

# SALAR DE RINCÓN (PUNA ALTIPLANO), ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA A PARTIR DE DATOS SATELITALES Y DE CAMPO

Ramiro Domínguez Paris\*; Luis Guarracino\*\* y Verónica Rocha Fasola\*\*\*

\* Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Polo Tecnológico Vaqueros, Las Morenas S/N, (4001) Salta, Argentina. E-mail: ramiro.dominguezparis@gmail.com

\*\* Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.

\*\*\* Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Instituto INASLA. Salta, Argentina.

## Resumen

En el presente trabajo se realizó una caracterización espacio temporal de las precipitaciones en la cuenca del Salar de Rincón (Argentina y Chile) a partir de datos satelitales y registros de campo. Para ello se evaluaron 6 conjuntos de datos satelitales de precipitación: CHIRPS, IMERG, PERSIANN, MSWEP, GSMaP y TerraClimate. Los datos de origen satelital fueron comparados con valores mensuales de precipitación medidos en una estación meteorológica. A partir del cálculo de índices de eficiencia y parámetros estadísticos continuos se concluyó que los datos de GSMaP son los que mejor se ajustan a los datos locales. Una vez validados los datos satelitales, se establecieron patrones espaciales y temporales de la precipitación en toda la cuenca del Salar de Rincón. La utilización de datos satelitales ha significado un paso adelante en el conocimiento de la precipitación en la cuenca del Salar de Rincón. Estos datos han permitido completar el vacío de información existente sin la necesidad de extrapolar valores de estaciones meteorológicas distantes o utilizar relaciones empíricas determinadas para otros salares.

**Palabras claves:** Puna Altiplano, precipitaciones, datos satelitales, patrones espaciotemporales

## Abstract

This study presents a spatio-temporal characterization of precipitation in the Salar de Rincón basin (Argentina and Chile) based on satellite data and field records. Six satellite precipitation data sets were evaluated: CHIRPS, IMERG, PERSIANN, MSWEP, GSMaP and TerraClimate. The satellite data were compared with monthly precipitation values measured at a meteorological station. Following the calculation of efficiency indices and continuous statistical parameters, it was concluded that the GSMaP data most closely matched the local data set. Once the satellite data had been validated, spatial and temporal patterns of precipitation were established throughout the Salar de Rincón basin. The use of satellite data has enabled a significant step forward in the understanding of precipitation in the Salar de Rincón basin. The data have enabled us to fill the existing information gap without having to extrapolate values from distant meteorological stations or use empirical relationships determined for other salars.

**Keywords:** Puna Altiplano, precipitation, satellite data, spatiotemporal patterns

## INTRODUCCIÓN

La estimación de los volúmenes de agua precipitados en las cuencas de los salares de la Puna Altiplano es de gran relevancia en los estudios de balances hídricos, propiciados últimamente por la actividad minera del litio (García *et al.*, 2013; Houston *et al.*, 2011 y Border y Sawyer, 2014). A pesar de su importancia, el conocimiento de los patrones espacio-temporales de la precipitación posee serias limitaciones, debido a factores naturales (clima extremadamente árido y geografía montañosa) y a la falta de información disponible (escasez de estaciones meteorológicas, series temporales dispares e incompletas y poca accesibilidad). La incorporación de datos provenientes de misiones espaciales basados en sensores remotos, algoritmos y datos de campo, podrían suponer un gran avance en la materia

Los satélites pueden proveer estimaciones de precipitación a grandes escalas geográficas, obteniendo distribuciones espacio temporales de precipitaciones de alta calidad. Sin embargo, las técnicas de estimaciones satelitales de precipitación (SPE, por sus siglas en inglés) pueden no ser lo suficientemente precisas debido a distintas fuentes de incertidumbre como por ejemplo errores en el tiempo de muestreo, en la calibración de dispositivos, en los algoritmos utilizados, condiciones climáticas locales y características topográficas (Muñoz de la Torre *et al.*, 2024). Es por ello que resulta necesario validar la performance de las distintas SPE con datos de campo.

