



enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

Generación
de energía
en PTAR

Pronóstico
energía eólica
en Uruguay

Simulación
sistema
fotovoltaico
en Haití

Operación
óptima de
baterías

Transición
sistemas de
energía eléctrica

Pronósticos
hidrológicos y
el sistema eléctrico

Modelo numérico
de la combustión de
tronco cilíndrico



© Copyright Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) 2019. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)

ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y
Fernández Salvador.
Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>

Página web OLADE: www.olade.org

Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995



COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco
SECRETARIO EJECUTIVO DE OLADE

Pablo Garcés
ASESOR TÉCNICO DE OLADE

Marcelo Vega
COORDINADOR DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DE LA
ASOCIACIÓN DE UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO
(AUGM)

COMITÉ AD-HONOREM

Andrés Romero C.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Leonardo Beltrán.
Institute of the Americas. México.

Manlio Coviello.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Mauricio Medinaceli.
Investigador independiente. Bolivia.

Ubiratan Francisco Castellano.
Investigador independiente. Brasil.

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Blanca Guanocunga. Bibliotecaria OLADE

COLABORADORES

Raquel Atiaja. *Técnica de Área Informática OLADE*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación*

REVISORES

Santiago Garrido. *Universidad Nacional de Quilmes. Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología. Argentina.*

Emilia Ruggeri. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET – IESCT). Universidad Nacional de Quilmes. Argentina.*

Diego Coronel Bejarano. *Universidad Nacional de Asunción. Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos (GISE - FPUNA). Paraguay.*

Luciana Clementi. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.*

José Javier Alonso Mateos. *Universidad Internacional de Valencia. España.*

Oscar Oviedo. *Universidad Nacional de Córdoba (UNC - INFIQC). Argentina.*

Alfredo Caguao Yagua. *Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM). Venezuela.*

Byron Chilingua Mazón. *Consultor independiente. Ecuador.*

Reynaldo Payano Almanzar. *Investigador independiente. Chile.*

Iván López. *Universidad de la República (UdelaR) - FING-IMFIA. Uruguay.*

Cristhian Carrasco Villanueva. *Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Bolivia.*

Ojilve Ramón Medrano Pérez. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT). Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad (CCGS). México.*

Diseño de la portada y contraportada Ana María Arroyo y Francisco Pérez.

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.

INTEGRACIÓN DE ENSAMBLES DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS A LAS HERRAMIENTAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN URUGUAY

Alejandra de Vera ¹, Guillermo Flieller ², Magdalena Crisci ³, Ruben Chaer ⁴, Rafael Terra ⁵

Recibido: 12/02/2020 y Aceptado: 19/5/2020

ENERLAC. Volumen IV. Número 1. Junio, 2020 (96-117).



1 Ingeniera Civil perfil Hidráulico-Ambiental y Magíster en Ingeniería en Mecánica de los Fluidos Aplicada por la Universidad de la República (FING-UdelaR), Uruguay. Actualmente estudiante de Doctorado y Docente Asistente del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), Uruguay. Además, Investigador nivel Iniciación del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Uruguay.
adevera@fing.edu.uy

2 Ingeniero Electricista perfil Potencia por la Universidad de la República (FING-UdelaR), Uruguay. Actualmente estudiante del Diploma de Especialización en Ingeniería de la Energía (UdelaR, Uruguay) e Ingeniero de la Gerencia Técnica y Despacho Nacional de Cargas en la Administración del Mercado Eléctrico (ADME), Uruguay.
gfieller@adme.com.uy

3 Ingeniera Civil perfil Hidráulico-Ambiental y Magíster en Ingeniería en Mecánica de los Fluidos Aplicada por la Universidad de la República (FING-UdelaR), Uruguay. Actualmente Docente Asistente del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), Uruguay.
mcrisci@fing.edu.uy

4 Ingeniero Eléctrico y Máster en Energía por la Universidad de la República (FING-UdelaR), Uruguay. Actualmente Gerente de Técnica y Despacho Nacional de Cargas de la Administración del Mercado Eléctrico (ADME), Uruguay. Investigador en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería (UdelaR), Uruguay. Senior Member de la IEEE, organización que lo distinguió en 2013 con el “*PES Chapter Outstanding Engineer Award*”.
rchaer@adme.com.uy

5 Ingeniero Civil, Hidráulico-Ambiental por la Universidad de la República (FING-UdelaR), Uruguay. Doctor en Ciencias de la Atmósfera por la Universidad de California de Los Ángeles (UCLA), Estados Unidos. Profesor Titular del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería (UdelaR) y co-coordinador del Centro Interdisciplinario de Respuesta al Cambio y la Variabilidad Climática (EI-UdelaR). Además, Investigador nivel II del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Uruguay.
rterra@fing.edu.uy

RESUMEN

En el marco de la operación del sistema eléctrico uruguayo con énfasis en la generación a partir de recursos naturales renovables, es de relevancia la capacidad de prever con antelación los caudales de aporte para la generación hidráulica. En este trabajo se desarrolla una metodología para la generación y procesado de un ensamble de pronósticos de aportes a la represa de Rincón del Bonete, a partir de un ensamble de pronósticos de precipitación, que permita asimilarlo en las herramientas de operación, conjuntamente con los pronósticos de eólica y solar. Para generar los caudales se emplea el modelo hidrológico GR4J de paso diario combinado con el modelo *Muskingum* de tránsito hidrológico. El ensamble de pronósticos de caudal se incorpora dentro del sintetizador de aportes del modelo de simulación del sistema eléctrico a través de los sesgos y una serie de atenuadores por paso de tiempo, ajustados por máxima verosimilitud. En general, el desempeño del modelo es satisfactorio, con un NSE semanal de 0.50, un coeficiente R^2 de 0.53 y una diferencia de volúmenes acumulados de -15%. De los resultados obtenidos se desprende que, para la implementación operacional del modelo, es crítica la asimilación de datos observados de precipitación y caudal en tiempo real.

Palabras clave: Simulación del Sistema Eléctrico, Modelación Hidrológica, Previsión de Caudales, Ensamble de Pronósticos, Procesos Estocásticos, Uruguay.

ABSTRACT

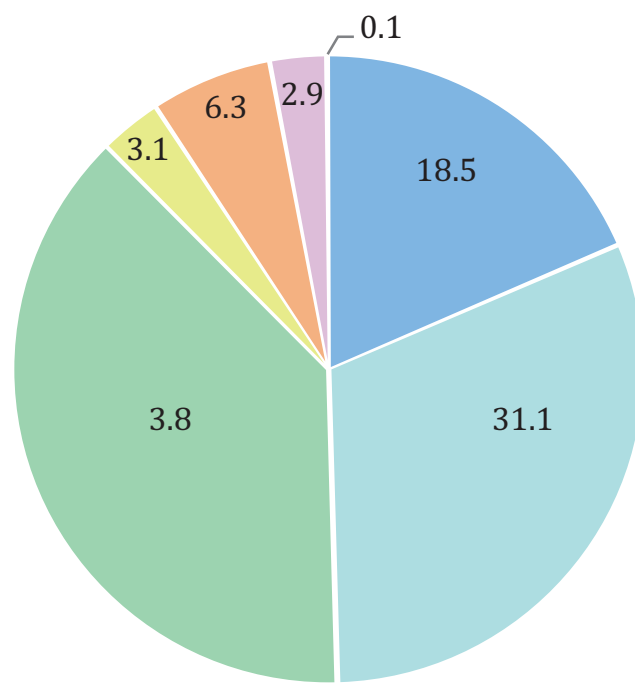
In the context of the operation of the Uruguayan electricity system, which prioritizes the power production from renewable sources, it is crucial to forecast the hydrological inflows for hydroelectric generation. This study describes a methodology for the generation and processing of a hydrological ensemble forecast for the Rincón del Bonete Dam, which allows its assimilation into the electricity-system simulation along with wind and solar power forecasts. The streamflow forecast ensemble is obtained from a precipitation ensemble one. To generate the hydrological inflows, we use the GR4J daily hydrological model coupled with the Muskingum hydrological transit model. The hydrological forecast ensemble is incorporated into the electricity-system-simulator-synthesizer model through biases and noise attenuators per time step, adjusted through maximum likelihood. In general, the model performance is satisfactory, with a NSE for a weekly time step of 0.50, a R^2 coefficient equal to 0.53 and a difference in cumulative volumes equal to -15%. The results indicate that, for the operational implementation of the model, the assimilation of observed precipitation and streamflow data in real-time is critical.

Keywords: Electricity-System Simulation, Hydrological Modelling, Hydrological Forecasting, Ensemble Forecast, Stochastic Processes, Uruguay.

INTRODUCCIÓN

En el marco de la operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), con énfasis en la generación eléctrica a partir de recursos naturales renovables que lleva adelante Uruguay, la generación hidráulica mantiene una participación muy significativa. En particular, durante el año 2018 cubrió aproximadamente el 50% de la generación total (ADME, 2019), tal como se presenta en la figura 1.

Figura 1. Participación por fuente en la generación total del SIN durante el año 2018.



Fuente	Generación (GWh)	Participación (%)
Hidráulica RN	2,289	18.5
Hidráulica SG	3,849	31.1
Eólica	4,708	38.1
Solar	388	3.1
Biomasa	778	6.3
Térmica	361	2.9
Importación	14	0.1
TOTAL	12,386	100
Exportación (Argentina y Brasil)	1,195	
Consumo de generación	47	
ABASTECIMIENTO DEMANDA NACIONAL	11,144	

Fuente: ADME (2019).

