

ESTIMACIÓN DE CAUDAL EN SALTO GRANDE A PARTIR DE SALIDAS CORREGIDAS DE REGCM Y REDES NEURONALES PROFUNDAS

Matilde Ungerovich

mungerovich@adme.com.uy

¹Administración del Mercado Eléctrico (ADME)

Palabras clave: RegCM, Salto Grande, caudal

1) INTRODUCCIÓN

Uruguay ha sido reconocido a nivel internacional por su exitosa transición energética, alcanzando una matriz eléctrica compuesta en un 90 % por fuentes renovables, con una participación destacada de la energía hidroeléctrica, eólica y solar (REN21, 2024). Según datos preliminares del Balance Energético 2024 (MIEM, 2025), la generación eléctrica del país creció un 34 % respecto al año anterior, con un 99 % proveniente de fuentes renovables.

Este proceso no solo involucró una diversificación en la generación, sino también el desarrollo de instrumentos de predicción y planificación avanzados, que hoy son clave para la gestión eficiente del sistema.

En este contexto, disponer de herramientas que permitan traducir la información climática en indicadores operativos para el sistema eléctrico es cada vez más relevante. Este trabajo apunta a contribuir en esa dirección, presentando un enfoque que combina modelos climáticos regionales, corrección estadística y aprendizaje profundo para estimar el caudal en Salto Grande, una de las principales represas del país. El objetivo es utilizar las salidas corregidas de RegCM5 para calcular el caudal en la represa de Salto Grande.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

En primer lugar se corre el modelo de pronóstico climático. Luego se aplican correcciones a sus salidas. Con las predicciones corregidas se entrena un modelo que estima el caudal en la represa en función de datos de reanálisis ERA5. El próximo paso (en desarrollo) consiste en pronosticar el caudal utilizando salidas de RegCM5.

2.1 Simulaciones climáticas

Se corrió RegCM5 con resolución de 20 km x 20 km para el período 2013–2024, considerando la temporada setiembre - enero. Para cada año se generaron ensambles de 10 miembros a partir de diferentes fechas iniciales del modelo GFS. El análisis se centra en los meses de octubre a enero, descartando el primer mes de pronóstico.

2.2 Corrección por cuantiles

Las salidas del modelo presentan errores sistemáticos bien documentados. En particular, el estudio de Coppola et al. (2024) señala, para primavera y verano en el sudeste de Sudamérica, una sobrestimación de 1 °C en temperatura media, 2 °C en temperatura máxima, y una subestimación de 1 °C en la mínima. También se reportan 2 mm/día de sobreestimación en

precipitación promedio, 10 días más de lluvia por año, y excesos de hasta 20 mm/día en el percentil 99.

Para abordar estos sesgos se aplicó una corrección estadística basada en cuantiles (*Quantile Mapping*), dividiendo el dominio en cuadrantes de $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, como se muestra en la figura 1. En cada subregión se construyó una función empírica de corrección con datos diarios históricos, aplicada luego a cada variable del modelo. Como ejemplo, la figura 2 muestra las curvas de permanencia del modelo y del reanálisis utilizadas para las correcciones de temperatura máxima en las regiones 7-12 de la figura 1. Se observa que en el noreste de la región (zonas 8, 9 y 12) el modelo sobreestima las temperaturas máximas, mientras que en las zonas 7 y 11 el error depende del valor de la temperatura y en el sureste (zona 10) se subestima la temperatura máxima.