El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización espacio temporal de las precipitaciones en la cuenca de Rincón. Para ello, se utilizaron datos satelitales que fueron validados en función de su correlación con registros de campo. Una vez determinado el patrón de precipitaciones, se estimó el porcentaje de nieve precipitada en la cuenca utilizando datos de temperatura y un modelo digital de elevación del terreno.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del salar de Rincón forma parte de la región de la Puna Altiplano de los Andes Centrales, donde se desarrollan cuencas endorreicas (área amarilla en Figura 1). Tiene una extensión de 2800 Km<sup>2</sup> y en su cota más baja se encuentra el salar del Rincón. Políticamente es una cuenca binacional chileno-argentina (paso fronterizo de Sico).

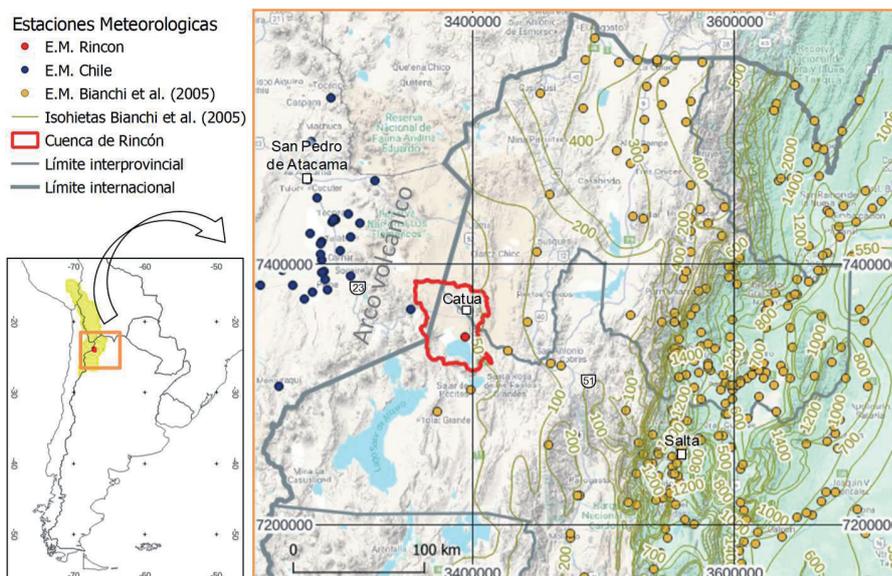


Figura 1. Ubicación de la cuenca del salar de Rincón y estaciones meteorológicas. Isohietas de precipitaciones medias anuales (mm) realizadas por Bianchi et al. (2005). Imagen Google Terrain

## Datos de estaciones pluviométricas

Existen datos históricos regionales de precipitaciones a escala mensual recopilados por organismos estatales tanto en Argentina (Bianchi *et al.*, 2005) como en Chile (Dirección

General de Obras). Sin embargo, se destaca la muy baja densidad de datos en la región de la Puna Altiplano (Figura 1). Puntualmente en la cuenca de Rincón existen registros en 2 estaciones meteorológicas ubicadas en el borde del Salar propiedad de Rincón Mining Limited PTY, distantes entre sí sólo unos 3 Km, con las cuales se ha podido reconstruir una serie continua de más de 11 años (enero 2011- abril 2022).

### Conjuntos de datos globales: estimaciones satelitales de precipitación (SPE)

Las estimaciones de precipitaciones a partir de información adquirida por sensores a bordo de satélites se basan en: delimitación de nubes a partir del espectro visible (sólo en horas diurnas), temperatura al tope de las nubes en función de registro de ondas de infrarrojo y detección directa de hidrometeoros (agua líquida o sólida en la atmósfera) a partir de microondas generadas por estos, tanto en forma pasiva como activa, con la utilización, en este último caso, de radares satelitales (misiones TRMM y GPM).

El primer satélite con instrumentos a bordo capaces de observar condiciones atmosféricas fue lanzado al espacio en el año 1960. Desde entonces los científicos han intentado obtener valores de precipitación a partir de información registrada sobre condiciones atmosféricas en general. Sin embargo, fue recién en noviembre de 1997 cuando se lanzó TRMM, la primera misión espacial concebida especialmente para observar precipitaciones y por tanto, con sensores remotos adecuados para tal fin (Kidd y Levizzani, 2022). Más recientemente, TRMM sería reeditada por la misión GPM.