Un factor clave para la toma de decisión en la programación de la generación de dicho sistema es la capacidad de prever con antelación los caudales de aporte a los embalses de las represas hidroeléctricas, contribuyendo así a optimizar el uso de cada fuente de energía del SIN, con el correspondiente beneficio económico y ambiental.

Un caso particular, de relevancia estratégica para el país, es la posibilidad de exportar energía a los países vecinos (Argentina y Brasil), como se puede apreciar en la tabla de la figura 1. Dicha práctica en los últimos años se ha convertido en importantes beneficios económicos para Uruguay. La capacidad de ofertar bloques de energía exportables dentro de la programación semanal, pasa por la capacidad de poder predecir el comportamiento de los recursos de generación renovables en los siguientes días.

En este sentido, la experiencia contemporánea en varias regiones del mundo, incluyendo a Uruguay, indica que realizar previsiones hidrológicas operativas en base a predicciones numéricas de precipitación, permite la extensión del horizonte de pronóstico con resultados satisfactorios (Cuo *et al.*, 2011; IMFIA, 2014). Asimismo, la técnica de simulaciones por ensambles, que busca representar la incertidumbre asociada a la evolución del flujo atmosférico a través de la realización de múltiples simulaciones empleando condiciones iniciales ligeramente perturbadas o diferentes modelos, 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 decisiones de los diferentes usuarios del pronóstico (Kalnay, 2003; Ruiz, 2008).

Trabajos previos en Uruguay (Maciel *et al.*, 2012; Maciel *et al.*, 2015) 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).

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar una metodología para la generación y procesamiento de un ensamble de pronósticos de aportes a las represas hidroeléctricas, a partir de un ensamble de predicciones numéricas de precipitación, que permita asimilarlo en las herramientas de operación del SIN, conjuntamente con los pronósticos de las energías eólica y solar. En particular, se presenta la implementación y los resultados obtenidos para la represa de Gabriel Terra (Rincón del Bonete) localizada en la cuenca alta del río Negro.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca alta del río Negro, cuenca transfronteriza con Brasil, ocupa aproximadamente una superficie de 40,000 km², existiendo en su cierre la represa hidroeléctrica Gabriel Terra (en adelante Rincón del Bonete). En la tabla 1 se resumen las principales características de dicha cuenca.

Tabla 1: Principales características de la cuenca de aporte a la central de Rincón del Bonete.

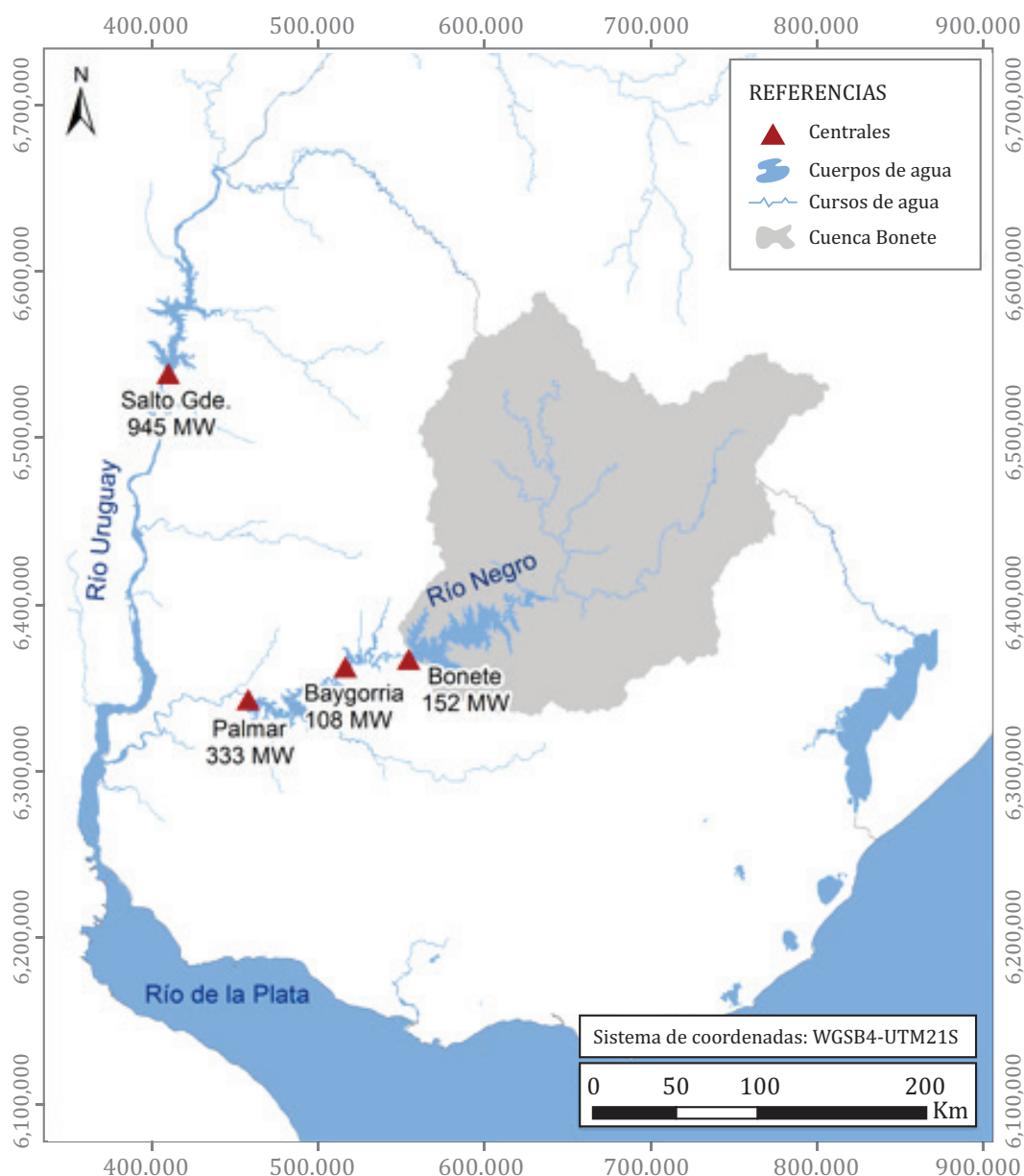
Parámetro	Valor
Extensión superficial (km ²)	39,500
Longitud del cauce principal (km)	400
Desnivel geométrico (m)	320
Pendiente media del cauce principal (m/km)	0.8
Agua disponible ponderada (mm)	108

Fuente: Elaboración de los autores

Aguas abajo de la central de Rincón del Bonete se localizan consecutivamente las represas hidroeléctricas de Baygorria y Constitución (Palmar). Este sistema conformado por las tres represas hidroeléctricas del río Negro constituye, a la fecha, aproximadamente el 20% de la energía eléctrica total generada en el país (ADME, 2019). 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) y la delimitación de la cuenca de aporte a la central de Rincón del Bonete. En la tabla 2 se resumen las principales características de dichas centrales, en la que puede observarse que la represa Rincón de Bonete es la que tiene mayor capacidad de regulación.

Figura 2. Localización de las centrales hidroeléctricas y delimitación de la cuenca de aporte a la central de Rincón del Bonete.



Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 2. Principales características de las centrales hidroeléctricas existentes en Uruguay.

Central	Coordenadas UTM 21S (km)	Potencia instalada (MW)	Volumen máximo (Hm ³)	Cuenca de aporte (km ²)
Rincón del Bonete	(554.6367)	152	8,800	39,500
Baygorria	(518.6363)	108	570	4,100 (incremental)
Constitución	(458.6343)	333	2,854	18,900 (incremental)
Salto Grande	(411.6540)	945	5,000	244,000

Fuente: Elaboración de los autores.

METODOLOGÍA

Modelación hidrológica

Para generar los aportes hidrológicos se empleó un modelo hidrológico simple de paso diario, denominado “GR4J” (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) propuesto y mejorado por Perrin *et al.* (2003).

El modelo consiste en un modelo diario concentrado, de cuatro parámetros (presentados en la tabla 3), basado en la cuantificación de la humedad del suelo. El mismo utiliza como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial para luego modelar el almacenamiento en el suelo teniendo en cuenta dos reservorios. Una parte del escurrimiento es transitado a través de un hidrograma unitario simple y, otra parte, a través de otro hidrograma unitario que se almacena en un reservorio no lineal, para luego formar con ambas partes la escorrentía total.

Dicho modelo no pretende ser una modelación hidrológica-hidrodinámica exhaustiva. Por el contrario, el objetivo es desarrollar una metodología general que sea lo suficientemente flexible y que en particular permita incorporar a futuro otras fuentes de pronóstico. Cabe destacar que el modelo hidrológico en sí es determinístico, pero, al ser alimentado con un conjunto de pronósticos de precipitación, se obtiene igual número de previsiones para los caudales.

La cuenca de aporte a la represa de Rincón del Bonete (39,500 km²) se discretizó en 17 subcuencas de área menor a 7,000 km² (según se presenta en la figura 3), en base al modelo digital del terreno de la NASA SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) con una resolución de 90x90m¹.

