

## Artículo Original

# Análisis de la variabilidad de precipitación y eventos climáticos extremos en la Cuenca del Río Tipani, Potosí, Bolivia (2002-2020)

Analysis of the variability of precipitation and extreme weather events in the Tipani River Basin in the Tipani River Basin, Potosi, Bolivia (2002 - 2020)

Vannet Rina Martínez Chacapecho<sup>1\*</sup> & Natalia Chacapecho Achu<sup>2</sup>

\*Autor de correspondencia: [vannetrina100@gmail.com](mailto:vannetrina100@gmail.com)

<sup>1</sup> Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Ingeniería Civil, Llallagua, Potosí, Bolivia

<sup>2</sup> Universidad Mayor de San Andrés, Carrera de Electromecánica, La Paz, Bolivia

Recibido: 05/10/2024 Aceptado para publicación: 18/10/2024

## Resumen

Este estudio analiza la variabilidad climática y sus impactos en la gestión hídrica de la cuenca del río Tipani, Potosí, Bolivia, entre 2002 y 2020; el cual examina las tendencias de precipitación, identifica eventos climáticos extremos y evalúa las implicaciones para la gestión de recursos hídricos. Se analizaron series temporales de precipitación, temperatura y caudal, utilizando datos de la estación meteorológica de Llallagua. Los resultados revelaron un aumento significativo en las precipitaciones máximas anuales, con una tendencia positiva de 1,32 mm/año ( $p < 0,001$ ), lo que representa un incremento del 25% durante el período estudiado. Los eventos extremos de precipitación se concentraron entre 2016 y 2019, con un aumento notable en la frecuencia e intensidad de las lluvias. El análisis estacional mostró que los máximos de precipitación ocurren en enero y febrero, mientras que los valores más bajos se registran en julio y agosto. La correlación entre temperatura y precipitación reveló una relación negativa significativa ( $r = -0,97$ ,  $p < 0,001$ ), sugiriendo que el aumento de temperaturas podría reducir las precipitaciones en el futuro. El estudio determinó un caudal de diseño significativo de 248,31 m<sup>3</sup>/s y una altura de agua necesaria de 2.705 m para el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas. Se recomienda implementar estrategias proactivas que incluyan el fortalecimiento de infraestructuras hidráulicas, la promoción de sistemas de riego eficientes y la integración del conocimiento local con tecnologías modernas para aumentar la resiliencia de las comunidades ante estos eventos climáticos extremos. El cambio climático tiene una clara incidencia en la oferta de agua, afectando a los ecosistemas y la agricultura.

**Palabras clave:** hidrología, precipitación, eventos extremos, cuenca hidrográfica, recursos hídricos

## Abstract

This study analyzes climate variability and its impacts on water management in the Tipani river basin, Potosí, Bolivia, between 2002 and 2020; it examines precipitation trends, identifies extreme weather events and evaluates the implications for water resource management. Time series of precipitation, temperature and flow were analyzed using data from the Llallagua meteorological station. The results revealed a significant increase in annual maximum precipitation, with a positive trend of 1.32 mm/year ( $p < 0.001$ ), representing a 25% increase during the period studied. Extreme precipitation events were concentrated between 2016 and 2019, with a notable increase in rainfall frequency and intensity. Seasonal analysis showed that precipitation maxima occurs in January and February, while the lowest values are recorded in July and August. The correlation between temperature and precipitation revealed a significant negative relationship ( $r = -0.97$ ,  $p < 0.001$ ), suggesting that increasing temperatures could reduce precipitation in the future. The study determined a significant design flow of 248.31 m<sup>3</sup>/s and a required water head of 2,705 m for hydraulic infrastructure sizing. It is recommended to implement proactive strategies that include the strengthening of hydraulic infrastructure, the promotion of efficient irrigation systems, and the integration of water resources management.

**Keywords:** hydrology, precipitation, extreme events, hydrographic basin, water resources

## Introducción

La gestión de los recursos hídricos en el altiplano boliviano, enfrenta desafíos significativos debido a la creciente incidencia de eventos climáticos extremos y la variabilidad en los patrones de precipitación. Datos como los proporcionados por TerraClimate son cruciales para una planificación sostenible en estas regiones vulnerables (Abatzoglou et al., 2018). La cuenca del río Tipani, ubicada en el departamento de Potosí, entre los municipios de Chayanta y Pocoata, a 2995 msnm, es un área sensible donde las fluctuaciones en los patrones de precipitación afectan directamente la disponibilidad y calidad del agua, vital para la población y la biodiversidad local. En los últimos años, se ha observado un aumento en la variabilidad de los regímenes de precipitación, exacerbado por eventos extremos globales como El Niño y La Niña (González, 2015). Estos eventos extremos provocan patrones climáticos impredecibles tanto a corto como a largo plazo: El Niño generalmente trae sequías severas, reduciendo la disponibilidad de agua, mientras que La Niña se asocia con un incremento de las precipitaciones, lo que puede generar inundaciones y alterar la calidad del agua (Seiler et al., 2013; Seth et al., 2010).

