



Asociación de Universidades  
GRUPO MONTEVIDEO



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Predicción estadística de la precipitación de primavera en la subcuenca superior del río Bermejo

Sabrina N. Ayala <sup>a</sup>, Eugenia M. Garbarini <sup>b</sup>, Paula C. Oliveri <sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Universidad de Buenos Aires – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/UBA-CONICET), Argentina, [sabrina.ayala@cima.fcen.uba.ar](mailto:sabrina.ayala@cima.fcen.uba.ar).*

<sup>b</sup> *Universidad de Buenos Aires, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO/FCEN/UBA), Argentina, [eugenia.mg23@gmail.com](mailto:eugenia.mg23@gmail.com).*

<sup>c</sup> *Universidad de Buenos Aires, Facultad de Cs. Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO/FCEN/UBA), Argentina, [poliveri@at.fcen.uba.ar](mailto:poliveri@at.fcen.uba.ar).*

**RESUMEN:** La variabilidad interanual de la precipitación afecta notablemente los aspectos ambiental, social y económico en la subcuenca superior del río Bermejo, ubicada en el norte argentino. El objetivo de este estudio es hallar los posibles forzantes de dicha variabilidad para el trimestre septiembre-octubre-noviembre. Además, se propone construir modelos de regresión lineal múltiple que permitan estimar la precipitación areal de primavera en la región, empleando predictores con un mes de antelación. Los resultados destacan la importancia de la intensidad y posición de los sistemas de latitudes bajas y medias, así como de la temperatura superficial del mar sobre el océano Pacífico, y del flujo de humedad hacia la región de estudio como fuentes de predictibilidad en la subcuenca superior. El buen desempeño de los modelos alienta a continuar el análisis en años fuera del período de estudio y para otros trimestres del año.

**PALABRAS CLAVE:** Bermejo, predicción estadística, forzante, precipitación.

## 1 INTRODUCCIÓN

La Cuenca del río Bermejo forma parte de la Cuenca del Plata, y es compartida por el norte de Argentina y el sur de Bolivia. Algunos de los factores que determinan la circulación regional media sobre la Cuenca son la Cordillera de los Andes, que en latitudes subtropicales inhibe el ingreso de humedad desde el océano Pacífico por su altura [1], el anticiclón del Atlántico Sur, y un sistema de baja presión termo-orográfico denominado Depresión del Noroeste Argentino, intermitente a lo largo del año pero más intenso y duradero en primavera y en verano [2]. El clima en la zona donde se ubica la Cuenca es subtropical, y el ciclo anual de precipitación presenta un mínimo en invierno que se intensifica hacia el noroeste [3].

En el aspecto hidrológico, la Cuenca se subdivide según sus características geomorfológicas en Alta Cuenca (compartida entre Bolivia, y parte de las provincias argentinas Salta y Jujuy) y Baja Cuenca (comprendida por el extremo este de Salta, y parte de las provincias argentinas Formosa y Chaco). La Cuenca presenta un régimen hidrológico pluvial, con máximos caudales en el período estival [4]. La economía del área se basa principalmente en la agricultura y la ganadería, junto con una producción industrial primaria. Las actividades agrícolas intensivas en la segunda mitad del siglo XX redujeron la infiltración y agravaron el proceso natural de erosión del suelo [5], especialmente en la Alta Cuenca debido a la pendiente y a la estructura del suelo, incrementando la probabilidad de inundaciones y deslizamientos de tierra en la época estival. Existen diversos factores que pueden modificar la situación hídrica de la región. Numerosos estudios se han enfocado en

analizar el impacto de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) en la precipitación del sur de Sudamérica [6, 7], así como de la temperatura superficial del mar de los océanos Atlántico e Índico [8, 9]. Otros patrones de circulación que podrían impactar en la situación hídrica incluyen al monzón sudamericano [10, 11] y al Modo Anular del Sur [12, 13].