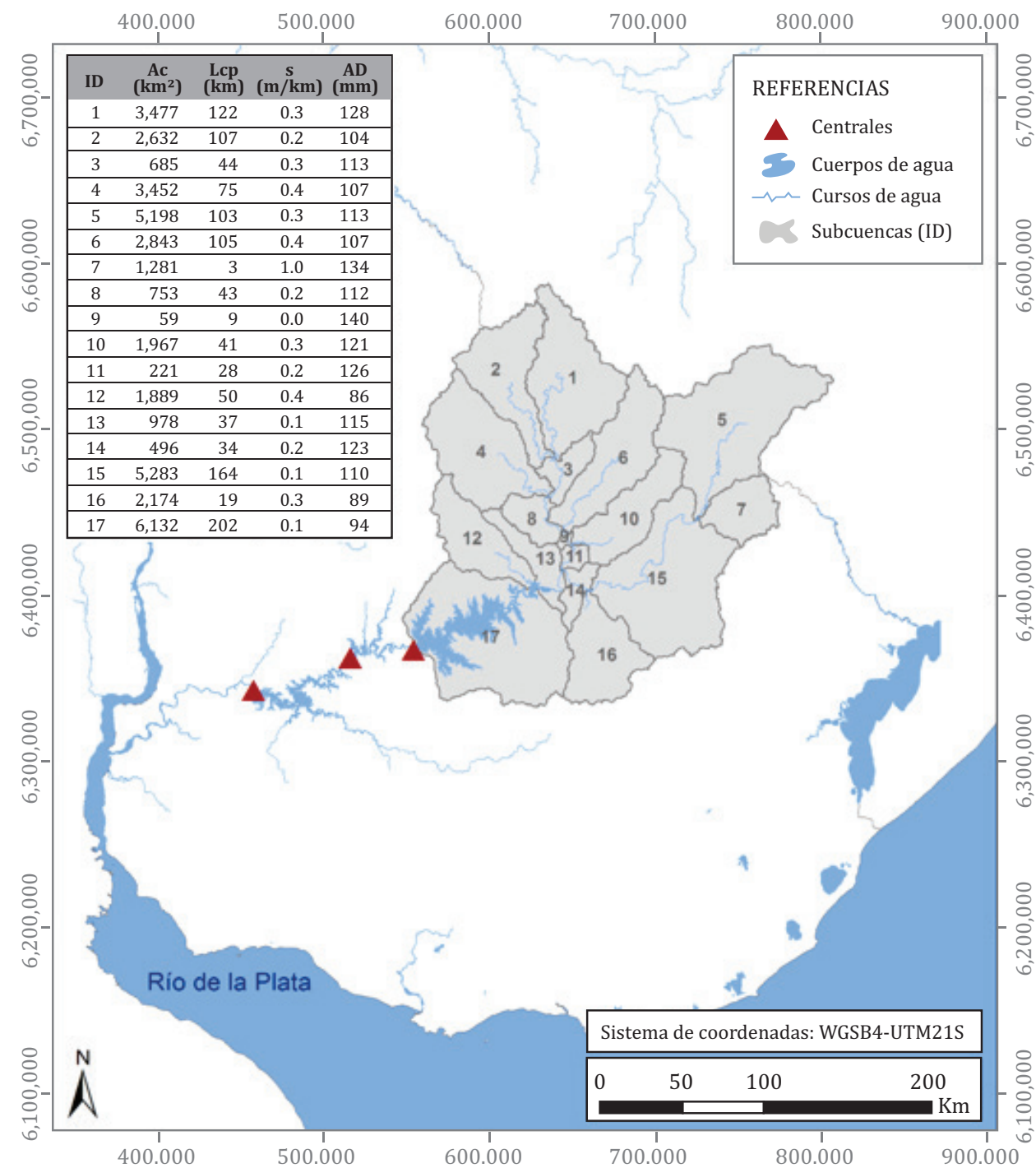
El modelo hidrológico se implementa en cada una de estas subcuencas, a partir de los datos diarios de precipitación y evapotranspiración potencial disponibles (presentados en la p. 103). La precipitación media en cada subcuenca se obtiene a partir del método de los polígonos de Thiessen.

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 3).

En la figura 4 se presenta un esquema del modelo hidrológico implementado “GR4J + Muskingum”.

¹ Disponible en <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>.

Figura 3. Discretización en subcuencas de la cuenca de aporte a Rincón del Bonete. Se incluye una tabla con el área de la cuenca de aporte (km²), la longitud (km) y pendiente media (m/km) del cauce principal y al agua disponible ponderada (mm) de cada subcuenca (identificada según un ID).

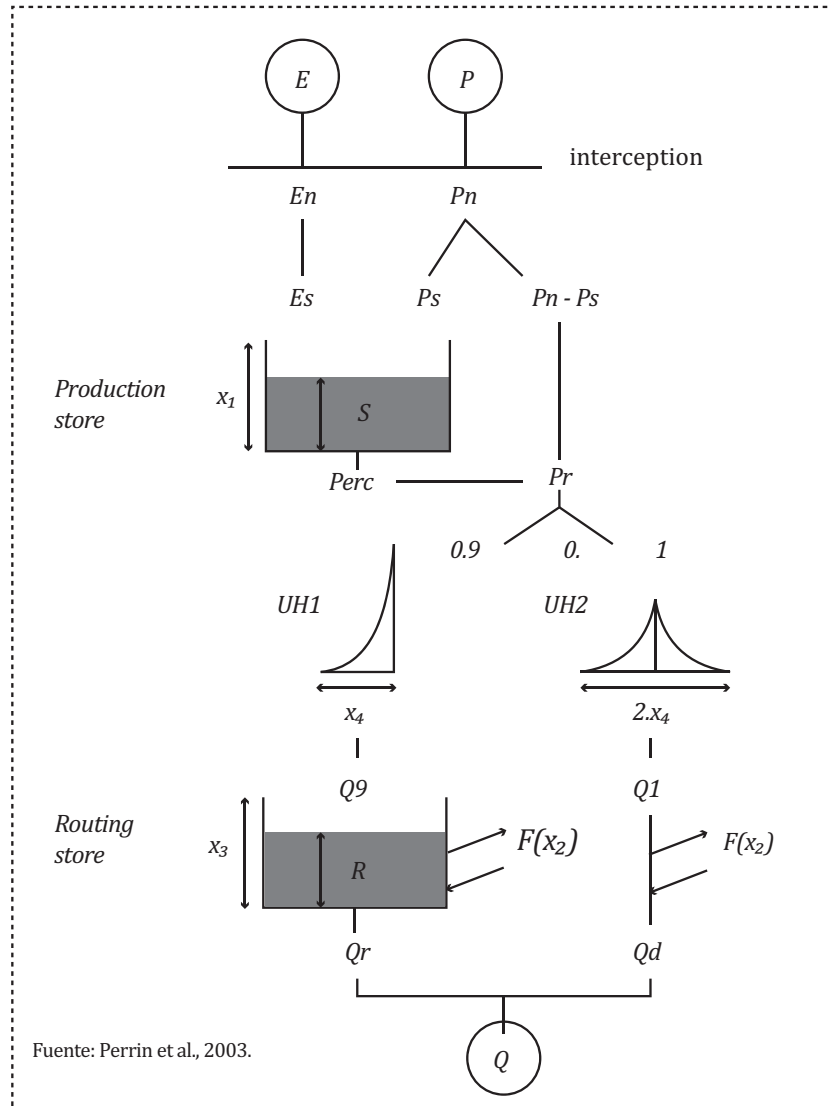


Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 4. Representación esquemática del modelo hidrológico implementado “GR4J+Muskingum”.

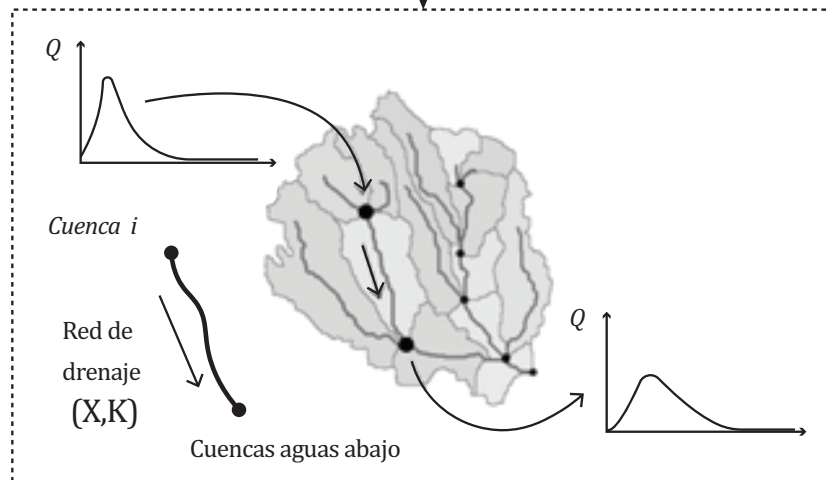
Modelo GR4J:

Cálculo del caudal incremental en cada subcuenca



Modelo Muskingum:

Tránsito a través de la red de drenaje



Fuente: Elaboración de los autores.

Para obtener un buen desempeño del modelo hidrológico es necesario ajustar los parámetros, de forma tal que el modelo represente lo mejor posible los caudales históricos observados. En estudios antecedentes se destaca la aplicación satisfactoria del modelo hidrológico de paso diario GR4J en cuencas de Uruguay (Chreties *et al.*, 2017; Narbondo *et al.*, 2018). Estos trabajos han obtenido paquetes de parámetros óptimos (calibrados y regionalizados) para minimizar las diferencias entre caudal observado y simulado; además han logrado relacionar los parámetros

del modelo con características físicas e hidrológicas para las cuencas de Uruguay, lo que permite su aplicación en cuencas no aforadas. En la tabla 3 se presentan los valores adoptados para cada uno de los parámetros del modelo GR4J siguiendo dichas recomendaciones. Cabe destacar que el parámetro x_1 (que representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo) no se considera como un parámetro de calibración, sino que se le asigna el valor del agua disponible (AD) media de los suelos presentes en cada subcuenca.

