

# EVALUACIÓN DE SIMULACIONES HISTÓRICAS DE LOS MODELOS DEL CMIP6 Y PROYECCIONES FUTURAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN LA ZONA NÚCLEO DE CULTIVOS DE ARGENTINA

M. Sol Wilhelm<sup>1</sup>, Miguel A. Lovino<sup>1,2</sup>, Gabriela V. Müller<sup>1,2</sup>, M. Josefina Pierrestegui<sup>1,2</sup>  
msolwilhelm@gmail.com. Autora correspondiente.

<sup>1</sup>Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral (CEVARCAM-FICH-UNL)

<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

**Palabras clave:** cambio climático, Modelos de Circulación General (GCMs), Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSPs).

## 1) INTRODUCCIÓN

La zona núcleo agrícola ganadera de Argentina concentra la mayor parte de la producción agroindustrial del país, por lo que tiene una gran importancia económica y demográfica en Sudamérica y es clave para la seguridad alimentaria de la región y el mundo. Las actividades agroindustriales llevadas a cabo están influenciadas por el complejo sistema de recursos hídricos superficiales de la cuenca inferior del río Paraná, donde se concentran los mayores centros urbanos del país. La conjunción de estos factores hace que la región tenga una alta exposición y vulnerabilidad a los eventos hidrológicos extremos.

Considerando la magnificación de los eventos extremos observados y sus impactos en la región núcleo agrícola ganadera de Argentina (Lovino et al., [2018a](#)), surge la necesidad de mejorar los sistemas de gestión del riesgo climático que enfrenta la región actualmente. Esta mejora requiere una investigación más profunda sobre habilidad de los Modelos de Circulación General (GCMs) para simular el clima histórico y, además, analizar proyecciones de precipitación y temperatura en el siglo XXI, con el objetivo de asistir a los tomadores de decisiones y proporcionar información con base científica para la elaboración de políticas públicas orientadas a aumentar la resiliencia de la región ante desastres de origen hidrológico.

Este trabajo investiga la habilidad de una selección de GCMs de la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) para representar el clima medio histórico y actual, y su variabilidad en esta región. Las variables climáticas estudiadas son la precipitación anual y la temperatura media anual. Además, se realizan proyecciones de estas variables en escenarios integrados de desarrollo socio-económico y de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

## 2) METODOLOGÍA

La región de estudio (Fig. 1), delimitada por las coordenadas lat  $-36^{\circ}$ - $26^{\circ}$  y lon  $-65^{\circ}$ - $58^{\circ}$ , comprende un área de 741.126 km<sup>2</sup> y abarca la totalidad de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos, gran parte de Córdoba y Santiago del Estero, norte de Buenos Aires y La Pampa, este de Corrientes y sur de Chaco. Además de contener un alto porcentaje de la población, es conocida como la región núcleo de cultivos del país, cuya producción agrícola está orientada principalmente al cultivo de soja, maíz y girasol. Según la clasificación climática de Köppen-Geiger (Beck et al. [2018](#)), el clima de la región es templado, sin estación seca y con veranos cálidos.

La habilidad de los modelos se investiga contrastando los ciclos anuales medios y los patrones espaciales de precipitación y temperatura con las observaciones (CRU TS 4.5, Harris et al., [2020](#)). Además, se evalúa el rendimiento de los GCMs con métricas estadísticas: el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el error medio (MBE) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), usados en Lovino et al. ([2018b](#)). Los resultados se evalúan para los modelos individuales y para ensambles multimodelos.

En cuanto a las proyecciones futuras, CMIP6 contiene un grupo de escenarios de desarrollo conocidos como Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSPs, Riahi et al., [2016](#)). Los SSPs describen probables cambios alternativos en aspectos sociales, que incluyen factores demográficos, económicos,

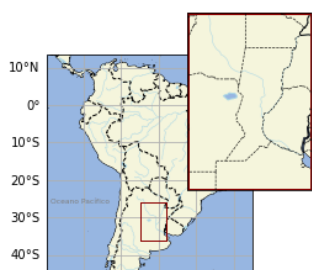


Fig 1 – Región de estudio indicada en mapa da Sudamérica. En el mapa ampliado se observan las provincias argentinas comprendidas en la región.

tecnológicos, de gobierno y ambientales. Dentro de los SSPs, se distinguen cinco escenarios de desarrollo socioeconómico alternativos: el desarrollo sostenible (SSP1), el desarrollo intermedio (SSP2), la rivalidad regional (SSP3), la desigualdad (SSP4) y el desarrollo alimentado con combustibles fósiles (SSP5). Los SSP se combinan con proyecciones de modelos climáticos basadas en los cuatro Escenarios de Concentraciones Representativas (RCP, por su sigla en inglés, van Vuuren et al., 2011), que utilizan los niveles de forzamiento radiativo de 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m<sup>2</sup>. Finalmente, la fase de integración reúne las simulaciones climáticas y los futuros sociales basados en los SSPs. En este trabajo, se construyen y analizan los escenarios de precipitación y temperatura del clima futuro de corto (2021-2040), mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100) utilizando tres de los escenarios combinados: SSP1-2.6, que combina el desarrollo sostenible y la mitigación de las emisiones de GEI; SSP2-4.5, que combina el desarrollo intermedio y la estabilización de las emisiones de GEI; y SSP5-8.5, que combina el desarrollo propiciado por combustibles fósiles y las altas emisiones de GEI.