A los fines de cumplir con los objetivos del trabajo, se seleccionaron los conjuntos de datos globales (Tabla 1) que (1) tienen una resolución espacial igual o menor a  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (11 Km), (2) se fundamentan en registros de sensores remotos satelitales y (3) son reconocidos en la bibliografía especializada.

Tabla 1. Conjuntos de datos globales seleccionados

SPE	Resol.	Fuentes	Referencias
IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM)	$0.1^\circ$	Datos satelitales	(Huffman <i>et al.</i> , 2020)
GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation)	$0.1^\circ$	Datos satelitales	(Kubota <i>et al.</i> , 2017)
MSWEP (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation)	$0.1^\circ$	Datos satelitales, modelos numéricos, datos superficie	(Beck <i>et al.</i> , 2017)
PERSIANN-CCS (Cloud Classification System)	$0.04^\circ$	Datos satelitales	(Hong <i>et al.</i> , 2004)
TERRACLIMATE	$0.04^\circ$	Modelos climáticos, registros superficie y datos satelitales	(Abatzoglou <i>et al.</i> , 2018)
CHIRPS (Climate Hazard Group InfraRed Precipitation Station data)	$0.05^\circ$	Datos satelitales, modelo climático, registros superficie	(Funk <i>et al.</i> , 2014)

### Datos de temperatura

Se utilizaron los datos de temperatura registrados por la estación meteorológica del salar de Rincón (E.M. Rincón) y por la estación meteorológica del observatorio Atacama Pathfinder Experiment (APEX), a los fines de obtener gradientes mensuales de temperatura.

### Modelo Digital de Elevación (MDE)

Se utilizó el MDE para la República Argentina desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) denominado MDE-Ar v2.1.

### Metodología

Se realizó un análisis punto-píxel que consistió en comparar los datos de precipitación mensuales de la E.M. Rincón con datos satelitales globales cuyos valores corresponden a píxeles. Con el fin de comparar los pares de datos se calcularon los siguientes parámetros estadísticos continuos: coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), sesgo relativo (Bias), error medio absoluto (MEA) y la raíz del error cuadrático medio (RSME). También se calcularon los índices de eficiencia NSE (Nash-Sutcliffe) y KGE' (Kling-

Gupta modificado) que permiten realizar un ranking de eficiencia de cada uno de los productos satelitales analizados. Ambos índices con valores que van desde menos infinito a 1, son usados generalmente para verificar la calidad de los resultados de simulaciones de modelos hidrológicos y de acuerdo a Lu *et al.* (2019) y Peña Guerrero *et al.* (2022) han sido utilizados recientemente para evaluar la precisión de los datos satelitales de precipitaciones. Así de este modo, los modelos predictivos, o en este caso, las estimaciones a partir de datos satelitales, pueden ser clasificados en excelentes ( $0.75 < NSE \leq 1$ ), buenos ( $0.65 < NSE \leq 0.75$ ), satisfactorios ( $0.5 < NSE \leq 0.65$ ) e insatisfactorios ( $NSE \leq 0.5$ ) (Moriassi *et al.*, 2007 en Zhou *et al.*, 2022). También se evaluaron patrones en la distribución de las precipitaciones totales mensuales.

Una vez validados los datos satelitales con los datos observados en terreno por la E.M. Rincón, se procedió a estimar las precipitaciones en toda la extensión de la cuenca hídrica de Rincón. Para ello se descargaron los datos satelitales que mejor ajustan en la serie temporal analizada, para luego procesarlos en una plataforma SIG (Sistema de Información Geográfica). Se obtuvieron mapas de precipitación media anual y estacionales, pudiendo calcular las precipitaciones promedio de la cuenca y observar gradientes espaciales de precipitación en distintos momentos del año.