Debido al impacto que la variabilidad interanual de la lluvia puede ejercer sobre las actividades económicas y sociales en el norte argentino, resulta necesaria la elaboración de pronósticos estacionales de lluvia que permitan un manejo más eficiente de los recursos. Este análisis se vuelve particularmente relevante para la Alta Cuenca del Bermejo, donde el riesgo de inundaciones es alto en la época lluviosa. En consecuencia, este estudio se enfoca en la parte argentina de la Alta Cuenca, cuyos límites geográficos fueron tomados según la definición de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica (Argentina) y que será referida como la subcuenca superior del Bermejo (BS). Los objetivos de este trabajo son hallar los forzantes climáticos que influyen en la variabilidad de la precipitación para el trimestre septiembre-octubre-noviembre (SON) y, a partir de los predictores encontrados en el mes de agosto previo, diseñar un conjunto de modelos estadísticos de predicción de la lluvia a nivel areal. La decisión de elaborar modelos de pronóstico para la primavera radica en que, dado que el verano es la época de lluvia predominante, una primavera lluviosa previa puede generar condiciones muy favorables para la producción de inundaciones y desbordes del río.

## 2 DATOS Y METODOLOGÍA

Se emplearon datos de precipitación acumulada mensual en 1981-2010 de 7 estaciones meteorológicas ubicadas en el BS (Figura 1a). Los datos fueron provistos por diversas instituciones argentinas: el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica (SIPH), la Comisión Regional del Río Bermejo (COREBE), y la Administración provincial del Agua de Chaco (APA). Se realizó un control de calidad de datos considerando únicamente las estaciones con menos del 10% de datos faltantes en el período de estudio, los cuales fueron completados con la precipitación mensual media de la estación. Debido a que se propone realizar un pronóstico estacional areal para primavera, se obtuvo la serie de precipitación media areal promediando la lluvia mensual en septiembre, octubre, y noviembre de las estaciones en el BS, y sumando los promedios resultantes en cada año. La media climatológica del período de análisis fue removida para obtener la serie de anomalías de precipitación en SON.

Con el objetivo de encontrar los patrones de circulación troposférica y de temperatura superficial del mar que podrían actuar como fuentes de predictibilidad de la precipitación, se construyeron campos de correlación lineal desfasada entre las series de anomalías de precipitación en SON del BS y diversas variables obtenidas a partir del reanálisis del NCEP-NCAR [14] en el mes de agosto previo a la primavera: temperatura superficial del mar (TSM), altura geopotencial en diversos niveles de presión (1000, 700, 500, y 250 hPa), las componentes zonal y meridional del flujo en 250 hPa y 850 hPa, la radiación de onda larga saliente (OLR) y el agua precipitable. Correlaciones con valor absoluto mayor a 0.37 fueron consideradas estadísticamente significativas con 95% de confianza usando un test T.

A partir de la significancia estadística y de la relación física entre las variables potencialmente predictoras y la precipitación en primavera, se construyeron diferentes sets de predictores linealmente independientes para el desarrollo de modelos de predicción estadística de la lluvia. Dicha independencia lineal se logró combinando predictores de forma tal que la correlación de Pearson entre dos elementos cualesquiera del set fuera no significativa para el tamaño de la muestra considerada. Para cada set considerado se realizó un ajuste por cuadrados mínimos, y posteriormente para cada ecuación obtenida se calcularon el coeficiente de determinación ajustado ( $AdjR^2$ ) (1) y el error de cross-

