicamente la simulación iniciada a las 00UTC (por ser la que utiliza ADME en las salas de programación para el despacho semanal). El periodo analizado comprende agosto de 2017 a octubre de 2020, por lo que se dispone de 1150 ciclos de pronóstico. Se consideró un paso temporal diario (acumulado de las últimas 24 horas a las 10UTC).

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos para la cuenca de aporte del río Negro con cierre en Constitución (cuenca RN).

En la [Figura 5](#) se presenta un gráfico de caja (boxplot) con la evolución del error de la media del ensamble (calculado como la distancia entre la media y la estimación RK) a lo largo del horizonte de pronóstico. Se incluyen los percentiles 25, 50, 75 (cajas) y 5 y 95 (bigotes) en los ciclos de pronóstico. Adicionalmente, se superpone la dispersión del ensamble (calculada como

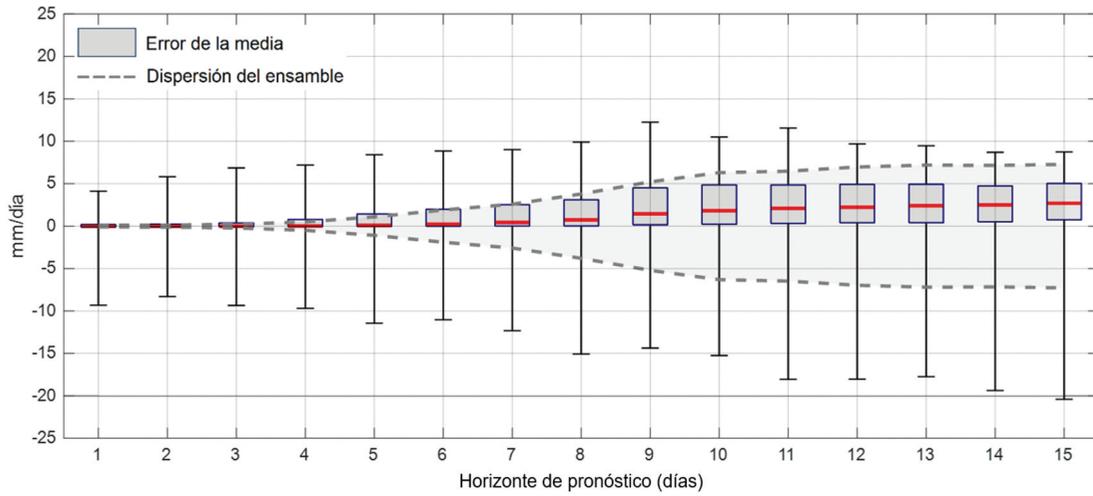


Figura 5. Evolución del error de la media (boxplot) y de la dispersión (línea punteada) del ensamble de precipitación a lo largo del horizonte de pronóstico para la cuenca RN. Se incluyen los percentiles 25, 50, 75 (cajas) y 5 y 95 (bigotes).

la desviación estándar de los miembros del ensamble). La línea punteada representa \pm la mediana de la dispersión del ensamble para los 1150 ciclos analizados.

Se observa que, como era de esperar, a medida que se avanza en el horizonte de pronóstico, aumenta la dispersión de los miembros del ensamble y el error de su media, es decir que disminuye la predictibilidad del sistema. A partir de los 11 días tanto el error como la dispersión se estabilizan, el error de la media se mantiene ‘cuasi-estable’ en 2–3 mm y la dispersión del ensamble tiende a un valor de 7 mm. Se observa también una asimetría en la distribución del error de la media del ensamble, mientras que la tendencia central de los errores es hacia valores positivos (el pronóstico es mayor que la observación), la distribución tiene asimetría negativa, es decir que los valores extremos negativos (subestimación) son, en valor absoluto, notoriamente mayores que los positivos (sobreestimación). Esta asimetría aumenta con el horizonte de pronóstico.

El histograma de análisis de rangos o Diagrama de Talagrand es un tipo de histograma en el cual las frecuencias mostradas por las barras representan el porcentaje de veces que la observación o el análisis (el dato empleado para la verificación) cae en los rangos o las clases definidas por los miembros del pronóstico por ensambles. La primera clase representa el rango hasta el miembro del conjunto de la clase más baja, mientras que la última clase representa el rango por encima del miembro del conjunto en la clase más alta. Esto significa que hay $n + 1$ clases en el diagrama donde n es el número de miembros del ensamble (en este caso, $n = 20$).