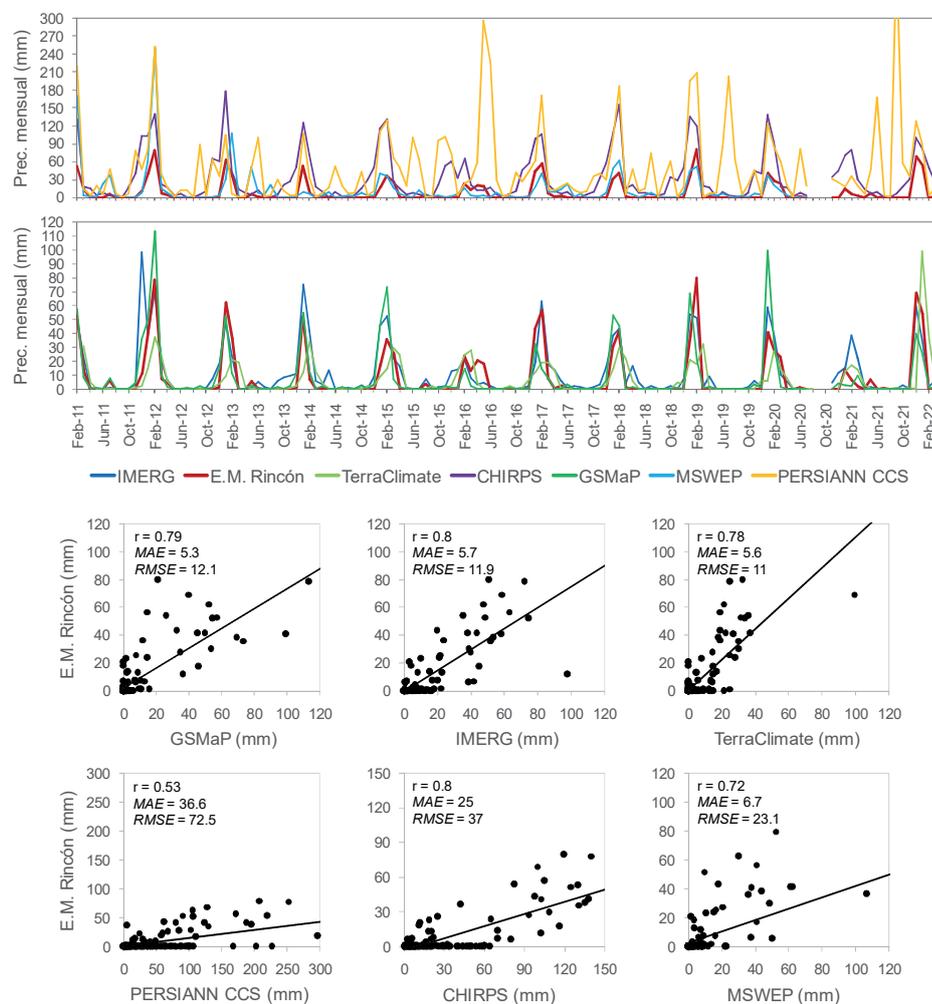


Figura 2. Datos de precipitación para la ubicación de la E.M. Rincón. Arriba: Serie temporal analizada (los datos fueron divididos en dos para una mejor apreciación). Abajo: Diagramas de dispersión

Los conjuntos de datos satelitales en general no discriminan entre precipitación líquida o sólida, entregando un dato unificado en mm de agua equivalente. A los fines hidrológicos, el comportamiento del agua precipitada será distinto si en la superficie terrestre se acumula agua líquida o nieve. Es por ello que se realizó una discriminación entre lluvias

líquidas y nevadas en función de las temperaturas medias mensuales (TMM) en superficie, teniendo en cuenta que las nevadas ocurren cuando las temperaturas son inferiores a 0°C.

Las TMM fueron calculadas para toda la cuenca del salar de Rincón. Se tomaron como referencia los registros de la E.M. Rincón y un gradiente de temperatura mensual calculado al comparar los datos de E.M. Rincón con los registros de E.M. APEX. En paralelo se realizó una discretización de la superficie de la cuenca en rangos de 100 m de altitud utilizando información del MDE. De este modo se obtuvieron mapas de temperatura media calculando las TMM correspondientes a cada rango altimétrico. Los mapas de temperatura mensual indican las áreas donde la TMM son inferiores a 0°C. Finalmente, los datos satelitales de precipitación mensual dentro de esas áreas son considerados como nieve precipitada en mm equivalentes.