Tabla 3: Parámetros del modelo “GR4J+Muskingum” y valor adoptado en cada caso.

Parámetro	Modelo	Descripción del parámetro	Valor
x_1	GR4J	Capacidad máxima del reservorio de producción	AD mm
x_2	GR4J	Coeficiente de intercambio con el agua subterránea	0 mm
x_3	GR4J	Capacidad máxima 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 días

Fuente: Elaboración de los autores.

Simulación del sistema eléctrico

La modelación del sistema eléctrico se realiza mediante la plataforma de Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica SimSEE² (Chaer, 2008). 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. Por lo cual, es extensamente utilizada en Uruguay 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).

En particular para el caso de la generación hidráulica, el SimSEE implementa un generador estocástico de series sintéticas de aportes a los embalses que permite realizar simulaciones utilizando un modelo de sintetizador CEGH: Correlaciones en Espacio Gaussiano con Histograma (Chaer, 2005). El sintetizador es utilizado por el SimSEE para caracterizar la incertidumbre esperada durante la optimización, donde se determina la política de operación óptima. Asimismo, también se utiliza el generador de series sintéticas en la etapa de simulación, para calcular costos esperados y su dispersión.

2 Disponible en <https://simsee.org/>.

Acople del ensamble de pronósticos hidrológicos dentro del SimSEE

En SimSEE los pronósticos, tanto hidrológicos así como de generación en base a energías renovables no convencionales y de demanda, se modelan mediante fuentes CEGH.

En base a los histogramas de una serie histórica, que puede tener múltiples canales, se genera una transformación no lineal mediante deformadores por paso de tiempo que mapean la serie a Espacio Gaussiano (EG) para la fuente. En EG el proceso estocástico se modela como un sistema lineal, tal como se presenta en la ecuación 1.

$$(Ec. 1) \quad X_{k+1} = AX_k + \Lambda_k BR_k + S_k$$

Donde X_k es el valor de la señal para el paso de tiempo k , A es la matriz de filtros de correlación, B es la matriz global de ruido, R_k es una señal de ruido blanco gaussiano, Λ_k es la matriz de atenuadores de ruido y S_k es el sesgo para el paso k .

Los pronósticos se incorporan a la fuente actuando sobre los sesgos y los atenuadores por paso de tiempo.

Como primer paso, las series de ensambles se transforman a EG usando los deformadores por paso de tiempo de la fuente sintetizadora (generando la serie E). De aquí en adelante m es el número de canales, p es el número de pasos de tiempo y r es el número de realizaciones.

Se toma como guía de la fuente en EG, al promedio por paso de tiempo del ensamble de pronósticos en EG.

Dado que la señal R_k es de ruido blanco gaussiano de media 0 (cero), se calcula el sesgo para el paso k como se presenta en la ecuación 2, para que el valor esperado de las series sintéticas en EG (X) replique el valor esperado del ensamble en EG (E).

$$(Ec. 2) \quad S_k = \bar{X}_{k+1} - A\bar{X}_k = \bar{E}_{k+1} - A\bar{E}_k$$

En segunda instancia, se ajustan por máxima verosimilitud el ensamble de pronósticos y el cono de pronósticos de la fuente CEGH, donde como variable de ajuste se utilizan los atenuadores por paso. Para maximizar la verosimilitud entre el ensamble y el pronóstico CEGH se recurre a que la covarianza del pronóstico producido por el CEGH está dada por la ecuación 3.

$$(Ec. 3) \quad \Sigma_k = \Lambda_k BB^T \Lambda_k^T + Z_k$$

Donde Z_k se construye iterativamente a partir de las ecuaciones 4 y 5:

$$(Ec. 4) \quad Z_0 = A \langle d_{j,1} d_{j,1}^T \rangle A^T$$

Donde $d_{j,k}$ es el vector de desviación del miembro j en el paso de tiempo k con respecto a la media del ensamble para el paso.

$$(Ec. 5) \quad Z_k = A (Z_{k-1} + \Lambda_{k-1} BB^T \Lambda_{k-1}^T) A^T$$

$$(Ec. 6) \quad \Sigma_k = \langle d_{j,k+1} d_{j,k+1}^T \rangle = \Lambda_k BB^T \Lambda_k^T + Z_k$$

La experiencia indica que realizar previsiones hidrológicas operativas en base a predicciones numéricas de precipitación permite la extensión del horizonte de pronóstico con resultados satisfactorios.

Finalmente, se busca maximizar la probabilidad conjunta de todo el ensamble tal como se presenta en la ecuación 7. Aplicando “propiedades de

logaritmo” sobre dicha ecuación se obtiene la condición de máxima verosimilitud, expresada en la ecuación 8.

$$(Ec. 7) \quad [\lambda_{1k}, \dots, \lambda_{mk}] : \max_{\{\lambda_{1k}, \dots, \lambda_{mk}\}} \left(\prod_j \prod_k \frac{1}{(2\pi)^{m/2} |\Sigma_k|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2} d_{jk}^T \Sigma_k^{-1} d_{jk}} \right)$$

$$(Ec. 8) \quad \min_{\beta_{1k}, \dots, \beta_{mk}} \left(-\ln(|pk|) + \frac{1}{r} \sum_j d_{jk}^T P_k d_{jk} \right)$$

Donde la matriz P_k es la inversa de Σ_k .

Igualando a cero las derivadas direccionales de los elementos de la ecuación 8, se llega a la condición de optimalidad expresada en la ecuación 9.

$$(Ec. 9) \quad \sum_h^T \begin{bmatrix} \beta_{1k} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_{2k} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \beta_{mk} \end{bmatrix} C_h = \frac{1}{\beta_{hk}}$$

Donde $\beta_{ij} = 1 / \lambda_{ij}$ y λ son los elementos de Λ . La matriz C , introducida en la ecuación 10, es una matriz auxiliar que se utiliza para construir el sistema no lineal con el cual se calculan los atenuadores λ por paso.

$$(Ec. 10) \quad C = (BB^T)^{-1}$$

De esta manera el problema queda planteado como:

$$(Ec. 11) \quad \begin{bmatrix} \sigma_{11} c_{11} & \dots & \sigma_{m1} c_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1m} c_{1m} & \dots & \sigma_{mm} c_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_{1k}} \\ \vdots \\ \frac{1}{\lambda_{mk}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{1k} \\ \vdots \\ \lambda_{mk} \end{bmatrix}$$

Donde σ_{ij} corresponde al elemento ij de la matriz de covarianza Σ . A partir de aquí se define una matriz auxiliar (M) al problema, tal como se presenta en la ecuación 12.

$$(Ec. 12) \quad M = \begin{bmatrix} \sigma_{11} c_{11} & \dots & \sigma_{m1} c_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1m} c_{1m} & \dots & \sigma_{mm} c_{mm} \end{bmatrix}$$

Para resolver el problema de la ecuación 11 y obtener los atenuadores se utiliza un optimizador no lineal basado en el método Newton-Raphson con cálculo explícito de gradiente de acuerdo a la ecuación 13, donde F es la función de costo del optimizador.

$$(Ec. 13) \quad F(\Lambda) = M\Lambda - \beta$$

$$\frac{\partial F}{\partial \Lambda_h}(\Lambda) = 2 \sum (F_i(\Lambda) m_{i,h}) - 2 \frac{F_h(\Lambda)}{\Lambda^2}$$

El modelo desarrollado se encuentra integrado en la sala de simulación de la programación semanal del SimSEE-VATES³ y está operativo desde junio de 2019. El mismo se actualiza dos veces al día (optimización y simulación del sistema), cada vez que se dispone de un nuevo pronóstico de precipitación (en la página siguiente)⁴.

3 VATES es un robot-software que se ejecuta en forma continua en los servidores de la Administración del Mercado Eléctrico (ADME, Uruguay), integrando la información de estado del SIN y los pronósticos (eólica, solar, hidráulica, demanda) para generar las distribuciones de las variables de interés de las siguientes 168 horas de la operación óptima del SIN.

4 Las salidas están disponibles en el siguiente link: <http://latorre.adme.com.uy/vates>.

Información empleada

Como información de entrada al modelo hidrológico en modo operativo se considera la siguiente:

• Precipitación diaria

Datos de pronóstico:

Ensamble de predicciones numéricas de precipitación a 14 días del modelo GEFS (*Global Ensemble Forecast System* del NCEP-NOAA) con una resolución espacial de $1,0^\circ \times 1,0^\circ$, compuesto por la corrida de control más 20 miembros perturbados (Zhu, 2018).

Datos históricos:

Boletín pluviométrico⁵ del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) que consiste en un mapa discreto (6 niveles de discretización) de precipitación diaria para Uruguay construido mediante interpolación por el método Kriging

Ordinario. Este es el producto oficial y para su construcción (una vez al día) se tiene en cuenta toda la información disponible en dicho momento. El mismo se emplea como restricción para los datos del GEFS en los días pasados: para cada punto del GEFS, si el dato pertenece al rango indicado por el mapa, se toma como válido; en caso contrario, se toma el valor del rango del mapa más cercano al dato GEFS. Actualmente está disponible en formato imagen, pero se espera que en el corto plazo se encuentre disponible en formato numérico y se pueda incorporar a la implementación del modelo en modo operativo.