Se generan las series medias areales de temperatura y precipitación combinando las simulaciones históricas entre 1901-2014 y las proyecciones futuras entre 2015-2100, previa corrección de los sesgos de los modelos con un método de escalamiento local (Maraun et al., 2010). Este método utiliza un factor de escalamiento (Eq. 1) definido como el cociente entre el valor medio observado,  $\bar{y}_{obs}^p$ , y el valor medio simulado de la variable,  $\bar{x}_{mod}^p$  en el periodo histórico de análisis, p. La variable corregida para el paso de tiempo i,  $y_i^p$ , se determina como el producto de la variable modelada para el paso de tiempo i,  $x_{mod,i}^p$ , y el factor de escalamiento. La misma corrección se realiza para la variable futura, f, siendo la variable futura corregida y la variable futura modelada para el paso de tiempo i  $y_i^f$  y  $x_{mod,i}^f$ , respectivamente.

$$y_i^p = x_{mod}^p \frac{\bar{y}_{obs}^p}{\bar{x}_{mod}^p} \quad (1)$$

### 3) RESULTADOS

#### Validación de modelos

El análisis del ciclo medio anual de temperatura (Fig. 2a) muestra que el ensamble de los 16 GCMs estudiados reproduce correctamente las observaciones históricas. La temperatura media areal es sobreestimada 2°C por el ensamble multimodelo corregido en el verano austral. El rango intermodelo se reduce de un valor medio de 6.9 °C a 2.8 °C al eliminar los errores sistemáticos, demostrando una corrección eficiente. Las métricas de temperatura media muestran una correlación de Pearson (r) superior a 0.95 y bajos rangos de errores (0.11 < MBE < 5.71; 1.20 < MAE < 5.71, 1.51 < RMSE < 6). Estos rangos de errores se reducen significativamente al aplicar el factor de corrección (1.02 < MAE\* < 2.10, 1.29 < RMSE\* < 2.51; donde \* indica el error con el factor de corrección).

Los resultados indican que los modelos analizados y su ensamble son capaces de simular adecuadamente la temperatura media, aunque con diversas habilidades. El ensamble presenta las mejores métricas estadísticas, r= 0.97, MAE\*=1.08, RMSE\*=1.36 y NSE= 0.92, indicando alta bondad en el ajuste a los valores observados.

En cuanto a la precipitación media anual, se emplea un ensamble de 16 modelos que mejora su rendimiento considerablemente luego de la corrección. El ensamble multimodelos representa la precipitación con mayor incertidumbre en los meses de verano e invierno austral, donde el rango intermodelos es mayor (Fig. 2b). El ensamble ajusta aceptablemente los datos, aunque subestima la precipitación desde enero a abril. El máximo valor de discrepancia tiene lugar en marzo y es de 35 mm para la serie sin corregir, disminuyendo a 27 mm luego de la corrección. En cuanto a las métricas obtenidas para precipitación, los rangos de errores son 7.38 < MBE < 21.17, 21.64 < MAE < 38.36, y 28.97 < RMSE < 48.28. Nuevamente, se reducen al aplicar el factor de corrección (21.46 < MAE\* < 30.48, 27.83 < RMSE\* < 39.41).

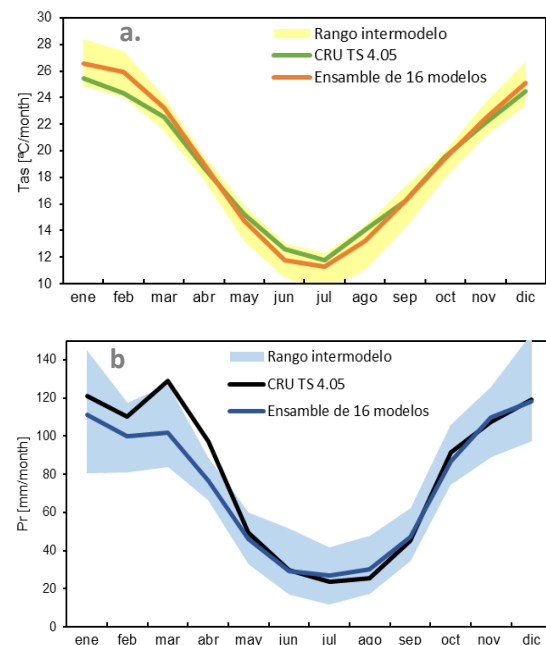


Fig 2 – Ciclo anual medio de temperatura para valores observados y para el ensamble de la serie corregida (a). Ciclo anual medio de precipitación para valores observados y para el ensamble de la serie corregida (b). En ambas graficas se muestra el rango intermodelo.