## RESULTADOS

La Figura 2 ilustra las series de datos satelitales para todo el período de análisis y los ajustes obtenidos al compararlos con los datos de la E.M. Rincón. El conjunto de datos satelitales que resultó más eficiente de acuerdo al índice NSE (Tabla 2) es GSMaP, seguido por IMERG, ambos productos basados en la misión espacial GPM. Entre los parámetros estadísticos calculados (Tabla 1), se destaca un sesgo positivo de sólo 1% para GSMaP pudiendo luego utilizar los datos sin necesidad de correcciones.

Tabla 2. Índices y parámetros estadísticos calculados

SPE	NSE	KGE'	N	Mean obs	Mean sat	r	Bias	MAE	RMSE
GSMaP	0.61	0.77	132	8.27	8.36	0.79	0.01	5.32	12.09
IMERG	0.60	0.49	132	8.27	11.64	0.80	0.41	5.68	11.90
MSWEP	0.46	0.34	115	8.23	12.97	0.72	0.59	6.65	23.08
TerraClimate	0.22	0.69	132	8.27	6.72	0.78	-0.19	5.57	11.03
CHIRPS	0.15	-1.94	132	8.27	32.30	0.80	2.91	24.99	37.02
PERSIANN CCS	-0.20	-4.17	132	8.27	50.70	0.53	5.13	36.62	72.46

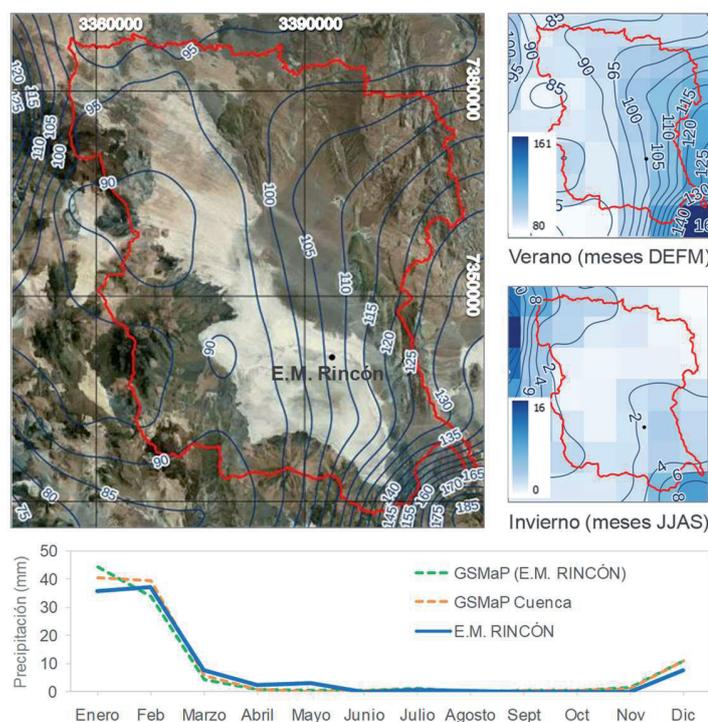


Figura 3. Mapas de isohietas de la cuenca y serie temporal. Arriba izquierda: promedio anual. Arriba a la derecha: promedios estacionales. Abajo: Serie de precipitaciones promedio mensuales

La precipitación media anual en la cuenca del salar de Rincón para el período 2011/2021 utilizando los datos de GSMaP es representada por el mapa de isohietas de la Figura 3. Se calculó un valor medio de 102 mm/año para toda la cuenca, siendo similar al registro promedio anual de 98 mm de la E.M. Rincón. El patrón espacial de lluvia está dado por un aumento de las precipitaciones de oeste a este, en dirección hacia la Sierras de Guayaos y el Nevado de Quevar. La tendencia a una mayor precipitación en el sector este de la cuenca también es captado por el resto de los conjuntos de datos satelitales.