• Evapotranspiración potencial diaria (ETP)

Ciclo medio anual de ETP, construido a partir de datos diarios históricos registrados en el período 1991-2015 en las estaciones del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay (INIA) y del INUMET.

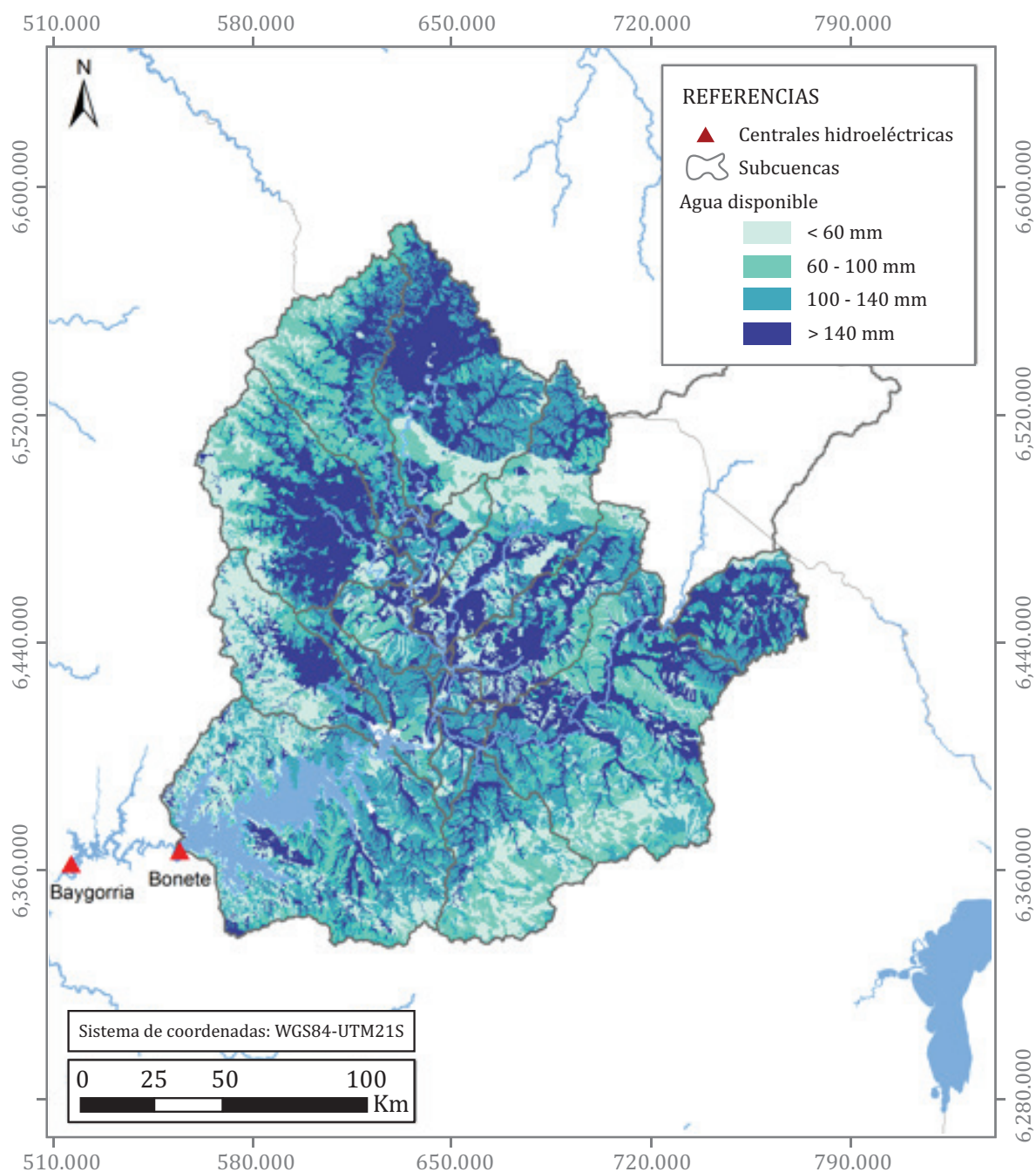


⁵ Disponible en <https://www.inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/boletin-pluviometrico>.

Para representar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo se elaboró el mapa de agua potencialmente disponible (AD) en los suelos de Uruguay (figura 5), a partir del mapa de suelos CONEAT a escala 1:40.000

(Molfino, 2009) de la Dirección General de Recursos Naturales (DGRN, MGAP) de Uruguay. En base a esto, se pondera por área para obtener un valor representativo del suelo en cada subcuenca.

Figura 5. Mapa del agua potencialmente disponible en los suelos de Uruguay pertenecientes a la cuenca de Rincón del Bonete.

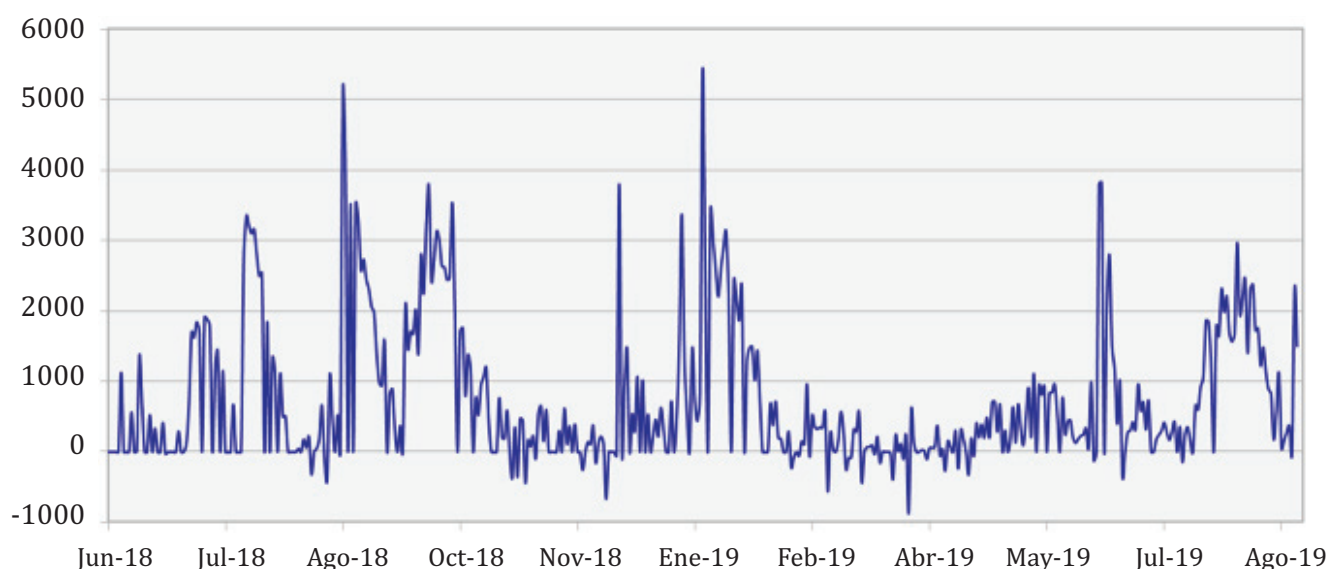


Fuente: Elaboración de los autores a partir del mapa de suelos CONEAT a escala 1:40.000.

Para la evaluación del modelo hidrológico, como referencia, se dispuso de la serie diaria de caudales de aporte teóricos al embalse de Rincón de Bonete (figura 6) brindada por la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas de Uruguay (UTE). Dicha serie se denomina “teórica” ya que consiste en una estimación en base a un balance hídrico en el 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 y al efecto del viento en la superficie del mismo. En este sentido, como se observa en la figura 6, durante el período analizado se tienen valores de caudal negativos, 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). Tal como se discutirá en las próximas secciones, esto constituye una limitante para la implementación del modelo en modo operativo.

Figura 6. Serie diaria de caudales de aporte teóricos al embalse de Rincón de Bonete.