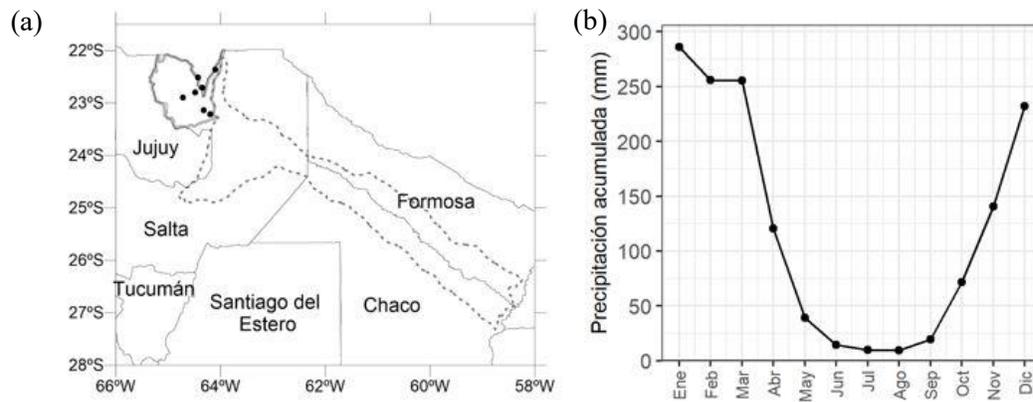


Figura 1. Descripción del área de estudio. (a) Ubicación de las estaciones en el BS (puntos), límites de la parte argentina de la Cuenca (contorno punteado), y límites del BS (contorno gris grueso). (b) Ciclo medio anual de precipitación areal en el BS.

validación ( $eCV$ ):

$$Adj R^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N-1}{N-k-1} \quad (1)$$

$$eCV = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^* - y_i)^2} \quad (2)$$

donde  $R^2$  es el coeficiente de determinación usual,  $N$  es la cantidad de datos,  $k$  es la cantidad de predictores del modelo,  $y_i$  es el  $i$ -ésimo predictando, y  $y_i^*$  es la  $i$ -ésima predicción surgida de la cross-validación de un elemento [15]. Dentro de cada set de predictores, se determinó el mejor modelo seleccionando a aquel que explicara más del 45% de la variabilidad de las observaciones (es decir,  $AdjR^2 \geq 0.45$ ) y que tuviera el mínimo valor de  $eCV$ . Por último, se calcularon distintos parámetros de skill de los modelos elegidos: la probabilidad de detección, definida como la probabilidad de que un evento sea correctamente pronosticado, y la tasa de falsa alarma, definida como la probabilidad de que un evento no observado sea erróneamente pronosticado. El modelo ideal presenta una probabilidad de detección igual a 1 y una tasa de falsa alarma nula. El skill de los modelos fue evaluado en base a la serie de cross-validación y en relación a la habilidad de los modelos de pronosticar eventos subnormales (anomalías de precipitación menores al primer tercil climatológico), sobrenormales (anomalías de precipitación mayores al segundo tercil climatológico), y normales (anomalías de precipitación entre el primer y segundo tercil).

### 3 RESULTADOS

En la Figura 1b se presenta la marcha media anual de precipitación areal en el BS. Se observa una marcada onda anual con un máximo en el período estival y la presencia de una estación seca entre junio y agosto, lo cual es consistente con lo encontrado por otros autores [3].

Se construyeron los campos de correlación desfasada entre las anomalías de precipitación del BS y las variables de gran escala provenientes del reanálisis de NCEP-NCAR. La Figura 2 muestra el caso particular para la TSM en agosto, que indica que el calentamiento (enfriamiento) anómalo de la superficie del océano en el Pacífico tropical precede a una primavera lluviosa (seca) en el BS, mientras que la TSM en el Pacífico sur occidental ejerce la influencia opuesta sobre la lluvia.

Esto sugiere que la fase cálida (fría) del ENSO en agosto está vinculada a una primavera con anomalías positivas (negativas) de precipitación en el BS, y permite definir predictores de la lluvia basados en la TSM de la región. Además, la correlación negativa en la zona tropical del océano Atlántico norte permite añadir un nuevo predictor, que indica que anomalías negativas (positivas) de la TSM en agosto favorecen la situación lluviosa (seca) en el BS. González et al. (2002) [10] vincularon la variabilidad de la TSM en esta zona a cambios en la fecha de activación del monzón sudamericano, y por lo tanto a modificaciones en la actividad convectiva en latitudes bajas del continente y en el aporte de humedad hacia el norte argentino. Por otro lado, no se observa una relación significativa entre la TSM de agosto en los océanos Pacífico y Atlántico adyacentes al sur de Sudamérica y la precipitación del BS en primavera, lo cual es consistente con los resultados hallados por Oliveri (2018) [16].