Los promedios de precipitación mensual de la E.M. Rincón y de los datos de GSMaP son similares, tanto del registro correspondiente al pixel de la E.M. como del promedio obtenido para toda la cuenca del salar de Rincón (Figura 3)

En la Figura 3 se pueden observar cambios en la distribución de las precipitaciones a escala estacional. Mientras que en verano ocurren mayores precipitaciones en el sector este, durante el invierno se destacan mayores precipitaciones (principalmente en forma de nieve) hacia el noroeste, en territorio chileno. Esto es coherente con publicaciones que señalan la proveniencia de humedad durante el invierno desde el anticiclón del Pacífico para cuencas chilenas vecinas (Vuille y Ammann, 1997; Valdivielso *et al.*, 2022). De todos modos, la incidencia de dicha humedad en la cuenca del salar de Rincón es relativamente muy baja, explicando sólo un 5% del volumen total precipitado en el sector noroeste de la cuenca.

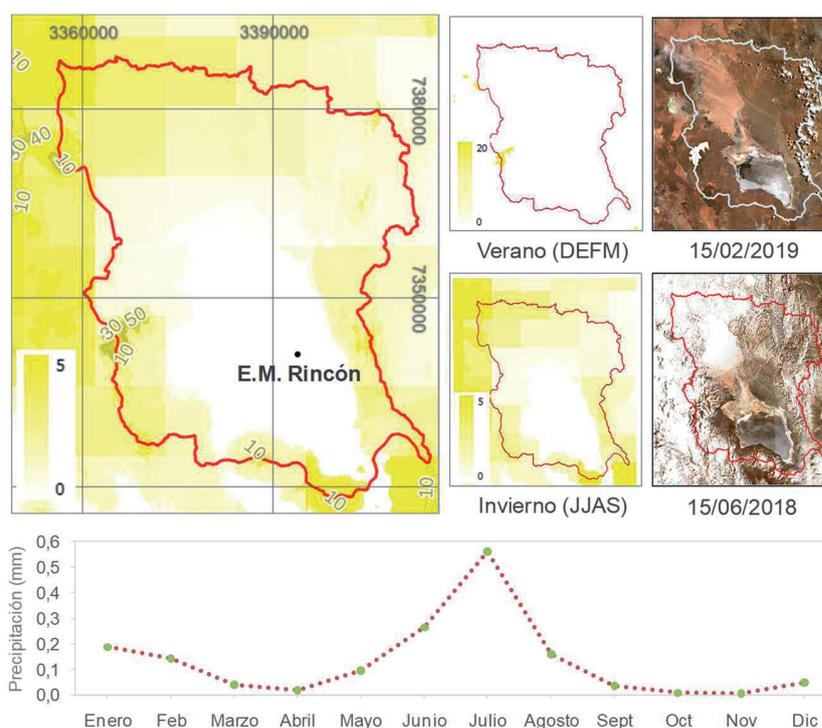


Figura 4. Nieve promedio anual (isohietas de 10 mm de agua equivalente). A la derecha se representan las acumulaciones promedio en verano e invierno, validado por registros satelitales.

Abajo: Serie temporal de nieve promedio mensual para toda la cuenca del salar de Rincón

La nieve promedio anual precipitada en toda la cuenca estimada a partir de la técnica propuesta es de 1.6 mm equivalente de agua, lo que representa menos del 2% de la precipitación total. En la Figura 4 se muestran las estimaciones de nieve precipitada en verano e invierno junto con imágenes satelitales que validan cualitativamente los resultados obtenidos. La baja proporción de nieve precipitada se explica porque las lluvias se concentran en los meses de verano (95 % del total anual). Las nevadas ocurren principalmente en los meses de invierno, pudiendo cubrir grandes extensiones (Figura 4). Durante el verano sólo nieve en algunos picos montañosos. Las nevadas de verano, aún cuando están espacialmente acotadas, pueden ser voluminosas.

## DISCUSIÓN

Los patrones espaciales de precipitaciones en la Puna Altiplano definidos en la bibliografía se hicieron siguiendo distintas metodologías, pero basados fundamentalmente en registros pluviométricos de puestos o estaciones meteorológicas.