La forma del diagrama, nos permite extraer conclusiones sobre los sesgos del sistema de pronóstico y el alcance de su dispersión. Adicionalmente, puede

incluirse en el diagrama la curva (línea horizontal) que representa la frecuencia teórica en cada categoría para un sistema de pronóstico por ensamble perfectamente confiable. Esta frecuencia es $1/(n + 1)$. Esto supone que, si el sistema de pronóstico está bien construido, en una muestra grande cada miembro tiene la misma probabilidad de verificarse, es decir, que el esquema de generación crea un rango de miembros igualmente válidos.

Cabe destacar que un histograma de rango ‘plano’ no necesariamente indica que el pronóstico tenga habilidad. Sólo mide si la distribución de probabilidad observada está bien representada por el ensamble.

En base al histograma de análisis de rangos se define un indicador ‘dif_max’ (no paramétrico) que cuantifica la desviación con la horizontalidad, en particular representa la máxima diferencia entre las frecuencias acumuladas:

$$\text{dif_max} = \max_{1 \leq k \leq n+1} \left[\text{abs} \left(\sum_k f_{obs}^k - k \cdot \frac{1}{n+1} \right) \right]$$

donde f_{obs}^k es la frecuencia de las observaciones en el intervalo k , es decir, el porcentaje de veces que la observación cae en dicho rango.

En el panel superior de la [Figura 6](#) se presenta la evolución del indicador dif_max a lo largo del horizonte de pronóstico. En los paneles inferiores se presentan los histogramas de rangos para el primer y último día de pronóstico, así como para el horizonte en que el indicador es mínimo (en este caso: día 8).

Se observa que en los primeros días es cuando mayor es el indicador dif_max, es decir más se aleja la forma del diagrama de la horizontalidad, mientras que el mínimo se da a los 8 días. Durante los primeros días

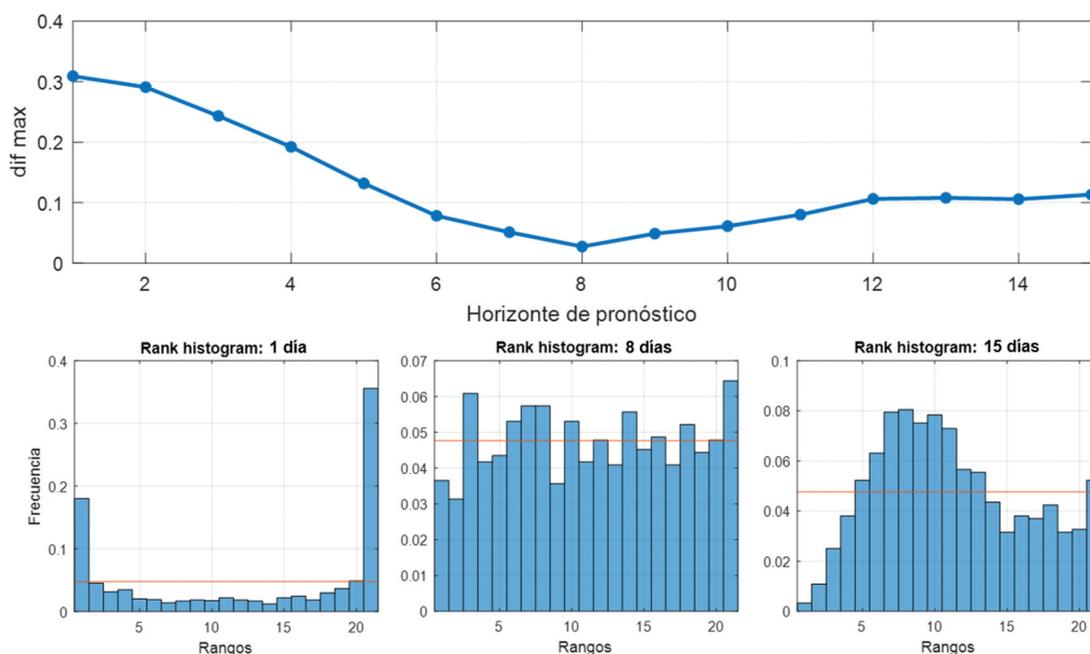


Figura 6. Evolución del indicador *dif_max* a lo largo del horizonte de pronóstico (panel superior) e histogramas de análisis de rangos para los días 1, 8 y 15 (paneles inferiores) para la precipitación en la cuenca RN.

del pronóstico (panel inferior izquierdo) el diagrama tiene ‘forma de U’ por lo que el ensamble tiene una dispersión excesivamente baja, la observación está demasiado a menudo fuera del rango del ensamble (en el primer y último rango). En los días intermedios (panel inferior central) el ensamble está bien distribuido, pero con cierto sesgo negativo. Hacia el final del horizonte de pronóstico (panel inferior derecho) el ensamble tiene dispersión alta y con cierto sesgo negativo, la frecuencia del primer rango es prácticamente nula y en el 5% de los ciclos la observación es mayor a los miembros del ensamble.