Figura 1- Regiones utilizadas para correcciones de predicciones de RegCM

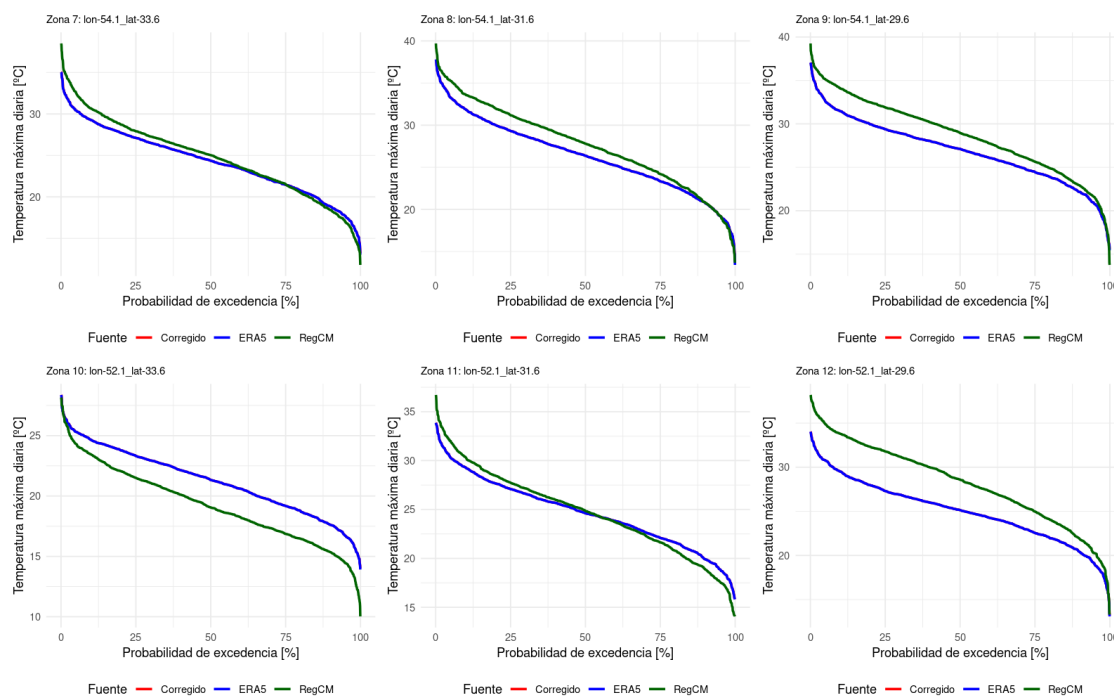


Figura 2- Curvas de permanencia de ERA5 y de RegCM5 para temperatura máxima

2.3 Estimación de caudal con redes neuronales

Para calibrar el modelo de caudal en la represa de Salto Grande se utilizan datos de reanálisis de temperatura máxima y mínima diaria y acumulados de precipitación en las ventanas 0 a 3, 3 a 7, 7 a 13, 13 a 20 y 20 a 30 días en la región del recuadro rojo de la figura 1. Con el fin de reducir el tiempo de cálculo se utilizan promedios espaciales en regiones de 5° x 5°. Se entrena el modelo con datos diarios durante el período 1974-2023.

De esta manera se entrena una red neuronal que combina capas convolucionales temporales, LSTM bidireccional, mecanismos de atención multicausal (MultiHeadAttention), integración de estadísticas globales y el día del año. Se probaron cinco configuraciones distintas, variando la arquitectura y parámetros como *dropout* y número de cabezas de atención.

3. RESULTADOS

Al utilizar datos de ERA5, el modelo alcanza un coeficiente R^2 de 0.75 en la etapa de validación. Actualmente se están generando las predicciones con las salidas corregidas de RegCM5. Aunque aún no se dispone de esos resultados, se espera una disminución en el desempeño. Sin embargo, la estructura general del caudal estacional debería mantenerse razonablemente representada.

4. CONCLUSIONES

La combinación de modelos climáticos regionales, correcciones estadísticas por cuantiles y redes neuronales profundas permite estimar caudales con un alto grado de precisión cuando se utilizan datos confiables como ERA5. Aunque el uso de modelos como RegCM5 implica mayores incertidumbres, esta metodología permite convertir información climática simulada en un producto útil para la planificación energética.

En el contexto de una matriz energética cada vez más basada en renovables, herramientas como esta pueden aportar valor para la operación y gestión eficiente del sistema eléctrico.

REFERENCIAS

Coppola, E., Giorgi, F., Giuliani, G., Pichelli, E., Ciarlo, J. M., Raffaele, F., ... & de Leeuw, J. (2024). The Fifth Generation Regional Climate Modeling System, RegCM5: the first CP European wide simulation and validation over the CORDEX-CORE domains. *Authorea Preprints*.

Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). (2025). *Uruguay vuelve a registrar niveles récord de fuentes renovables en la matriz de generación eléctrica*. Dirección Nacional de Energía. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/uruguay-vuelve-registrar-niveles-record-fuentes-renovables-matriz-generacion>

REN21. (2024). *Sistemas e Infraestructuras de Energía Renovable – Informe Global de Estado de Sistemas 2024*. Red de Políticas de Energía Renovable para el Siglo XXI. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr2024_SYSTEMS_module.pdf

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

El contenido de este artículo es responsabilidad exclusiva de sus autores y no refleja necesariamente la posición de las instituciones a las que pertenecen.