

# Habilidad de los métodos de reducción de escala para representar eventos extremos de precipitación y el impacto en los caudales del Río Uruguay

Moira E Doyle<sup>1</sup>, Gonzalo M Diaz<sup>2</sup>, Laura M Chavez<sup>2</sup>

**Resumen** El sudeste de Sudamérica está frecuentemente afectado por eventos de sequía e inundación, en este último caso asociadas a tormentas convectivas. En este trabajo se evalúa la capacidad del modelo hidrológico VIC de representar los eventos extremos de caudales en la cuenca del Río Uruguay al ser alimentado por información meteorológica resultante de aplicar una técnica de reducción de escala dinámica utilizando 2 modelos climáticos con convección permitida en una escala de 4 km de resolución espacial. Para el modelo WRF se dispusieron de dos simulaciones con configuraciones diferentes fuera de la convección permitida, mientras que para el modelo RegCM se analizaron 3 simulaciones, dos con la misma versión del modelo pero una modificación en la representación de la capa límite atmosférica y la tercera una versión anterior del modelo. La lluvia del modelo WRF\_UCAN es la que mejor representa la precipitación total diaria observada en la cuenca. Sin embargo, existen diferencias entre la magnitud y localización de los eventos de precipitación diaria en los modelos que se traducen en diferencias en el tiempo y magnitud de los picos de los caudales. En el caso del WRF\_UCAN, el modelo tiende a sobreestimar los caudales. En particular, la intensidad y distribución de la lluvia del evento de precipitación extrema generó picos mucho más extremos que los observados en Paso de los Libres.

## INTRODUCCIÓN

Los modelos climáticos globales son capaces de proporcionar información confiable en escalas de alrededor de 1000 km y cada vez menores, abarcando una gran diversidad de tipos de paisaje (montañas, llanuras, zonas costeras, ciudades, etc.) y, en consecuencia, un amplio rango de fenómenos meteorológicos y climáticos (inundaciones, sequías u otros eventos extremos). Sin embargo, la representación de fenómenos importantes a escalas más locales, como la convección, factor clave en el desarrollo de inundaciones o crecidas, no siempre es bien representada por estos modelos. Para subsanar estas deficiencias, se suelen emplear técnicas alternativas conocidas como métodos de reducción de escala. Estas técnicas incluyen enfoques tanto dinámicos como estadísticos y se utilizan cada vez más para proporcionar información climática de mayor resolución que permitan respaldar una evaluación y planificación más detallada del impacto y la adaptación. Los métodos estadísticos de reducción de escala (ESD) siguen una amplia gama de enfoques (pronóstico perfecto, estadísticas de salida del modelo, una combinación de los dos anteriores y ajuste de sesgo, generadores meteorológicos, etc.) que se aplican individualmente o en combinación para producir información regional/local a partir de datos globales o de resultados de un modelo regional. Los métodos dinámicos de reducción de escala actualmente están trabajando con modelos regionales (RCM) en resoluciones que permiten simular la convección y no utilizar parametrizaciones. Estas altas resoluciones deben ser lo suficientemente altas de modo de capturar las características principales de los eventos de precipitación extrema, como la intensidad y el ciclo diurno, para los cuales la convección es el proceso clave.

En el marco de CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) del Programa de Investigación Mundial del Clima (WCRP), se llevó adelante un Proyecto Piloto en el Sudeste de Sudamérica (SESA) (Bettolli et al., 2021) que propuso desarrollar información climática procesable a partir de técnicas de reducción de escala estadística y dinámica basada en la coproducción con la

<sup>1</sup>Universidad de Buenos Aires, CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina. Email: [doyle@cima.fcen.uba.ar](mailto:doyle@cima.fcen.uba.ar)

<sup>2</sup>Servicio M Nacional, Buenos Aires, Argentina.

comunidad de impacto y usuarios. En este trabajo se presenta la evaluación de la representación de la precipitación por parte de las técnicas de reducción de escala dinámicas en la cuenca del Río Uruguay y cómo esta información contribuye a mejorar la representación de los caudales utilizando un modelo hidrológico.