5.2. Caudal

Una vez evaluado el pronóstico de precipitación por ensambles del modelo GEFS en la cuenca del río Negro, se procedió a la evaluación del desempeño de los ensambles de pronósticos de caudales de aporte a las centrales hidroeléctricas obtenidos a partir del modelo hidrológico alimentado por los pronósticos del GEFS, tomando como referencia los caudales teóricos de UTE.

En general no se observaron grandes variaciones espaciales en el desempeño del pronóstico por ensambles en la cuenca del río Negro, siendo los resultados obtenidos muy similares para las tres centrales. A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos para la central Constitución (cuenca RN). Cabe destacar que el ‘caudal total’ en la cuenca RN se

obtiene como la suma de los caudales incrementales en las tres centrales.

A modo ilustrativo, en la [Figura 7](#) se presentan algunos ejemplos de los pronósticos emitidos para la precipitación media en la cuenca (panel superior) y los correspondientes caudales de aporte (panel inferior). En el panel superior, el gráfico de barras en azul representa la evolución de la precipitación observada (estimación RK), las líneas continuas grises representan la evolución de cada uno de los miembros del ensamble del GEFS y en trazo gris discontinuo se muestra la evolución de la media del ensamble.

En el panel inferior, la línea azul representa la evolución de los caudales teóricos (en trazo grueso se incluye también la serie filtrada), en trazo gris continuo se presenta la evolución de cada uno de los miembros del ensamble y, en trazo gris discontinuo, la evolución de la media del ensamble. En rojo se incluye la evolución del caudal modelado en base a la estimación RK hasta el día del inicio de la simulación del ciclo de pronóstico en cuestión.

En general se observa que, tanto para la precipitación como para el caudal de aporte, las series simuladas capturan satisfactoriamente el comportamiento de las series observadas. En el caso de los pronósticos de caudales, el ensamble presenta muy baja dispersión (prácticamente nula) durante los primeros días del horizonte de pronóstico.

En el panel inferior de la [Figura 7](#) (ciclo de pronóstico del 16/06/2019) se evidencia la falta de asimilación de