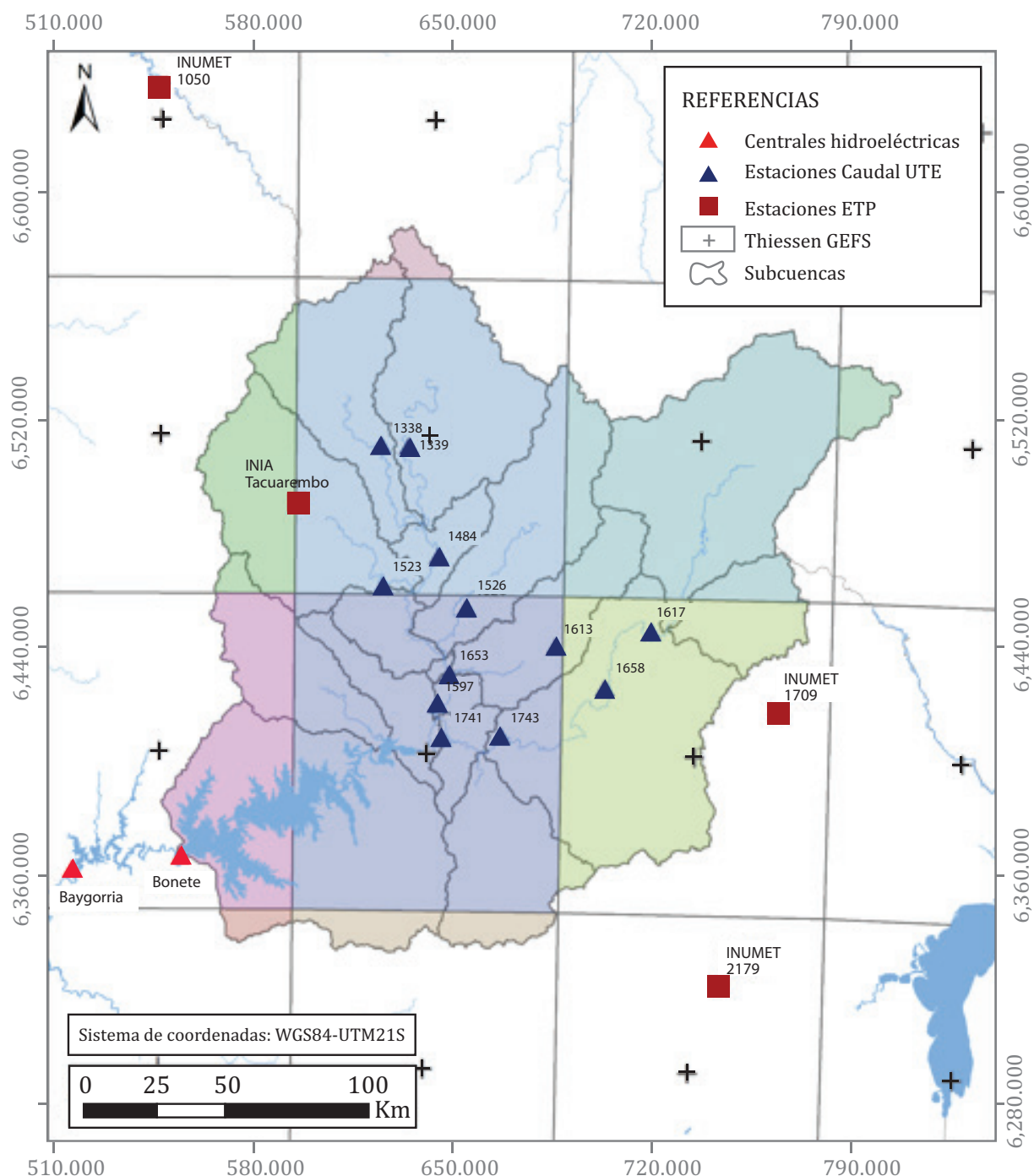


Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos brindados por UTE.

En la figura 7 se presenta la distribución espacial de las estaciones hidro-meteorológicas (ETP y caudal) con influencia en la cuenca de Rincón del Bonete y los polígonos de Thiessen considerados (grilla GEFS) para el cálculo de la precipitación media en cada subcuenca.

En base a los resultados obtenidos se desprende que, para la implementación del modelo en modo operativo, la asimilación de datos observados de precipitación y caudal en tiempo real es crítica.

Figura 7. Ubicación de las estaciones hidro-meteorológicas (ETP y caudal) y polígonos de Thiessen considerados (grilla GEFS) para el cálculo de la precipitación media en cada subcuenca. En cada estación se especifica el código correspondiente y la entidad responsable de su operación. Cada polígono de Thiessen está sombreado con un color diferente para facilitar su visualización.



Fuente: Elaboración de los autores.

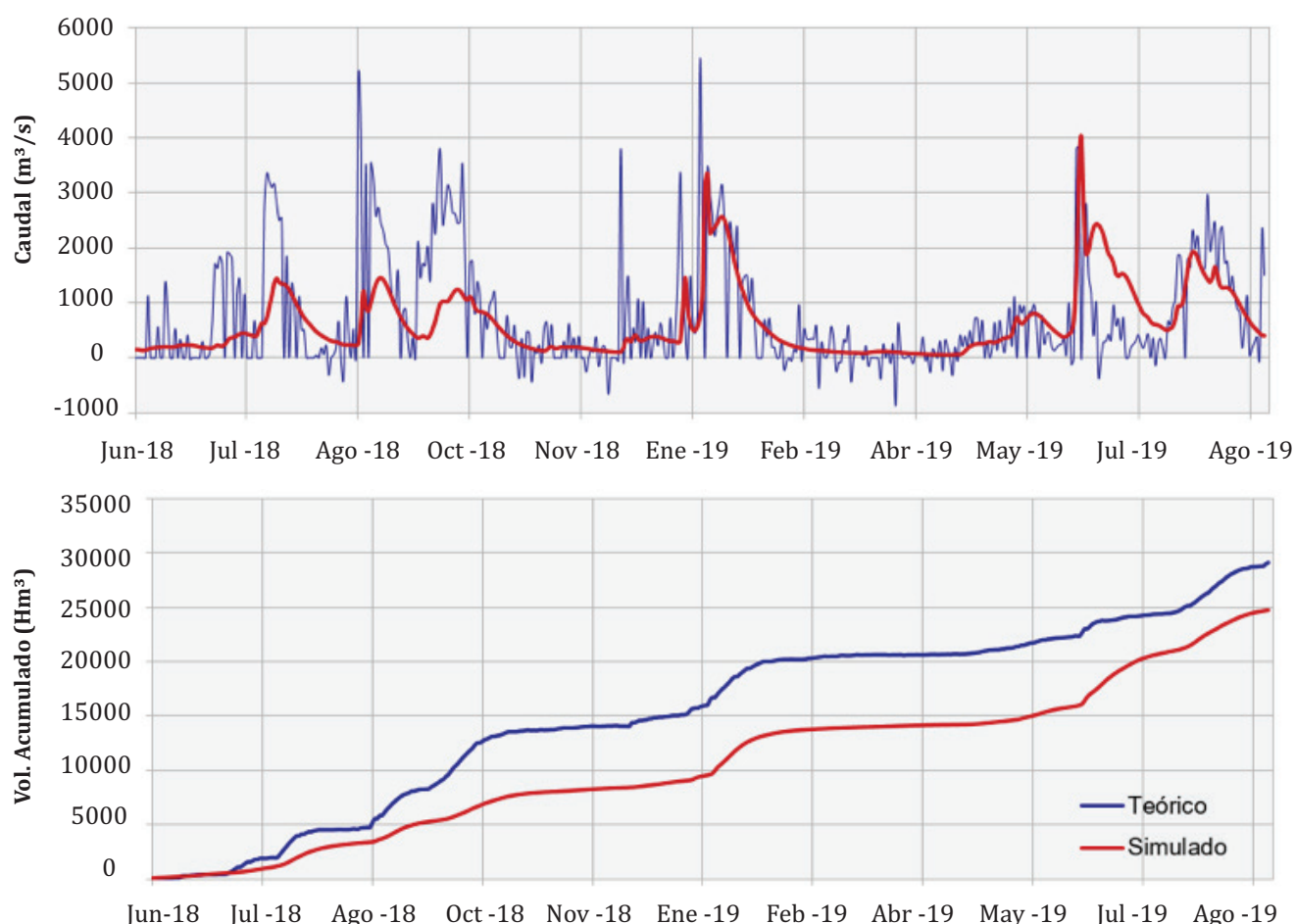
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación en modo retrospectivo

En primer lugar, a modo de diagnóstico, se realizó una simulación para el período junio 2018 a agosto 2019 a partir de la corrida de control del GEFS corregida por el boletín pluviométrico de INUMET (asumido como la información histórica disponible). En el diagrama superior de la figura 8, se presenta la serie de caudales

resultante y se incluye, a modo de referencia, la serie de caudales teóricos estimados por UTE en base a las variaciones de la cota del lago y los caudales erogados. En el diagrama inferior de la figura 8, se presentan los respectivos volúmenes acumulados. Se observa que el modelo sigue la tendencia de la serie teórica, pero suavizada, y con sesgos a menores montos. Se obtuvo una diferencia entre el volumen de escurrimiento total (ΔV) modelado y teórico del -15% (tabla 4).

Figura 8. Resultados de la simulación en modo retrospectivo para el período junio de 2018 a agosto de 2019: serie de caudales diarios (diagrama superior) y volúmenes acumulados (diagrama inferior). A modo de referencia se incluye la serie de caudales teóricos de UTE.



Fuente: Elaboración de los autores.

El coeficiente de escorrentía (definido como el cociente entre el volumen escurrido y la precipitación acumulada en la cuenca) calculado a partir de las series de caudales simulados y teóricos, considerando en ambos casos la precipitación de la corrida de control del GEFS, es de 0.41 y 0.48 respectivamente (tabla 4). Asumiendo como válida la serie de caudales teóricos, resulta una subestimación del modelo que podría deberse a una subestimación de la precipitación y/o a una deficiencia en la representación del proceso de transformación P-Q (precipitación a caudal). Dado que según DINAGUA (2012), para la región de estudio corresponde un C promedio anual de 0.37, valor muy próximo al obtenido con la serie simulada, se deduce que el déficit es mayormente atribuible a la serie de precipitación considerada.

Adicionalmente, se calculó el coeficiente de eficiencia de *Nash-Sutcliffe* (NSE) y el coeficiente de determinación (R^2) para todo el período simulado, para los pasos de tiempo diario y semanal (considerando que el modelo se emplea como una herramienta de apoyo a la toma de decisión de la programación semanal). Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4. En base a las calificaciones generales de desempeño para dichos estadísticos reportadas por Moriasi *et al.* (2007) y Chen *et al.* (2017), los resultados obtenidos para el paso diario no son satisfactorios (valores inferiores a 0.50 para ambos estadísticos), pero sí lo son para el paso semanal (NSE=0.50 y R^2 =0.53). En cuanto a la diferencia de volúmenes escurridos, se obtuvo un desempeño entre satisfactorio y bueno ($\Delta V \approx -15\%$).