## DATOS Y METODOLOGÍA

Para este trabajo se contó con información meteorológica de un total de 5 simulaciones utilizando 2 modelos regionales: RegCM (Giorgi et al., 2012) y WRF (Skamarock et al., 2019). Asimismo, se utilizaron 2 versiones del modelo RegCM. Con la versión 5, el International Centre for Theoretical Physics (ICTP) realizó 2 simulaciones que difieren en el tipo de parametrización usada para la capa límite atmosférica (PBL), mientras que la Universidad de Sao Paulo (USP) realizó una simulación con la versión 4.7 del modelo. Por otra parte, la Universidad de Cantabria (UCAN) realizó una simulación utilizando el modelo WRF. En todos los casos, los modelos fueron forzados por los reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020) y se integraron con una resolución horizontal de 4 km desde junio 2018 hasta mayo 2021 en un dominio que cubría el centro-sudeste ( $\approx 15^{\circ}$ - $35^{\circ}$  S) de Sudamérica. Asimismo, se dispuso de una segunda simulación con el modelo WRF provista por NCAR a través del South America Affinity Group (WRF-SAAG) (Dominguez et al., 2024). En todas las simulaciones los modelos fueron versiones con convección permitida.

Durante estos tres años simulados se desarrollaron y persistieron condiciones extremadamente secas en la cuenca, con un alto impacto en los recursos hídricos de la región, incluidos caudales muy bajos. No obstante, también se observaron eventos de precipitación extrema durante los meses cálidos, lo que hace que este período sea particularmente interesante para estudiar los caudales extremos mediante modelación hidrológica.

Dentro del SE de Sudamérica (SESA), la región seleccionada para el estudio es la cuenca del Río Uruguay. Para la simulación de los caudales se utilizó el modelo hidrológico semi-distribuido Variable Infiltration Capacity (VIC) (Liang et al., 1994, 1996; Nijssen et al., 2001) para obtener el balance de agua en cada punto de retícula de la cuenca y un modelo de ruteo para simular las descargas o caudales de ríos y arroyos en la cuenca. Las simulaciones de caudal se realizaron a paso diario utilizando como variables de entrada precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima provenientes de la red de estaciones del SMN (experimento control), de las 5 simulaciones de RCM para el periodo de tiempo de las simulaciones RCM y con los reanálisis ERA5. El modelo está configurado para trabajar sobre una grilla de  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ , por lo tanto, todas las variables fueron interpoladas a esta retícula aplicando la técnica bilineal en el caso de los modelos y kriging para las observaciones de estaciones meteorológicas. Se seleccionaron 7 puntos de aforo a lo largo de todo el río que disponían de registros largos de caudal diario. Dos estaciones en la naciente del Río Uruguay, una sobre el río Canoas y otra en el río Pelotas, y una tercera estación Iraí en la cuenca alta en territorio brasileño. Las cuatro restantes se encuentran sobre el margen argentino y son de norte a sur El Soberbio, Garruchos, Paso de los Libres y Concordia. Solo se presentarán resultados para la cuenca entera y para la estación Paso de los Libres.

La habilidad de los modelos con convección permitida para capturar la precipitación areal en la cuenca se midió usando 5 estadísticos categóricos (Wilks, 1995): la probabilidad de detección ( $POD=A/(A+C)$ ), que se define como el cociente entre los aciertos (A) y la suma de aciertos más desaciertos (C). Se considera que 1 es el mejor resultado del índice POD. La tasa de falsas alarmas ( $FAR=B/(A+B)$ ), definido como el cociente entre las falsas alarmas (B) y la suma de aciertos y falsas alarmas. En este caso el mejor resultado es 0. El índice BIAS, definido como el cociente entre eventos detectado y eventos ocurridos ( $BIAS=(A+B)/(A+C)$ ), donde los valores mayores a 1 indican que se registra un mayor número de falsas alarmas que desaciertos. El índice de éxito crítico (Critical Success Index) definido como el cociente entre los aciertos y la suma de aciertos, falsas alarmas y desaciertos ( $CSI=A/(A+B+C)$ ). Cuando CSI es 1 no se detectaron falsas alarmas ni desaciertos. Finalmente se

utilizo el coeficiente de correlación de Pearson (Corr).

## RESULTADOS

### Representación de la precipitación

La habilidad de los modelos utilizando convección permitida y del reanálisis ERA5 de representar la precipitación observada en la cuenca fue evaluada utilizando índices categóricos. Los resultados que se presentan en la Tabla 1 en general muestran una alta probabilidad de detección de eventos con una baja tasa de falsas alarmas y, en general, un mayor número de desaciertos que falsas alarmas. El modelo de NCAR y RegCM\_PBL2 son los que presentan menor performance, mientras que la precipitación generada por el modelo WRF de la Universidad de Cantabria sobre la cuenca del Uruguay es la que mejor se correlaciona con la precipitación observada en la red del SMN.