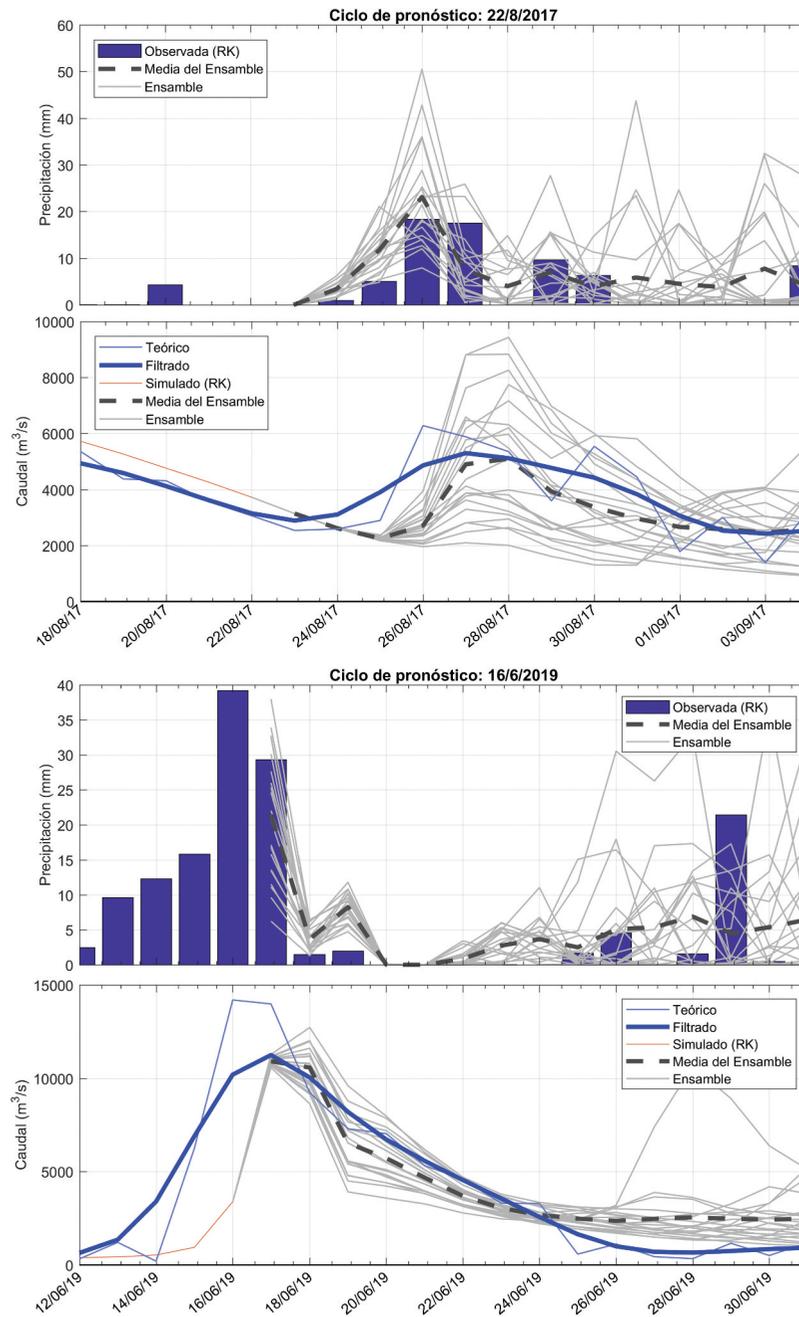


Figura 7. Ejemplos de pronósticos para los ciclos inicializados el 22/08/2017 (paneles superiores) y el 16/06/2019 (paneles inferiores) para la cuenca RN.

datos de caudal observados en la versión actual del modelo, con un error inicial del orden de -70% del caudal teórico.

En la **Figura 8** se presenta un gráfico de caja (boxplot) con la evolución del error de la media del ensemble (calculado como la distancia entre la media y el valor teórico filtrado) a lo largo del horizonte de pronóstico. Se incluyen los percentiles 25, 50, 75 (cajas) y 5 y 95 (bigotes) en los ciclos de pronóstico. Adicionalmente, se superpone la dispersión del ensemble (calculada como la desviación estándar de los miembros del ensemble).

La línea punteada representa \pm la mediana de la dispersión del ensemble para los 1150 ciclos analizados.

Nuevamente se observa que a medida que se avanza en el horizonte de pronóstico, aumenta la dispersión de los miembros del ensemble y el error de su media, es decir que disminuye la predictibilidad del sistema. En este caso, dicha tendencia creciente no alcanza a estabilizarse, como sí se observaba para la precipitación. Se identifica un sesgo positivo en el error de la media (el pronóstico es mayor que la observación), heredado de la precipitación, a la vez que se atenúa la

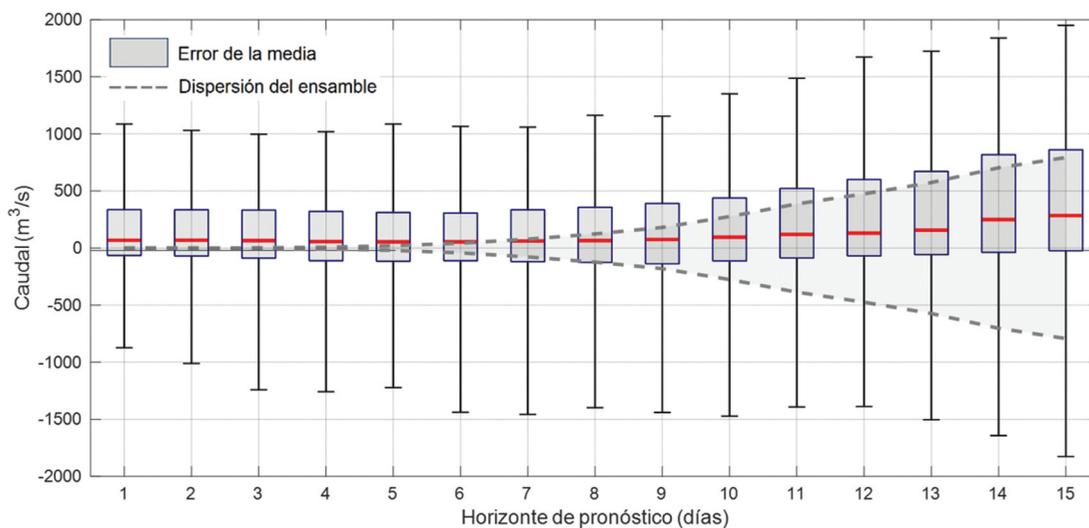


Figura 8. Evolución del error de la media (boxplot) y de la dispersión (línea punteada) del ensamble de caudales a lo largo del horizonte de pronóstico para la cuenca RN. Se incluyen los percentiles 25, 50, 75 (cajas) y 5 y 95 (bigotes).