La cuenca del río Tipani experimenta una variabilidad interanual y multi decenal marcada, con ciclos de aproximadamente 28 a 33 años entre fases húmedas y secas (Bauer et al., 2018; Canedo-Rosso et al., 2019). Esta variabilidad tiene consecuencias directas en los recursos hídricos, donde las sequías prolongadas, cada vez más frecuentes, agravan la escasez de agua, impactando la población y las actividades agrícolas, un pilar económico clave en la región. En municipios como Tomave, la gestión del agua ha sido seriamente afectada por las sequías, reduciendo el acceso al agua potable y la disponibilidad para la producción agrícola (Minucci & Minucci, 2021). Los eventos extremos de precipitación vinculados a La Niña también generan inundaciones, lo que, además de aumentar la cantidad de agua, puede contaminar las fuentes de agua potable y dañar infraestructuras hídricas (Silva et al., 2015).

El cambio climático ha incrementado la frecuencia e intensidad de estos eventos extremos, lo que representa un desafío significativo para la gestión integrada de los recursos hídricos en la región (González, 2015). Por ello, comprender los patrones de precipitación y los efectos de eventos extremos como El Niño y La Niña es crucial para mejorar la gestión hídrica. Las herramientas avanzadas de pronóstico climático, que incluyen modelos que consideran variaciones a gran escala y sistemas de alerta temprana, permiten anticipar y mitigar los impactos de eventos extremos, como sequías e inundaciones, y mejorar la planificación hídrica. Junto con medidas de adaptación, como el fortalecimiento de infraestructuras hidráulicas y la implementación de sistemas de riego eficiente, estas herramientas ayudan a reducir los efectos negativos sobre la agricultura y el abastecimiento de agua (de la Riva et al., 2013; Mu et al., 2024). Además, integrar el conocimiento local sobre prácticas tradicionales de manejo del agua con tecnologías modernas puede aumentar la resiliencia de las comunidades ante los efectos de estos eventos climáticos extremos.

Este estudio se enfocó en analizar la variabilidad de las precipitaciones y los eventos climáticos extremos en la cuenca del río Tipani entre 2002 y 2020, con el objetivo de identificar patrones temporales y correlacionarse con los eventos extremos de El Niño y La Niña. A través de este análisis, se buscan proponer estrategias y políticas de adaptación que favorezcan una gestión hídrica más resiliente y sostenible, contribuyendo a la seguridad hídrica y el desarrollo de las comunidades rurales de la región (Bauer et al., 2018; Canedo-Rosso et al., 2019).

## Materiales y métodos

El presente estudio se diseñó como un análisis descriptivo y correlacional, enfocado en la variabilidad climática y los eventos extremos de precipitación en la cuenca del río Tipani, Potosí, Bolivia, durante el período 2002-2020. Se adoptó un enfoque cuantitativo para evaluar las tendencias de precipitación y su relación con eventos climáticos extremos, utilizando datos históricos de series temporales.

### *Área de estudio*

La cuenca del río Tipani, localizada en la provincia Rafael Bustillo del departamento de Potosí, Bolivia (18°27' 51.8" S, 66° 12' 25.4" O), cuenta con una longitud de 209.5 km y se extiende entre los municipios de Chayanta y Pocoata. La caracterización hidrológica de la región sigue la metodología propuesta por Vuille et al. (2018) para cuencas andinas. La región presenta las siguientes características: relieve (montañoso con pendientes pronunciadas y valles estrechos), clima (templado), precipitación anual (570-640 mm),

temperatura media (11-13°C), favorece el desarrollo de diversas especies vegetales, período de heladas 5-7 meses, altitud 2995 msnm. Las principales poblaciones cercanas a la cuenca comprenden: municipio de Chayanta (Panacachi, Copana, Winki, Chaqueri y la misma población de Chayanta, que cuenta con una población de 3,871 habitantes), municipio de Pocoata (Arrozpata, Senajo, Tomoyo con una población de 719 habitantes).