Los campos de correlación desfasada asociados a la altura geopotencial (Figuras no mostradas) indican la influencia de los trenes de ondas de latitudes medias sobre el océano Pacífico en distintos niveles verticales de la atmósfera, así como el vínculo entre la altura geopotencial de agosto en la región de la rama ascendente de la circulación del ENSO y la precipitación de primavera en el BS. Esto permitió definir nuevos predictores asociados a la altura geopotencial. En el nivel de 1000 hPa (Figura no mostrada) no se halló una relación significativa entre la altura geopotencial en la región del anticiclón del Atlántico Sur y la precipitación de SON en el BS, coincidente con lo observado por Garbarini et al. (2019) [17]. Por otro lado, el campo de correlación desfasada vinculado al flujo zonal en niveles altos es físicamente coherente con los campos de correlación desfasada de altura geopotencial y de TSM, permitiendo definir predictores de la variable, mientras que el campo de flujo zonal en niveles bajos presenta correlaciones no significativas (Figuras no mostradas). Se añadieron predictores vinculados al flujo meridional en niveles bajos debido a que el campo de correlación asociado sugiere que una primavera lluviosa (seca) es precedida por un aumento (disminución) del flujo del norte en latitudes bajas de Sudamérica (Figura no mostrada). Además, el aumento (disminución) de la actividad convectiva en la región central de Sudamérica favorece las anomalías positivas (negativas) de precipitación en el BS (definiendo así un predictor de OLR), mientras que la relación entre el agua precipitable y la lluvia de primavera no es estadísticamente significativa en el continente (Figuras no mostradas).

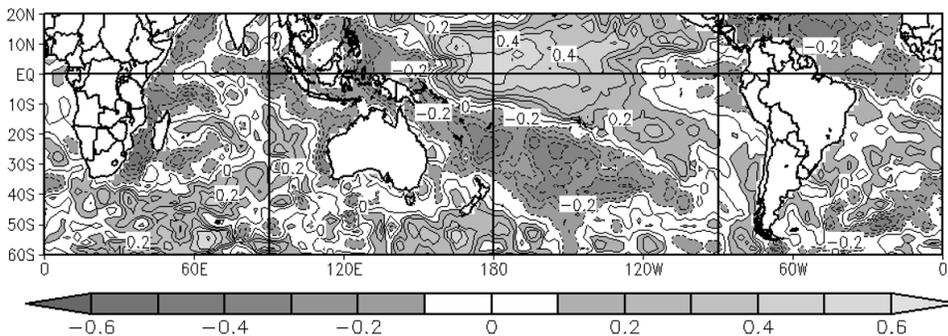


Figura 2. Campo de correlación desfasada entre las anomalías de precipitación del BS en SON y la TSM en agosto. Valores mayores a 0.37 en módulo son significativos al 95% de confianza.

Los predictores fueron agrupados según su independencia estadística en distintos sets, y se aplicó un ajuste por cuadrados mínimos a cada combinación de los mismos. En base a los valores de  $AdjR^2$  y  $eCV$  se eligieron los mejores modelos de cada set, que se indican en la Tabla 1. Se obtuvieron 9 modelos, de los cuales 7 presentan un  $AdjR^2$  mayor o igual a 0.5. Los valores más altos del parámetro se encuentran para el BS2, el BS14, y el BS1; además, estos modelos presentan los valores más bajos de  $eCV$ . Por otro lado, los modelos reproducen aproximadamente el comportamiento de



Asociación de Universidades  
GRUPO MONTEVIDEO



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

la serie temporal de las anomalías de precipitación observadas en el BS para el período de estudio (Figura no mostrada), aunque tienen dificultad en reproducir algunos extremos secos y húmedos.