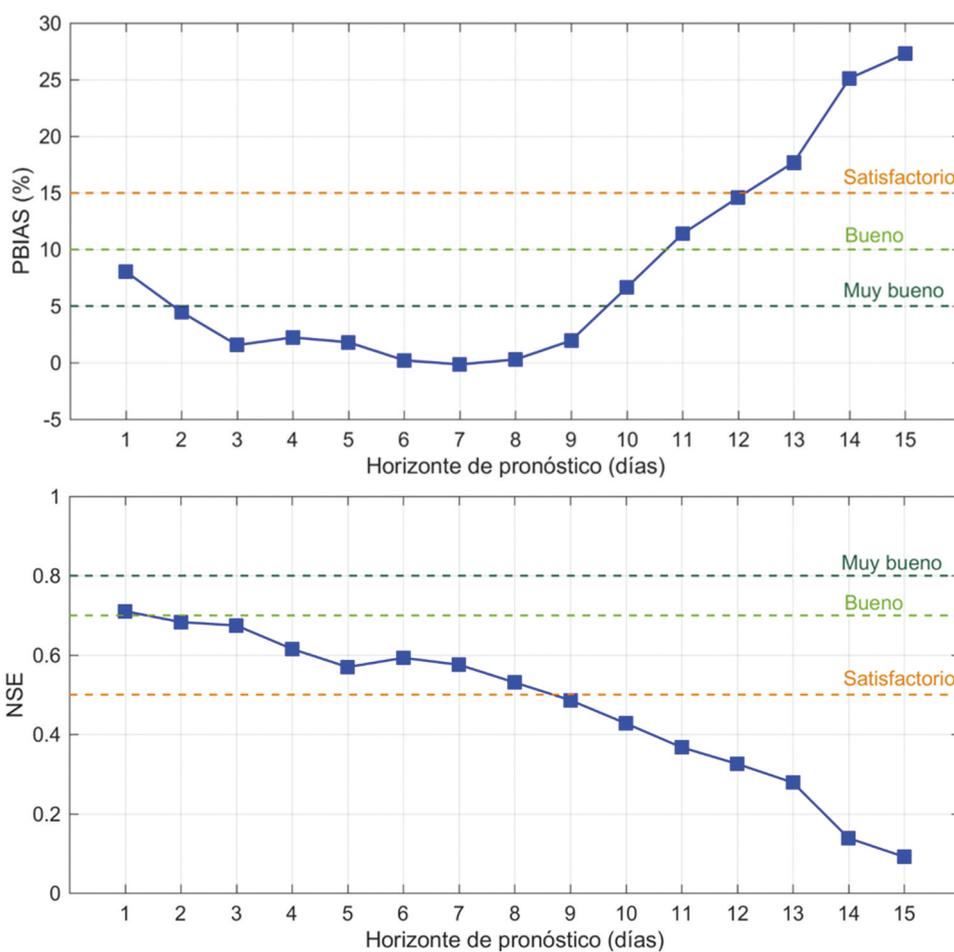


Figura 9. Evolución a lo largo del horizonte de pronóstico de los indicadores PBIAS y NSE para la media del ensamble de caudales en la cuenca RN.

asimetría en la distribución del error (ver [Figura 5](#)). Durante los primeros horizontes de pronóstico (1 a 5 días), se destaca que la dispersión del ensamble es menor que el error de su media (la dispersión es prácticamente nula).

Finalmente, en la [Figura 9](#) se presenta la evolución a lo largo del horizonte de pronóstico de los indicadores PBIAS y NSE para la media del ensamble de caudales. A modo de referencia, se incluyen las calificaciones generales para dichos estadísticos reportadas por [39](#). En lo que refiere al PBIAS, se observa un sesgo a la sobreestimación ($PBIAS > 0$). Durante los primeros 10 días de pronóstico se tiene un desempeño muy bueno ($PBIAS < \pm 5\%$) y entre bueno y satisfactorio hasta el día 12 ($PBIAS < \pm 15\%$). En particular, se destaca que el valor del indicador para el primer día de pronóstico no es el mínimo obtenido ('óptimo') a lo largo del horizonte de pronóstico, lo cual evidencia la necesidad de la asimilación de los caudales observados para mejorar la condición inicial.