Tabla 4: Indicadores de desempeño de la modelación hidrológica.

Fuente	Precipitación acumulada (Hm ³)	Vol. escurrido acumulado (Hm ³)	Coeficiente de escorrentía	Coeficiente NSE	Coeficiente R^2
Modelo	60,900	24,750 ($\Delta V = -15\%$)	0.41	Diario: 0.33 Semanal: 0.50	Diario: 0.35 Semanal: 0.53
Teórico	60,900	29,150	0.48	---	---

Fuente: Elaboración de los autores.

Estos resultados son inferiores a los obtenidos por Narbondo *et al.* (2018) en la aplicación del modelo GR4J en otras cuencas de Uruguay, pero en vista de la discusión anterior, se entiende que el desempeño del modelo mejoraría significativamente al considerar una mejor estimación de la precipitación histórica, a partir de la cual será posible realizar la calibración del modelo de manera encontrar el conjunto de parámetros óptimos para la cuenca de estudio (ver la p. 110).

Simulación en modo pronóstico

En la figura 9, a modo de ejemplo, se presentan los ensambles de pronósticos de caudales y volúmenes acumulados obtenidos para ventanas de tiempo de dos semanas, para dos casos de distinto desempeño. A modo de referencia, se incluyen los valores teóricos estimados por UTE.

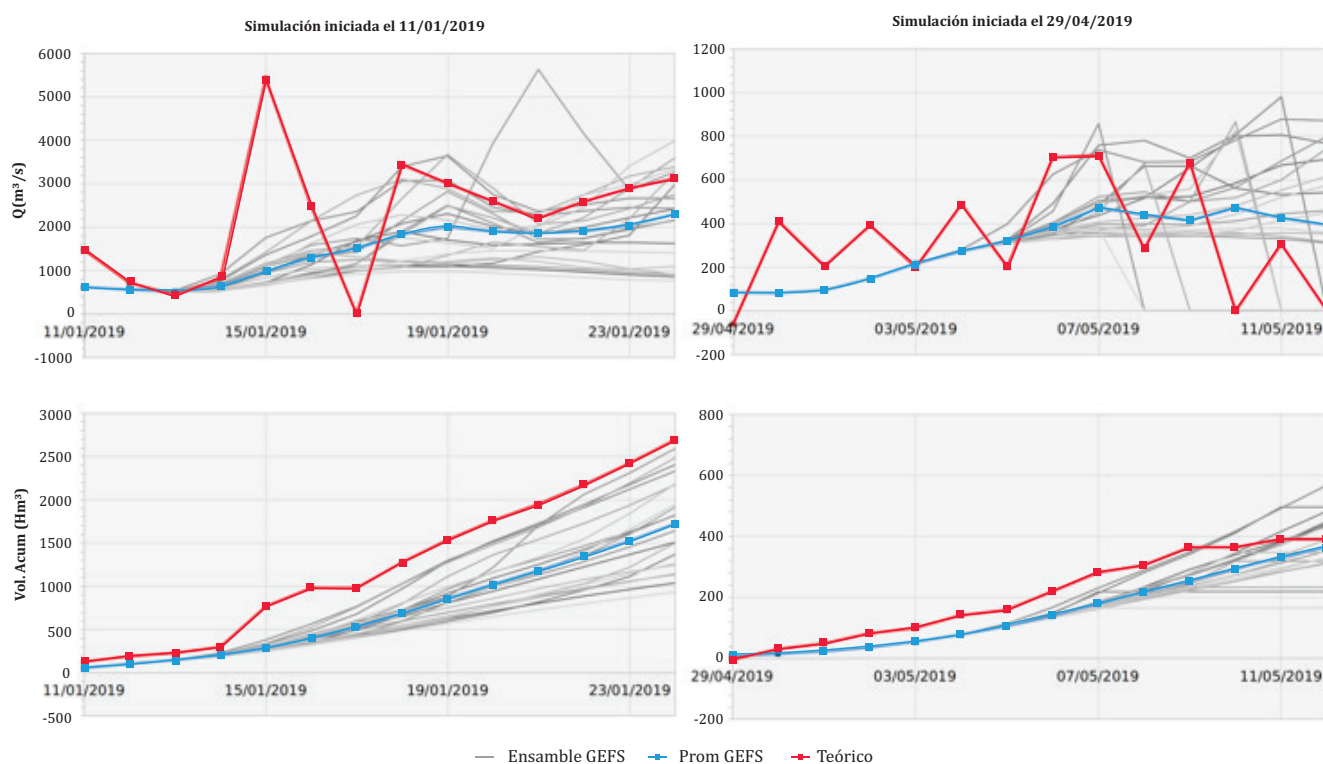
En la simulación del día 11/01/2019 (diagrama izquierdo), el caudal teórico tiende a aproxi-

marse a los miembros más altos del ensamble. Asimismo, es interesante notar el efecto de compensación (posiblemente asociado a la acción del viento en el embalse) en la estimación teórica entre los días 15 al 17 de enero, donde el promedio de los aportes es de 2,600 m³/s, valor comprendido dentro del cono conformado por los caudales pronosticados. Este efecto repercute en los volúmenes acumulados, la curva del promedio del ensamble y la curva teórica se separan el 15/01 y a partir de allí

continúan paralelas, con la consecuente subestimación del modelo.

En la simulación iniciada el día 29/04/2019 (diagrama derecho), el ensamble de caudales sigue la tendencia del caudal teórico durante la primera semana, luego se amplía su dispersión. En este caso, al final del horizonte de pronóstico el volumen acumulado teórico está incluido dentro del cono conformado por el ensamble.

Figura 9. Ejemplos de ensambles de pronósticos de caudales y volúmenes acumulados. A modo de referencia se incluye la serie de caudales teóricos de UTE.



Fuente: Elaboración de los autores.

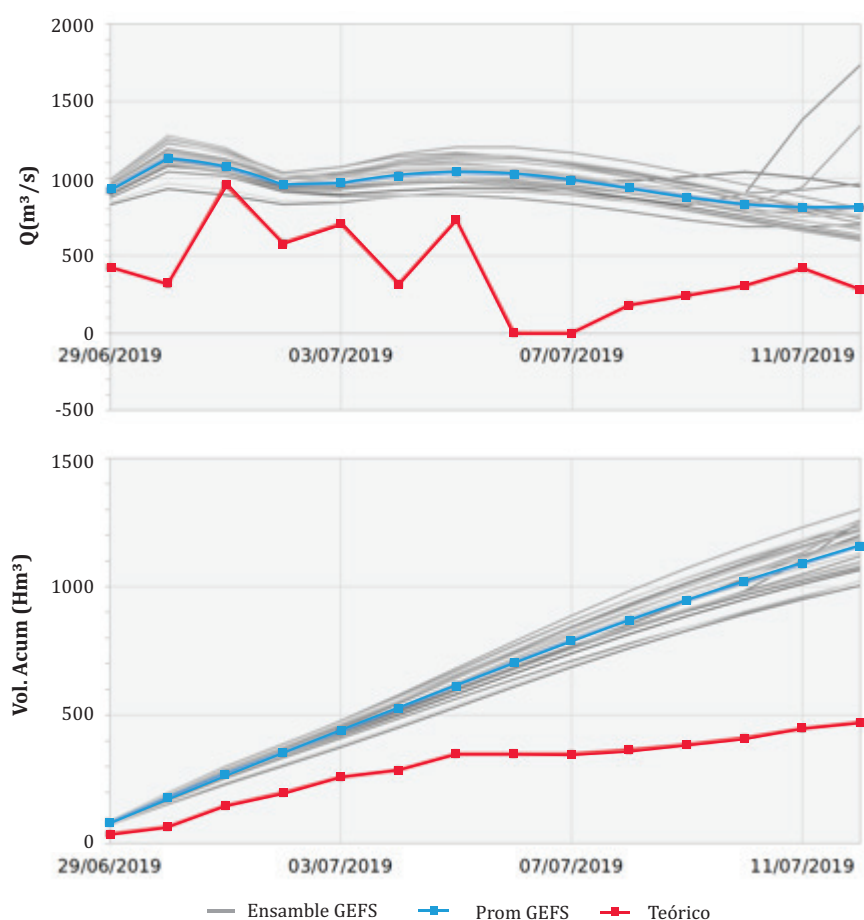
Finalmente, es interesante señalar una limitación de la versión operativa actual del modelo, sin asimilación de datos observados. En la figura 10 se presentan los ensambles de pronósticos de caudales y volúmenes acumulados obtenidos en la simulación iniciada el 29/06/2019. Se observa un salto en el valor inicial del caudal (el pronóstico es muy superior al teórico), sin embargo, la tendencia

es capturada correctamente por el modelo, que en este caso presenta baja dispersión.

Lo anterior, junto con la imperfecta representación del campo de precipitaciones observado y los errores introducidos en la modelación hidrológica, pone en evidencia la necesidad de implementar un proceso de ajuste que opere

como parte de la simulación continua. Dicho ajuste podrá ser implementado solo en aquellas cuencas donde se cuente con registro observado de caudales (ver figura 7) y, por tanto, se puede estimar el error del modelo.

Figura 10. Ejemplo de ensamble de pronósticos de caudales que evidencia la necesidad de incluir asimilación de datos observados en la versión operativa del modelo.