A partir del primer y segundo tercil de la serie observada en 1981-2010 se determinaron los años con precipitación de primavera sobrenormal, subnormal, y normal, y se buscó determinar si los modelos logran distinguir la clasificación observada. La Tabla 1 muestra que el BS12 es el único modelo con menos del 50% de aciertos en la clasificación de los eventos. A pesar de que el BS2 posee el máximo valor de  $AdjR^2$  (Tabla 1) los modelos BS1, BS4, BS5, BS9 y BS14 presentan mayor porcentaje de pronósticos buenos. Para determinar si los modelos son más eficientes en pronosticar un evento en particular, se calcularon la probabilidad de detección y la tasa de falsa alarma de los eventos subnormales, normales y sobrenormales para cada modelo elegido. Se encontró que en líneas generales los modelos presentan mayor skill al pronosticar anomalías de precipitación subnormales en el BS, pues en ese caso los modelos están asociados a valores relativamente altos de detección, y mínimos valores de falsa alarma (Figura no mostrada). Analizando ambos parámetros de skill, los mejores modelos son el BS9 y el BS14.

Combinando todos los resultados encontrados, al analizar la serie de cross-validación el mejor modelo es el BS14. El mismo incluye como predictores a la altura geopotencial en niveles bajos y medios en la región oriental del océano Pacífico sur, a la TSM en la región del ENSO, y al flujo meridional en latitudes tropicales de Sudamérica.

Tabla 1. Detalle de la eficiencia y resumen de las variables predictoras de cada modelo obtenido.

Modelo	Variables predictoras	$Adj R^2$	$eCV$ mm	Pronósticos buenos (1981-2010) %
BS1	Alt. geop. Pacífico (500 hPa y dipolo 700 hPa), TSM Pacífico tropical, flujo meridional	0.56	61	57
BS2	Alt. geop. Pacífico (700 hPa), TSM Pacífico tropical, flujo meridional	0.59	58	54
BS3	Alt. geop. Pacífico (700 hPa), flujo meridional	0.49	63	54
BS4	Alt. geop. Pacífico (700 hPa y dipolo 250 hPa), TSM Pacífico tropical, flujo meridional	0.53	63	57
BS5	Alt. geop. Pacífico (700 hPa) y Sudamérica (dipolo 250 hPa), TSM Pacífico tropical, flujo meridional	0.51	65	57
BS8	Alt. geop. Pacífico (700 hPa) y sur Índico (dipolo 500 hPa), TSM Atlántico norte, flujo meridional	0.46	68	53
BS9	Alt. geop. Pacífico (dipolo 700 hPa) y sur Índico (dipolo 250 hPa), TSM Atlántico norte, flujo meridional	0.51	63	57
BS12	Alt. geop. Pacífico (500 hPa y dipolo 700 hPa), TSM Atlántico norte, flujo meridional	0.50	64	47
BS14	Alt. geop. Pacífico (dipolo 700 hPa), dipolo TSM Pacífico tropical, flujo meridional	0.57	59	64

#### 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se buscaron los posibles forzantes remotos de la precipitación de primavera en el BS, mediante la utilización de observaciones provenientes de la red de pluviómetros de la región y datos de gran escala provenientes de reanálisis. A partir de las relaciones estadísticas y físicas encontradas se definieron predictores en agosto de la lluvia de primavera y se obtuvieron 9 modelos de regresión lineal múltiple, de los cuales 7 explican más del 50% de la variabilidad de las anomalías de precipitación observadas en el período 1981-2010. Los resultados encontrados en los campos de correlación desfasada destacan la importancia de la intensidad y posición de los

sistemas en el Pacífico, la TSM en el Pacífico tropical, y el flujo meridional en latitudes bajas de Sudamérica como fuentes de predictibilidad de la precipitación estacional de primavera.