Al igual que para temperatura, el patrón de comportamiento espacial de la variable es representado correctamente tanto por el ensamble como por los modelos. Como consecuencia de ello, al aplicar el factor de corrección el ajuste mejora y los errores disminuyen. Las métricas para el ensamble multimodelos son:  $r = 0.76$ ,  $MAE^* = 21.46$  mm/mes,  $RMSE^* = 27.83$  mm/mes y  $NSE^* = 0.58$ , indicando un aceptable ajuste a los valores observados.

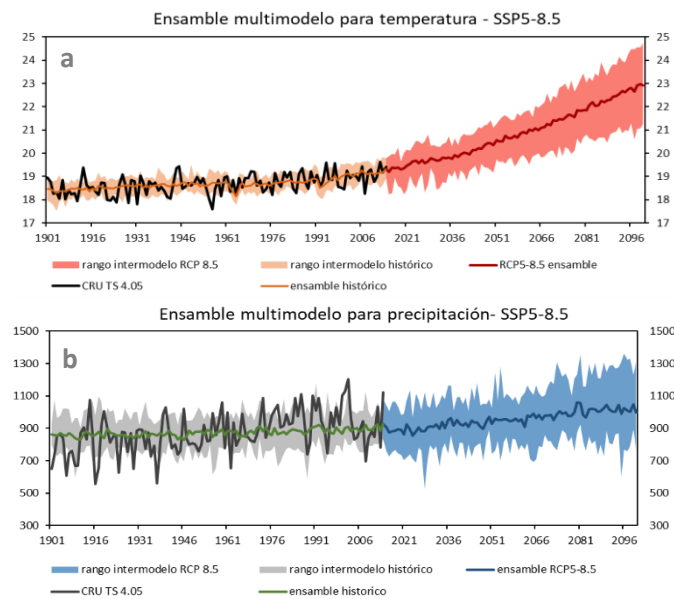


Fig 3 – Serie anual histórica y proyectada en el escenario SSP 5-8.5 para temperatura (a) y precipitación (b)

combina el desarrollo propiciado por combustibles fósiles y las altas emisiones de GEI, la tendencia de aumento se mantiene constante en todo el período proyectado (ver Fig. 3a).

En cuanto a la precipitación anual, se tiene una tasa de aumento menor, pero aun así relevante en los tres escenarios analizados. Comparando el valor medio de precipitación de la serie histórica 1901-2014 y las series futuras 2015-2100, se proyecta un aumento medio de 50 mm para el escenario SSP1-2.6, de 53 mm para el escenario SSP2-4.5 y de 81 mm para el escenario SSP5-8.5. En los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, el aumento se incrementa en los períodos de corto, mediano y largo plazo. Para el escenario de desarrollo sostenible y bajas emisiones la tasa de aumento se estabiliza en el periodo 2081-2100.

#### 4) REFERENCIAS

- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). *Data Descriptor: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution*. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 2020 7:1, 7(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Berbery, E. H., & Müller, G. V. (2018a). How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina? *Global and Planetary Change*, 168, 78-97. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2018.06.008>
- Lovino, M. A., Müller, O. V., Müller, G. V., Sgroi, L. C., & Baethgen, W. E. (2018b). Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3155-3174. <https://doi.org/10.5194/HESS-22-3155-2018>
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., et al. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., et al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.009>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, et al. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5-31. <https://doi.org/10.1007/S10584-011-0148-Z/TABLES/4>

#### Proyecciones en escenarios integrados

La Figura 3 muestra la serie anual de precipitación y temperatura histórica y proyectada en el escenario SSP5-8.5. En este escenario, la temperatura media anual para el año 2100 se proyecta igual a 22.9 °C, 3.5 °C por encima de la media observada en 2014, 19.4 °C. En los escenarios SSP1-2.6 y SSP2-4.5 este aumento es de 0.56 °C y 1.28 °C, respectivamente. En el escenario SSP1-2.6, que combina el desarrollo sostenible y la mitigación de las emisiones de GEI, el aumento de temperatura se estabiliza en torno al año 2060, mostrando una leve tendencia decreciente luego del 2080. En el escenario SSP2-4.5, que combina el desarrollo intermedio y la estabilización de las emisiones de GEI, la estabilización se alcanza llegando al 2100. Finalmente, para el escenario SSP5-8.5, que