Al comparar los valores medios, medianas, percentiles y extremos de la precipitación mayor a 1mm simulada con la observada (Tabla 1), algunos modelos subestiman la media y la mediana y tienen valores extremos menores a los observados, reduciendo la variabilidad de la precipitación. En particular los estadísticos de los modelos RegCM presentan valores un poco menores a los parámetros de las estaciones, mientras que los del modelo WRF\_UCAN son los que más se asemejan a las observaciones. Un análisis a nivel subcuenca (no mostrado) indica que, si bien los modelos difieren en la cantidad total de precipitación generada, la distribución de los totales en las subcuencas es similar. Por lo tanto, es esperable que las simulaciones de caudales presenten un abanico de soluciones debido a estas diferencias en la simulación de la precipitación.

**Tabla 1.** Estadísticos categóricos entre la precipitación total diaria observada en la cuenca del Río Uruguay y la simulada por cada modelo. Valores de Boxplot para la precipitación > 1mm.

	WRF_UCAN	RegCM_USP	RegCM_PBL1	RegCM_PBL2	NCAR	ERA5	SMN
POD	0.759	0.776	0.764	0.609	0.622	0.772	
FAR	0.130	0.160	0.151	0.089	0.141	0.136	
BIASS	0.872	0.924	0.899	0.669	0.724	0.893	
CSI	0.682	0.676	0.673	0.575	0.564	0.688	
CORR	0.61	0.55	0.59	0.48	0.52	0.64	
Máximo	396.6	282.4	319.4	285	376.7	278.9	395.7
P75	68.8	48.3	45.6	49.2	50.3	58.5	63.9
Media	50.3	37.5	36.7	35.3	38.5	43.4	41.7
Mediana	22.9	18.1	20.2	14.6	17.9	24.7	23.1
P25	6.7	4.8	5.7	4.5	4.4	6.7	5.9

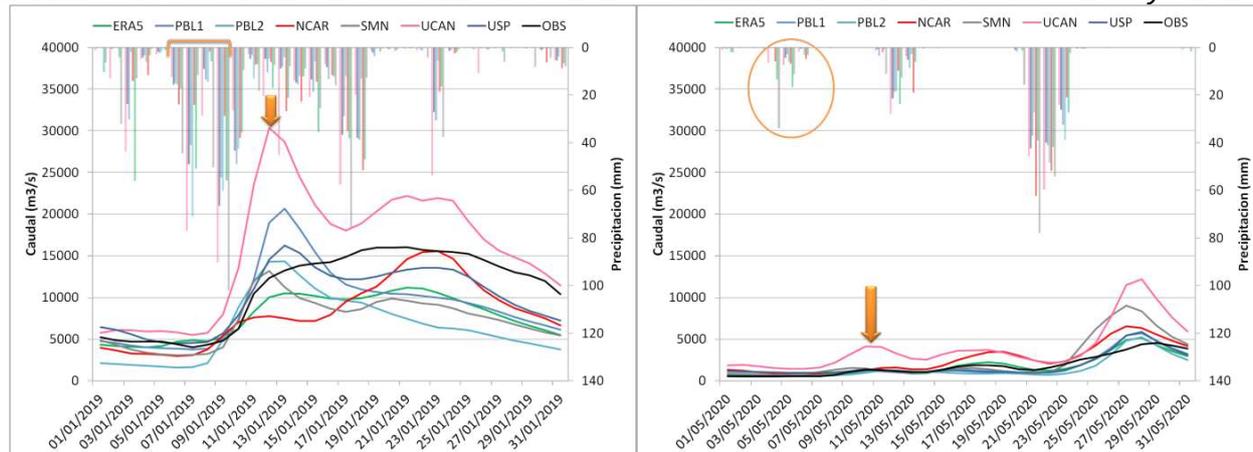
### Caudales simulados

Un análisis de boxplot (no mostrado) de los caudales simulados en Paso de los Libres por el modelo VIC alimentado con los distintos forzantes indica que el valor medio y la mediana en general están bien representados; sin embargo, el rango intercuartil suele ser menor que el observado y las simulaciones VIC generan mayor número de valores outliers que los observados. En particular, los caudales simulados con el modelo RegCM\_PBL2 son los que presentan menores valores en todos los estadísticos del boxplot, mientras que el modelo WRF\_UCAN sobreestima todos los parámetros. Este último es el que presentaba mayores estadísticos en la precipitación y más semejantes a las observaciones, sin embargo, los resultados del boxplot para los caudales en Paso de los Libres de WRF\_UCAN sobreestiman considerablemente a los de SMN. Podemos considerar que las simulaciones con VIC representan adecuadamente la media y la variabilidad de los caudales en Paso de los Libres, si bien los valores extremos pueden ser sobre/subestimados.