Si bien los resultados a los que se arribaron permiten estimar que las anomalías de precipitación en SON presentan cierto grado de predictibilidad a partir de información de la circulación atmosférica y la TSM en el agosto previo, es necesario expandir el estudio con un análisis de la eficiencia de los modelos en años no involucrados en la confección de los mismos, lo cual permitiría profundizar en la habilidad que los modelos tienen para generar un pronóstico certero y en la ventaja que podría representar su utilización por parte de los tomadores de decisiones ante posibles eventos de precipitación abundante o escasa en el BS.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Al SMN, COREBE, APA y SIPH por los datos de lluvia, a NCEP-NCAR por los datos de reanálisis y a los proyectos UBACYT 2013-2016 20620120100003ba y UBACYT 2017-2019 20020160100009ba por la financiación. La Figura 2 fue adaptada de NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder, Colorado de su página web <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

## 6 REFERENCIAS

- [1] Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Adv. Geosci.* 22, 3-11.
- [2] Ferreira, L., Saulo, C. y Seluchi, M. (2010). Características de la depresión del noroeste argentino en el período 1997-2003: criterios de selección y análisis estadístico. *Meteorologica.* 35, 1, 17-28.
- [3] Reboita, M. S., Ambrizzi, T. y Da Rocha, R. P. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia.* 24, 1, 48-55.
- [4] COREBE (julio de 2017). *Características del Río Bermejo y Problemática de los Sedimentos en la Cuenca del Río Bermejo*. Recuperado de <http://corebe.org.ar/web2015/>.
- [5] Murgida A. M., González, M. H. y Tiessen, H. (2014). Rainfall trends, land use change and adaptation in the Chaco salteño region of Argentina. *Reg. Environ Change.* 14, 1387-1394.
- [6] Grimm, A. M., Barros, V. R. y Doyle, M. E. (2000). Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *J. Climate.* 13, 35-58.
- [7] Ropelewski, C. F. y Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 115, 1606-1626.
- [8] Doyle, M.E. y Barros, V. R. (2002). Midsummer low-level circulation and precipitation in subtropical South America and related sea surface temperature anomalies in the South Atlantic. *J. Climate.* 15, 3394-3410.
- [9] Chan, S. C., Behera, S. K. y Yamagata, T. (2008). Indian Ocean dipole influence on Southern American rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 35, L14S12.
- [10] González, M. H., Barros, V. R. y Doyle, M. E. (2002). Relation between the onset and end of the South American summer monsoon and rainfall in subtropical South America. *Clim. Res.* 21, 141-155.
- [11] Zhou, J., y Lau, K. (1998). Does a monsoon climate exist over South America?. *J. Climate.* 11, 1020-1040.
- [12] Reboita, M. S., Ambrizzi, T. y Da Rocha, R. P. (2009). Relationships between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere atmospheric systems. *Revista Brasileira de Meteorologia.* 24, 1, 48-55.
- [13] Thompson, D. W., y Wallace, J. M. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *J. Climate.* 12, 1000-1016.
- [14] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, I., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR Reanalysis 40 year-project. *Bull Amer Meteor Soc.* 77, pp. 437-471.
- [15] Hyndman, R. J., Athanasopoulos, G. (2013). *Forecasting: principles and practice*. Australia: Otexts. Recuperado de <http://otexts.org/fpp/>.
- [16] Oliveri, P. C. (2018). *La influencia de los océanos cercanos sobre la precipitación y temperatura media estacionales en Argentina* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Buenos Aires.
- [17] Garbarini, E. M., González, M. H., Rolla, A. L. (2019). The influence of Atlantic High on seasonal rainfall in Argentina. *Int. J. Clim.* 1-15. <https://doi.org/10.1002/joc.6098>.