El mapa de isohietas realizado por Bianchi *et al.* (2005) es una referencia muy citada en el Noroeste Argentino. En él se aprecia un gradiente negativo en sentido suroeste dentro de la Puna, arrojando un valor medio anual inferior a los 50 mm para la cuenca de Rincón (Figura 1). Mientras esta tendencia es clara en la provincia de Jujuy donde se cuenta con una mayor densidad de datos, tiene una mayor incertidumbre en Salta y Catamarca ante la falta de registros. Por otro lado, Grilli y Vidal (1987) y Houston y Hartley (2003) definieron regresiones entre la precipitación y la altura (m s.n.m.) en Chile para latitudes entre 17° S y 27°S, sustentadas en una buena cantidad y distribución de datos de campo. Entre ambas experiencias se halla literalmente buena parte de la Puna argentina, donde recientemente se han realizado modelos de regresión lineal múltiple (RLM) (Montgomery & Associates, 2021, entre otros). Los modelos de RLM consideran como variables independientes las coordenadas x (longitud), y (latitud) y z (altitud) de las estaciones meteorológicas y como variable dependiente a la precipitación media anual. Sin embargo, y a pesar de valores altos de correlación, los escasos registros y la inapropiada distribución de los mismos dan lugar a resultados que no tienen significancia estadística y que por ende, son cuestionables.

La utilización de datos satelitales permite superar las falencias actuales de registros de campo y contribuye al estudio de los patrones espacio temporales de la lluvia en una geografía compleja como la de la Puna Altiplano. Un requisito excluyente es la validación de los datos satelitales con datos puntuales de estaciones meteorológicas, los cuales, aunque son escasos resultan imprescindibles.

## CONCLUSIONES

En este estudio se demostró que existe una buena correlación entre datos satelitales y registros de campo de precipitación a escala mensual en el salar de Rincón, destacándose los productos GSMaP e IMERG.

Utilizando los datos satelitales se realizó una caracterización espacio temporal de las precipitaciones en toda la cuenca de Rincón para la serie 2011-2021 (11 años). Se estimó una precipitación anual promedio de 100 mm, con una concentración del 95% en los meses de verano. De acuerdo al mapa de isohietas las mayores precipitaciones anuales ocurren en el sector este de la cuenca, lo que confirma que tienen su origen en los vientos húmedos provenientes del anticiclón del Atlántico. Asimismo, se apreció un cambio en la distribución espacial entre los meses de verano e invierno, asociado a variaciones en la procedencia de masas de aire.

También se propuso una metodología para calcular la precipitación en forma de nieve que se estimó menor al 2%. Las nevadas se concentran mayormente en invierno, aunque también se observan en menor medida en verano. Las nevadas de invierno pueden ser arealmente extensas pero de pocos mm de agua equivalente. Por el contrario en verano nieva sólo en algunos picos montañosos, pudiendo acumular decenas de mm de agua equivalente.

Las estimaciones satelitales son herramientas de gran utilidad pues permiten visualizar y cuantificar variaciones espaciotemporales de precipitación en la Puna Altiplano, donde hay escasos registros de campo. Permiten completar el vacío de información existente sin la necesidad de extrapolar valores de estaciones meteorológicas distantes o utilizar relaciones empíricas determinadas para otros salares.

La metodología seguida en el presente trabajo es una de las primeras experiencias al respecto y puede replicarse en otras cuencas endorreicas de la región para obtener de modo más fiable un componente fundamental en sus balances hídricos, el ingreso de agua por precipitación.