En el caso del NSE, se alcanza un desempeño entre bueno y satisfactorio durante los primeros 9 días ($NSE > 0,50$).

6. Síntesis y conclusiones

Como producto del trabajo conjunto entre ADME y la Facultad de Ingeniería, se tiene una herramienta operativa de modelación hidrológica de la cuenca del río Negro acoplada con la simulación del sistema eléctrico del país, que permite optimizar la operación del sistema y definir el despacho energético por fuente, los costos de operación y lineamientos para potenciales intercambios. Hasta la fecha, ADME ha tenido una percepción favorable de los resultados obtenidos con el modelo desarrollado, siendo considerada como la fuente de pronóstico por defecto de las salas de programación para el despacho semanal de la programación de mediano plazo.

El impacto cuantitativo de la incorporación de los pronósticos hidrológicos a la operación del sistema está pendiente, pues requiere de plazos prolongados de evaluación que integren sobre un conjunto representativo de situaciones hidrológicas y energéticas.

La metodología propuesta estima la precipitación ocurrida sobre la cuenca del río Negro mediante la combinación de imágenes satelitales y observaciones pluviométricas en superficie en base al uso de modelos de Kriging Universal. Luego, para generar el ensamble de pronósticos de caudales, se alimenta el modelo hidrológico GR4J de paso diario (combinado con el modelo Muskingum de tránsito hidrológico) con un conjunto de pronósticos de precipitación (GEFS del NCEP-NOAA). El ensamble obtenido se incorpora al

sinetizador de aportes del modelo de simulación del sistema eléctrico (SimSEE) a través de los sesgos y una serie de atenuadores por paso de tiempo, ajustados por máxima verosimilitud. Los resultados y la información relevantes para la operación del sistema se publican en el sitio web de ADME: <https://adme.com.uy/>.

En este artículo se presenta la evaluación de la calidad de los pronósticos por ensambles de precipitación y caudal basada en una combinación de indicadores de desempeño y gráficos de diagnóstico, de manera de abarcar diferentes aspectos de la calidad del pronóstico, en este caso el sesgo, la precisión, la habilidad y la confiabilidad.

La evaluación se aplicó a los pronósticos por ensambles de precipitación del modelo GEFS (versión V11) del NCEP-NOAA en la cuenca del río Negro, tomando como referencia la estimación en base a la combinación de imágenes satelitales y observaciones pluviométricas en superficie. El periodo analizado comprende agosto de 2017 a octubre de 2020. Se consideró un paso temporal diario (acumulado de las últimas 24 hrs a las 10UTC). Posteriormente, se evaluó el desempeño de los ensambles de pronósticos de caudales diarios de aporte a las centrales hidroeléctricas obtenidos a partir del modelo hidrológico alimentado por los pronósticos del GEFS, tomando como referencia los caudales teóricos de UTE. Debido a las limitaciones identificadas en las series teóricas brindadas por UTE, para la evaluación se consideraron las series teóricas diarias filtradas mediante un filtro binomial con una ventana centrada de 7 días. De los resultados obtenidos se concluye que, tanto para la precipitación como para los caudales, las series simuladas capturan satisfactoriamente el comportamiento de las series observadas.

Como era de esperar, a medida que se avanza en el horizonte de pronóstico, aumenta el error y la dispersión de los miembros del ensamble, disminuyendo la predictibilidad del sistema. En ambos casos se identificó una tendencia en el error de la media del ensamble hacia valores positivos, es decir, una tendencia a la sobreestimación (sesgos positivos). Durante los primeros días del horizonte de pronóstico el ensamble tiene una dispersión excesivamente baja, la observación está demasiado a menudo fuera del rango del ensamble. Luego, a medida que avanza el horizonte de pronóstico el ensamble tiende a estar mejor distribuido. Este resultado es aún más notorio en el caso de los caudales, en el cual la dispersión del ensamble es prácticamente nula hasta el día 5 de pronóstico.