Fuente: Elaboración de los autores.

CONCLUSIONES Y PASOS FUTUROS

Se desarrolló una metodología para la generación y acople dentro del SimSEE de ensambles de pronósticos, en particular aplicada a los aportes a la represa de Rincón del Bonete a partir de un ensamble de pronósticos de precipitación. Para ello, se implementó un modelo hidrológico simple de paso diario (GR4J) combinado con un

modelo de tránsito hidrológico (Muskingum). El ensamble de pronósticos de caudal se incorpora dentro del sintetizador 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. Dicha metodología es lo suficientemente general y flexible como para permitir incorporar a futuro otras fuentes

de pronóstico, además de poder ser operada adecuadamente con la información hidrometeorológica disponible en tiempo real.

En general, el desempeño del modelo hidrológico implementado es satisfactorio, con un NSE de 0.50 (paso semanal), un R^2 de 0.53 (paso semanal) y una diferencia de volúmenes acumulados de -15%. Se observa una leve subestimación de los caudales teóricos, mayormente atribuible a la serie de precipitación considerada.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos se desprende que, para la implementación del modelo en modo operativo, la asimilación de datos observados de precipitación y caudal en tiempo real es crítica, ya que se identificaron algunas limitaciones:

- La versión actual disponible del boletín pluviométrico de INUMET es discreta, consistente en un mapa con rangos amplios de valores con 6 niveles de discretización.
- La serie de caudales teóricos de UTE (estimada de modo indirecto en base a la variación de la cota del lago y los caudales erogados) presenta alta variabilidad diaria, posiblemente asociada al efecto del viento en el embalse.

Dentro de los pasos a seguir se destacan:

- Mejora en la representación del campo de precipitaciones observado mediante la combinación de observaciones en superficie y estimaciones satelitales de precipitación. Actualmente se está implementado un algoritmo que combina las estaciones pluviométricas disponibles en la cuenca de Rincón del Bonete con dos productos satelitales de precipitación global (GSMaP e IMERG) pertenecientes a una nueva generación, que integra múltiples plataformas y algoritmos previamente existentes, con alta resolución

espacial y temporal y mejor *performance* que los productos predecesores en diversas regiones y condiciones climáticas.

- Calibración del modelo “GR4J+Muskingum” a partir de la mejor estimación de la precipitación histórica y teniendo en consideración los resultados del trabajo recientemente publicado por Narbondo *et al.* (2020) acerca de la regionalización del modelo GR4J en Uruguay.
- Implementación en modo operativo del ajuste en tiempo real en base a registros de precipitación y caudal. El ajuste se plantea como una relajación de las variables de estado del modelo (el nivel de los reservorios) a sus valores extremos proporcional a la amplitud del error relativo del caudal simulado asociado a la escala temporal pertinente.

- Aplicación de las mejoras del modelo CEGH a otros tipos de generadores (no hidráulicos).

Una vez hecho el aprendizaje en la cuenca de Rincón del Bonete, se podrá extender la metodología a las otras centrales hidroeléctricas, en particular a las localizadas sobre el río Negro.

...

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto PRONOS, financiado por el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF). Se agradece al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) de Uruguay, por la disponibilidad de los datos hidrometeorológicos empleados.

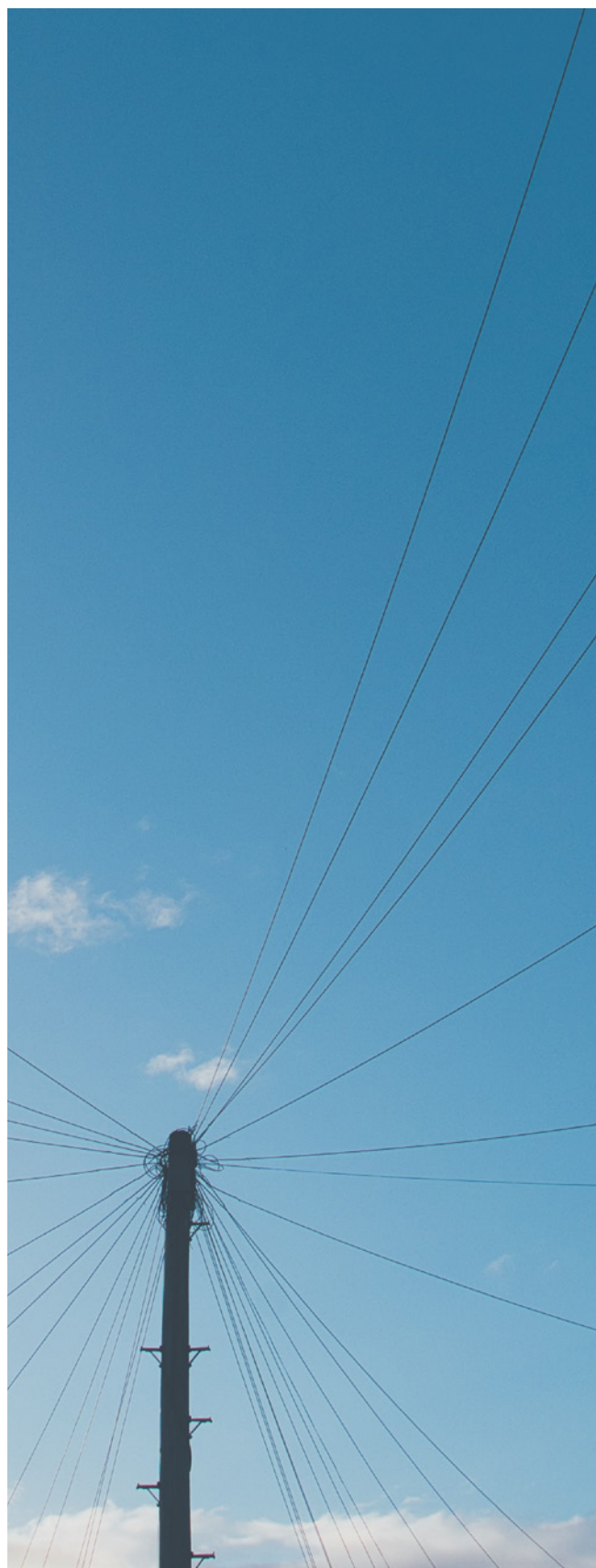


Foto de Gurdain Bharj en Unsplash.

REFERENCIAS

ADME (2019). Informe anual 2018. Administración del Mercado Eléctrico, Uruguay. https://adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_526/Informe_Anual_2018_V8.pdf

Chaer R. (2005). Modelo de series correlacionadas CEGH. http://iie.fing.edu.uy/simsee/curso2010/Cap9_sintetizadorCEGH.pdf

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>

Chen H., Luo Y., Potter C., Moran P.J., Grieneisen M.L., Zhang, M. (2017). Modeling pesticide diuron loading from the San Joaquin watershed into the Sacramento-San Joaquin Delta using SWAT. *Water Res.* 2017, 121, 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.032>

Chreties C., Crisci M., Narbondo S., Schenzer D., Pienika R. (2017). Mejora en la estimación de caudales fluviales en Uruguay y su aplicación para evaluar el potencial de generación hidrocinético. Informe final del Proyecto ANII FSE, Convocatoria 2014 (ANIIFSE_1_2014_1_102258). Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República Oriental de Uruguay.

Cuo L., Pagano T., Wang Q. (2011). A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short -to medium-range streamflow forecasting. *J. Hydrometeor.*, 12, 713-728. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1347.1>

DINAGUA (2012). Ciclos anuales y estacionales de parámetros hidrológicos (1980-2004). Informe temático de la División Recursos Hídricos, Departamento de Hidrología, Dirección Nacional de Aguas, MVOTMA, Uruguay.

IMFIA (2014). Previsión de niveles en el río Yi con base en información hidrológica en tiempo real y pronósticos meteorológicos. Informe final del Proyecto ANII FSE, Fondo Sectorial Energía Convocatoria 2011. Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental. Universidad de la República Oriental de Uruguay.

- Kalnay E. (2003). Atmospheric modelling, data assimilation and predictability. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511802270>
- Maciel F., Terra R., Díaz A. (2012). Incorporación de información climática en la simulación de aportes a represas en un modelo del sistema eléctrico. Memorias del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica. ISBN: 978-9968-933-06-3.
- Maciel F., Terra R., Chaer R. (2015). Economic impact of considering El Niño Southern Oscillation on the representation of streamflow in an electric system simulator. *Int. J. Climatol.*, 35, 4094-4102.
- Molfino J.H. (2009). Estimación de Agua Disponible en los grupos CONEAT. División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Montevideo, Uruguay.
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- Narbondo S., Crisci M., Chreties C. (2018). Modelación hidrológica diaria en cuencas con diferentes características de Uruguay. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Buenos Aires, Argentina.
- Narbondo S., Gorgoglione A., Crisci M., Chreties, Ch. (2020). Enhancing physical similarity approach to predict runoff in ungauged watersheds in sub-tropical regions. *Water*, 12 (2), 528; <https://doi.org/10.3390/w12020528>
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1), 275-289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Ruiz J.J. (2008). Aplicación de los pronósticos por ensambles a la predicción del tiempo a corto plazo sobre Sudamérica. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, Argentina. http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n4361_Ruiz
- Zhu Y. (2018). NCEP Global Ensemble Forecast System (GEFS). Global EPS Report to WMO on NCEP GEFS, DPFS/ET-OWFPS/Doc. 7.1(3). <https://www.emc.ncep.noaa.gov/GEFS/mconf.php>