## REFERENCIAS

- Abatzoglou, J.T.; Dobrowski, S.Z.; Parks, S.A. and Hegewisch, K.C.** (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Sci. Data* 5:170191.
- Ashouri H., K. Hsu, S. Sorooshian, D.K. Braithwaite, K.R. Knapp, L. D. Cecil, B.R. Nelson, and Prat, O.P.** (2015). PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multi-Satellite Observations for Hydrological and Climate Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*
- Beck H., Vergopolan N., Pan M., Levizzani V., van Dijk A.I., Weedon G.P., Brocca L., Pappenberger F., Huffman G.J., and Wood E. F.** (2017). Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6201–6217.
- Bianchi, A.R., Yáñez, C.E. y Acuña L.R.** (2005) Base de datos mensuales de precipitaciones del noroeste argentino. INTA, Centro Regional Salta-Jujuy, Argentina.
- Border S. y Sawyer, L.** (2014). Evaporites and brines – geological, hydrological and chemical aspects of resource estimation, *Applied Earth Science*, 123:2, 95-106.
- Funk, C.C., Petersen, P., Landsfeld M.F. and Pedreros, D.H.** (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring: U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p.
- García, R., Rocha Fasola, V., Moya Ruiz, F. y Tálamo E.** (2013). Exploración y explotación de salmueras enriquecidas en litio y potasio en salares de la Puna argentina. *Temas Actuales de la Hidrología Subterránea* 2013: 303-310.
- Grilli, A. y Vidal, F.** (1986). Balance Hidrológico Nacional, II Región. Dirección General de Aguas, Pub. SDEH 86/1.
- Hong Y, Hsu K-L, Sorooshian S and Gao, X.** (2004). Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system. *J Appl Meteorol* 43(12):1834–1853.
- Houston, J., y Hartley, A.** (2003). The central Andean west – slope rain shadow and its potential contribution to the origin of hyperaridity in the Atacama Desert. *Int. J. Climatol.* 23, 1453 – 1464.
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K. and Godfrey, L.** (2011). The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. *Economic Geology*, 106: 1225-1239.
- Huffman, G.J.; Bolvin D.T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R.J., Kidd, Ch., Nelkin, E.J., Sorooshian, S., Stocker, E.F., Tan, J., Wolff, D.B. and Pingping, X.** (2020). Integrated multisatellite retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). In: Levizzani, V., Kidd, C., Kirschbaum, D.B., Kummerow, C.D., Nakamura, K., Turk, F.J. (Eds.), *Satellite Precipitation Measurement*. Springer Nature, Cham, pp. 343–353.
- Kidd, C., y Levizzani, V.** (2022). Satellite rainfall estimation. In *Rainfall Modeling, Measurement and Applications*, Chapter 6. Editor: Renato Morbidelli (pp. 135–170).
- Kubota T., K. Aonashi, T. Ushio, S. Shige, Y.N. Takayabu, Y. Arai, T. Tashima, M. Kachi and Riko, O.** (2017). Recent progress in global satellite mapping of precipitation (GSMAP) product. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Fort Worth, TX, USA, 2017, pp. 2712-2715.
- Lu X., Tang G., Wang X., Liu Y., Jia L., Xie G., Li S. and Zhang, Y.** (2019). Correcting GPM IMERG precipitation data over the Tianshan Mountains in China. *J. Hydrol.* 575, 1239–1252 (2019)
- Montgomery & Associates** (2021). Balance de Agua del Salar de Rincón. Informe inédito.
- Muñoz de la Torre, E., González Trinidad, J., González Ramírez, E., Bautista Capetillo, C.F., Junes Ferreira, H.E., Badiño Almaraz, H. and Rivas Recendez, M.I.** (2024). Estimation of Rainfall via IMERG-FR and Its Relationship with the Records of a Rain Gauge Network with Spatio-Temporal Variation, Case of Study: Mexican Semi-Arid Region. *Remote Sens.* 16, 273.
- Peña-Guerrero, M. D., Umirbekov, A., Tarasova, L., and Müller, D.** (2022). Comparing the performance of high-resolution global precipitation products across topographic and climatic gradients of Central Asia. *International Journal of Climatology*, 42(11), 5554–5569.
- Valdivielso, S., Vázquez-Suñé, E., Herrera, C. and Custodio, E.** (2022). Characterization of precipitation and recharge in the peripheral aquifer of the Salar de Atacama. *Sci. Total Environ.* 806, 150271.
- Vuille, M. and Ammann, C.** (1997). Regional snowfall patterns in the high arid Andes. *Climatic Change*, 36, 413–423.
- Zhou L., Koike T., Takeuchi K., Rasmy M., Onuma K., Ito H.; Selvarajah H., Liu L., Li X. and Ao, T.** (2022). A study on availability of ground observations and its impacts on bias correction of satellite precipitation products and hydrologic simulation efficiency. *J. Hydrol.* 2022; 610, 127595.