Finalmente, entre las líneas de interés a desarrollar en el futuro se destacan:

- Incorporación de la asimilación de datos de caudal observados al modelo hidrológico actualmente en funcionamiento, ya que se identificaron ciclos de pronóstico en los que el error inicial alcanza hasta el 70–80% del caudal teórico.
- Identificación de comportamientos bimodales (o multi-modales) en la distribución de precipitación de los miembros del ensamble y propuesta de una metodología de ponderación de los miembros condicionada a la bimodalidad.
- Desarrollo y evaluación de una metodología de ‘time-lagged ensembles’ [40]. Esta técnica se basa en la generación de ensambles a partir de múltiples pronósticos inicializados en diferentes momentos, pero todos verificados al mismo tiempo (combinación de pronósticos más antiguos y más nuevos), asignando diferentes pesos a los miembros en función de su ‘edad.’ La ventaja es que permite aprovechar la información presente en simulaciones-observaciones pasadas, a la vez que incorpora la última inicialización disponible.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por un convenio con la Administración del Mercado Eléctrico (ADME), que además brindó los datos necesarios para su ejecución.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

ORCID

Alejandra De Vera  <http://orcid.org/0000-0002-5321-9669>

References

- [1] ADME (2022). Informe Anual 2021. Administración del Mercado Eléctrico, Uruguay. [https://www.adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_526/Informe_Anuar_2021.pdf](https://www.adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_526/Informe_Anuar_Anuar_2021.pdf)
- [2] Maciel F, Terra R, Díaz A . Incorporación de información climática en la simulación de aportes a represas en un modelo del sistema eléctrico. In: IAHR , editor. Memorias del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José: Costa Rica; 2012. 978-9968-933-06-3.
- [3] Maciel F, Terra R, Chaer R. Economic impact of considering El Nino-Southern Oscillation on the representation of streamflow in an electric system simulator. *Int J Climatol*. 2015;35:4094–4102.
- [4] Cuo L, Pagano T, Wang Q. A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short -to medium- range streamflow forecasting. *J Hydrometeorol*. 2011;12(p.):713–728.
- [5] Troin M, Arsenault R, Wood AW, et al. Generating ensemble streamflow forecasts: a review of methods and approaches over the past 40 years. *Water Resour Res*. 2021;57:e2020WR028392.
- [6] Buizza R, Du J, Toth Z, et al. Major Operational Ensemble Prediction Systems (EPS) and the Future of EPS. In: Duan Q, Pappenberger F, Wood A, et al., editors. Handbook of hydrometeorological ensemble forecasting. Heidelberg: Springer, Berlin; 2019. p. 151–193. DOI:10.1007/978-3-642-39925-1_14
- [7] Epstein ES. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*. 1969;21:739–759.
- [8] Lorenz EN. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*. 1963;Vol. 20:130–141. DOI:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2
- [9] Kalnay E. Atmospheric modelling, data assimilation and predictability. New York: Cambridge University Press; 2003. DOI:10.1017/CBO9780511802270.
- [10] Day G. Extended streamflow forecasting using NWSRFS. *J Water Resour Plan Manag*. 1985;111(2):157–170.
- [11] Desaint B, Nogues P, Perret C, et al. La prévision hydrométéorologique opérationnelle: l’expérience d’Electricité de France. *La Houille Blanche*. 2009;95(5):39–46.
- [12] Fan FM, Paiva RCD, Collischonn W. Chapter 2: hydrological forecasting practices in Brazil. In: Adams TE, Pagano TC III, editors. Flood forecasting – a global perspective. Academic Press; 2016. p. 433. DOI:10.1016/B978-0-12-801884-2.00002-5
- [13] Schwanenberg D, Fan FM, Naumann S, et al. Short-term reservoir optimization for flood mitigation under meteorological and hydrological forecast uncertainty. Application to the Três Marias Reservoir in Brazil. *Water Resour Manag*. 2015;29(5):1635–1651.
- [14] Alvarado-Montero R, Talsma J, Zamanillo E, et al. Implementación y evaluación de pronósticos hidrológicos probabilísticos para Salto Grande. In: XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires Argentina: IAHR; 2018. 978-987-45194-7-4. https://www.ina.gov.ar/congreso_hidraulica/?seccion=6
- [15] Boucher MA, Ramos MH. Ensemble streamflow forecasts for hydropower systems. In: Duan Q, Pappenberger F, Thielen J, et al., editors. Handbook of hydrometeorological ensemble forecasting. Heidelberg: Springer, Berlin; 2018. p. 1289–1306. DOI:10.1007/978-3-642-40457-3_54-1
- [16] De Vera A, Flieller G, Crisci M, et al. (2020). Integración de ensambles de pronósticos hidrológicos a las herramientas de operación del sistema eléctrico en Uruguay. *ENERLAC*, IV(1), 96–117. Available online: <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/122/147>
- [17] De Vera A, Alfaro P, Terra R. Operational implementation of satellite-rain gauge data merging for hydrological modeling. *Water*. 2021;13:533.
- [18] Flieller G, Chaer R (2020). Introduction of ensemble based forecasts to the electricity dispatch simulator