Se seleccionaron dos eventos para un estudio más detallado de la representación de los caudales

**Máximo Observado: 16018 m<sup>3</sup>/s 21-enero-2019**

**Mínimo Observado: 553m<sup>3</sup>/s 2-mayo-2020**



**Figura 1.** Izquierda: evento de crecida observado en Paso de los Libres (negro) en enero 2019 y las simulaciones del modelo VIC forzadas con las salidas de RCM y datos de ERA5 y de la red observaciones del SMN. Derecha: idem izquierda pero para la bajante de caudales de mayo de 2020. Las flechas naranjas indican fechas donde los caudales han sido sobreestimados por el modelo WRF\_UCAN. Las líneas representan los caudales simulados y observados mientras que las barras señalan los valores diarios observados y simulados de precipitación acumulada en toda la cuenca del Río Uruguay.

por los distintos forzantes. El primero de los casos es la crecida observada en Paso de los Libres en enero 2019. Los caudales se mantuvieron elevados durante varios días consecutivos, alcanzando el valor más elevado de 16018 m<sup>3</sup>/s el 21 de enero. La Figura 1 (izquierda) presenta la simulación de este evento por el modelo VIC con los distintos forzantes y los caudales observados en Paso de los Libres. El segundo evento es una bajante del Río Uruguay en la ciudad de Paso de los Libres durante los meses de abril - mayo 2020. El menor valor que se observó en la estación se registró el día 2 de mayo alcanzando 553 m<sup>3</sup>/s.

El modelo WRF\_UCAN es el que presenta los mayores caudales en ambos eventos, superando tanto a las simulaciones como a las observaciones. Durante el evento de crecida las observaciones muestran un sostenimiento en el tiempo de aproximadamente 20 días de los valores altos. Las simulaciones en cambio alcanzan un pico entre el 12 y 13 de enero, luego un descenso marcado de los caudales hasta aproximadamente el 17 de enero. Los modelos WRF\_UCAN, RegCM\_USP, ERA5 y las observaciones de SMN generan un segundo aumento a partir del día 18, de magnitudes diversas, siendo WRF\_UCAN el que tiene los valores más altos en todo este tiempo. Es notoria la representación del caudal que surge de los datos de WRF\_NCAR, ya que no presenta un doble máximo, sino un único pico después del día 18. Este modelo llega a alcanzar un valor extremo muy similar al observado pero la crecida es mucho más breve que lo que muestran los caudales observados.

Las barras de la Figura 1 indican la precipitación registrada en la cuenca durante cada día del mes de enero 2019. Se evidencia la variabilidad entre modelos en la cantidad de precipitación generada, como también en los momentos en que se alcanzan los valores más altos. Sin embargo, este gráfico no termina de explicar las diferencias entre los caudales y porque el modelo WRF\_UCAN genera un pico tan elevado el 12 de enero. Las precipitaciones más abundantes que pudieron dar origen a este pico de caudal se observan entre el 6 y el 9 de enero.

La Tabla 2 presenta los valores totales de precipitación generados por cada modelo del 6-9 de enero 2019 y el total de los 4 días. El valor de precipitación está calculado como la suma de la precipitación en cada punto de grilla de la cuenca del Uruguay. Es interesante ver que la precipitación acumulada en 4 días más alta, dada por el modelo WRF es bastante similar a la de las estaciones, sin embargo, la distribución a lo largo de los días difiere sensiblemente. Mas aun, al ver como se distribuyeron las precipitaciones espacialmente en la cuenca, las lluvias observadas se produjeron en casi partes

iguales entre la cuenca media y la cuenca baja, mientras que el modelo WRF\_UCAN genero el 60 % de las precipitaciones en la cuenca media. Considerando las mayores precipitaciones de WRF\_UCAN y su mayor concentración en la cuenca media, es esperable que los valores de caudales resultantes en Paso de los Libres sean superiores a los producidos utilizando las observaciones.

**Tabla 2.** Precipitación total generada por cada modelo/conjunto de datos que resulta de la suma de la precipitación en cada punto de grilla de la cuenca para un día (6-9 enero 2019). Las tres últimas columnas indican en porcentaje la distribución de la lluvia total en las 3 subcuencas del Uruguay para cada simulación.