- SimSEE. In *Proceedings of the IEEE Power & Energy Society T&D-Latin America*, Montevideo, Uruguay. DOI:10.1109/TDLA47668.2020.9326141
- [19] Crisci M, Terra R. Valorization of irrigation water in a basin with large hydropower production through coupled hydrological and electric system modelling. *Water Resour Manage.* 2014;28:605–623.
- [20] Chilès JP, Delfiner P. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Second. 2009. John Wiley & Sons, Inc; 2012.
- [21] Hengl T. *A practical guide to geostatistical mapping*. 2nd ed. University of Amsterdam; 2009.
- [22] Zhou X, Zhu Y, Hou D, et al. Performance of the new NCEP global ensemble forecast system in a parallel experiment. *Weather Forecasting.* 2017;32(5):1989–2004.
- [23] Zhou X, Zhu Y, Hou D, et al. (2022). The development of the NCEP global ensemble forecast system version 12, *weather and forecasting* (published online ahead of print 2022). DOI:10.1175/WAF-D-21-0112.1
- [24] Oudin L, Moulin L, Bendjoudi H, et al. Estimating potential evapotranspiration without continuous daily data: possible errors and impact on water balance simulations. *Hydrol Sci J.* 2010;55(2):209–222.
- [25] Molfino JH. Estimación de Agua Disponible en los grupos CONEAT. In: División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Uruguay: Montevideo; 2009. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bits/tream/item/4925/1/Molfino-J.H.-2009.-Estimacion-del-agua...pdf>
- [26] Perrin C, Michel C, Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J Hydrol.* 2003;279(1):275–289.
- [27] Narbondo S, Crisci M, Chreties C. Modelación hidrológica diaria en cuencas con diferentes características de Uruguay. In: XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Buenos Aires Argentina: IAHR; 2018. 978-987-45194-7-4. https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/?seccion=6
- [28] Narbondo S, Gorgoglione A, Crisci M, et al. Enhancing physical similarity approach to predict runoff in ungauged watersheds in sub-tropical regions. *Water.* 2020;12(2):528.
- [29] Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1994). “*Hidrología Aplicada*”. McGraw-Hill.
- [30] Climate Data Tools (CDT-IRI). <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/tools/cdt/>.
- [31] Chaer R (2008). Simulación de sistemas de energía eléctrica. Tesis de maestría en Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República. Uruguay. <http://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2008/Cha08/Cha08.pdf>
- [32] Terra R, Baethgen WE. Lessons learned in 25 years of informing sectoral decisions with probabilistic climate forecasts. In: Robertson AW, Vitart F, editors. *Sub-seasonal to seasonal prediction: the gap between weather and climate forecasting*. Elsevier: Amsterdam; 2019. p. 439–453.
- [33] Chaer R (2005). Modelo de series correlacionadas CEGH. http://iie.fing.edu.uy/simsee/curso2010/Cap9_sintetizadorCEGH.pdf
- [34] Scherrer SC, Frei C, Croci-Maspoli M, et al. Operational quality control of daily precipitation using spatio-climatological plausibility testing. *Meteorologische Zeitschrift.* 2011;20(4): 397–407. DOI:10.1127/0941-2948/2011/0236.
- [35] Anctil F, Ramos MH. verification metrics for hydrological ensemble forecasts. In: Duan Q, Pappenberger F, Wood A, et al., editors. *Handbook of hydrometeorological ensemble forecasting*. Springer: Berlin, Heidelberg; 2019. p. 893–922. DOI:10.1007/978-3-642-39925-1_3
- [36] Bradley AA, Demargne J, Franz KJ. Attributes of Forecast Quality. In: Duan Q, Pappenberger F, Wood A, et al., editors. *Handbook of hydrometeorological ensemble forecasting*. Heidelberg: Springer, Berlin; 2019. p. 849–892. DOI:10.1007/978-3-642-39925-1_2
- [37] Huang Z, Zhao T. Predictive performance of ensemble hydroclimatic forecasts: verification metrics, diagnostic plots and forecast attributes. *Wiley Interdiscip Rev.* 2022;e1580. DOI:10.1002/wat2.1580
- [38] Murphy AH. What is a good forecast – an essay on the nature of goodness in weather forecasting. *Weather Forecast.* 1993;8:281–293.
- [39] Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, et al. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Trans ASABE.* 2015;58(6):1763–1785.
- [40] Hoffman RN, Kalnay E. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus.* 1983;35A:100–118.