FORZANTE	06/01/2019	07/01/2019	08/01/2019	09/01/2019	Precipitación total 4 días	% 4 días en cuenca alta	% 4 días en cuenca media	% 4 días en cuenca baja
WRF_UCAN	16 418	68 333	28 768	66 048	179 567	17	60	23
REGCM_USP	14 824	40 078	15 783	48 305	118 990	15	58	26
ICTP_PBL1	14 813	34 720	21 147	42 231	112 911	13	64	23
ICTP_PBL2	27 895	54 971	18 355	44 619	145 840	16	62	22
WRF_NCAR	22 486	26 507	4264	23 716	76 973	23	48	30
ERA5	13 858	42 310	9486	40 846	106 500	13	55	32
Est. SMN	35 005	13 809	38 188	77 177	164 179	8	47	45

El evento de bajante es simulado adecuadamente por todos los forzantes, sin embargo, WRF\_UCAN sigue presentando valores por encima de las otras simulaciones y las observaciones. Es notorio el pico que se observa en el caudal de WRF\_UCAN entre el 10 y 11 de mayo. Se puede observar en la Figura 1 (derecha) que unos días previos se registraron precipitaciones que incluso son superiores a los valores generados por los modelos (Tabla 3), sin embargo, el caudal en Paso de los Libres simulado con observaciones no presenta el comportamiento del modelo WRF\_UCAN. Se puede concluir que los modelos generan la precipitación en los mismos momentos que las observaciones y la distribución espacial de los eventos también difiere de la observada lo que terminan impactando en la producción de caudales en la cuenca, y el comportamiento temporal de los mismos.

**Tabla 3.** Idem Tabla 2 para los días 4-6 mayo 2020 donde WRF presenta un pico de caudal.

FORZANTE	Precipitación 04/05/2020	Precipitación 05/05/2020	Precipitación 06/05/2020	Precipitación total 3 días	% 3 días en cuenca alta	% 3 días en cuenca media	% 3 días en cuenca baja
WRF_UCAN	11 121	13 763	4248	29 132	68	29	3
REGCM_USP	755	8298	1210	10 263	79	21	0
ICTP_PBL1	190	5588	1013	6791	89	11	0
ICTP_PBL2	81	10 703	6898	17 682	74	26	0
WRF_NCAR	4589	9649	9798	24 036	53	38	9
ERA5	10 153	15 099	5870	31 122	31	49	20
Est. SMN	29 452	12 071	42	41 565	26	44	30

## CONCLUSIONES

La evaluación de la habilidad de los modelos con convección permitida de representar la precipitación dentro de la cuenca del Río Uruguay indica que en general todos los modelos llegan a representar adecuadamente los montos de esta variable. En particular, el modelo WRF\_UCAN presenta los mayores valores extremos y la mayor variabilidad en la precipitación, siendo similares a los valores observados, lo que se refleja también en el mayor coeficiente de correlación. Esto lleva a que en general las condiciones en la cuenca sean más húmedas en las simulaciones generadas con el modelo VIC forzado por el WRF\_UCAN y, por lo tanto, un flujo base más elevado en todo el período. Por otra parte, las diferencias entre la magnitud y localización de los eventos de precipitación en los modelos se traducen en diferencias en el tiempo y magnitud de los picos de los caudales como se observó en Paso de los Libres.

## REFERENCIAS

- Bettolli, M. L., Solman, S. A., da Rocha, R. P., Llopart, M., Gutierrez, J. M., Fernández, J., Olmo, M. E., Lavin-Guillon, A., Chou, S. C., Carneiro Rodrigues, D., Coppola, E., Balmaceda Huarte, R., Barreiro, M., Blázquez, J., Doyle, M., Feijó, M., Huth, R., Machado, L., & Vianna Cuadra, S. (2021). The CORDEX Flagship Pilot Study in southeastern South America: A comparative study of statistical and dynamical downscaling models in simulating daily extreme precipitation events. *Climate Dynamics*, 56, 1589–1608. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05549-z>
- Dominguez, F. *et al.* (2024). Advancing South American water and climate science through multidecadal convection-permitting modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105, E32–E44. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0226.1>
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G., Nair, V., Giuliani, G., *et al.* (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52, 7–29. <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., *et al.* (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Liang, X. *et al.* (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 99, 14415–14428.
- Liang, X., Wood, E., & Lettenmaier, D. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modifications. *Global and Planetary Change*, 13, 195–206. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1)
- Nijssen, B. *et al.* (2001). Predicting the discharge of global rivers. *Journal of Climate*, 14, 3307–3323.
- Skamarock, C., Klemp, B., Dudhia, J., Gill, O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, G., Duda, G., Barker, D., & Huang, X. (2019). A description of the Advanced Research WRF Model Version 4. *Technical report*. <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- Wilks, D. S. (1995). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. Academic Press.