Además de su importancia ecológica, la cuenca del río Tipani tiene relevancia económica debido a la presencia de recursos mineros, como el oro. La gestión hídrica en esta región es esencial para prevenir riesgos asociados a eventos climáticos extremos, como inundaciones, que podrían dañar la infraestructura local y afectar gravemente las actividades agrícolas y mineras. Un monitoreo adecuado del comportamiento hidrológico del río es vital para asegurar la seguridad hídrica y el desarrollo sostenible de las comunidades circundantes.

### *Recolección de datos*

La recolección de datos se llevó a cabo siguiendo protocolos estandarizados, alineados con los métodos establecidos por Molina-Carpio et al. (2017) para el altiplano boliviano. Para este propósito, se seleccionaron estaciones meteorológicas basándose en criterios de ubicación geográfica, continuidad de registros y calidad de los datos. Se implementó un protocolo de control y las recomendaciones de Pereira-Cardenal et al. (2019) para series temporales hidrometeorológicas en los Andes. En particular, se utilizó la estación meteorológica de Llallagua, que pertenece a la Universidad Nacional Siglo "XX" y cumple con los estándares establecidos por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Los datos recopilados abarcan registros de precipitaciones y temperaturas desde 2002 hasta 2020. Los registros seleccionados comprenden un período de análisis de 18 años, garantizando su calidad y continuidad mediante técnicas de validación de datos y control de calidad. El proceso de validación de los datos incluyó la eliminación de valores atípicos y la verificación de la continuidad de las series temporales.

### *Análisis de datos*

El análisis de eventos climatológicos en el altiplano boliviano: La región de Potosí en Bolivia enfrenta importantes desafíos debido a eventos climáticos extremos. Tanto las sequías como las inundaciones tienen profundos impactos en los recursos hídricos, afectando su disponibilidad, calidad y gestión. Abordar estos problemas requiere estrategias de adaptación sólidas y una mejor gobernanza para mejorar la resiliencia frente a la variabilidad climática futura, analizando hallazgos más relevantes de revisión bibliográfica sobre la gestión de recursos hídricos, como se muestra en la Tabla 1.

El análisis descriptivo se realizó siguiendo las recomendaciones de Segura-Delgado et al. (2020) para el análisis de series temporales hidrometeorológicas en regiones montañosas, calculando estadísticos como media, desviación estándar y coeficiente de variación y tendencias temporales. Se aplicó la ecuación de Bernard para evaluar la existencia de tendencias significativas en las series temporales de precipitación. Los resultados indican un aumento significativo en la precipitación total anual, especialmente en los últimos años. La identificación de eventos extremos de precipitación y sequía, fue usada la metodología de Castillo-Castillo et al. (2021) con el percentil 95 de umbral. Además, se identificó un aumento en la frecuencia de eventos extremos de precipitación, especialmente durante los meses de enero y febrero.

### *Modelado Hidrológico*

Se implementó el método racional Modificado para la simulación hidrológica, siguiendo las adaptaciones propuestas por Rivera-Velázquez et al. (2022) para cuencas andinas de alta montaña. Se calculó el tiempo de concentración mediante tres métodos (Kirpich, Passini, Pizarro) siguiendo a Morales-González et al. (2023). Cálculo del caudal por el método Racional Modificado:

$$Q=2.78 \cdot Cu \cdot C \cdot I \cdot A \tag{1}$$

Donde:

Q: caudal m<sup>3</sup>/s

Cu: Coeficiente de ajuste de la escorrentía (adimensional).

C: Coeficiente de escorrentía (adimensional), que depende del uso del suelo y la pendiente.

I: Intensidad de lluvia (mm/h).

A: Área de la cuenca (ha).

Con los datos obtenidos en el campo, correspondientes a un área de 140.31 km<sup>2</sup> y una longitud de 209.47 km, se calculó el tiempo de concentración. La metodología para el desarrollo de las curvas IDF se basó en el trabajo de López-García et al. (2021), que incluyó la elaboración de curvas para períodos de retorno de 1, 2, 5, 10, 25, 50, 75 y 100 años, considerando duraciones de eventos de 5 a 60 minutos, con un ajuste estadístico mediante la distribución de Gumbel. Para las proyecciones futuras, se adoptó la metodología de Ramírez-Villegas et al. (2020) para los Andes tropicales, en el período de 2030-2040, con el objetivo de analizar variables como las precipitaciones máximas y la frecuencia de eventos extremos.

## Resultados

Durante el período de estudio (2002 - 2020), se observó una variabilidad significativa en las precipitaciones máximas en 24 horas, con valores que oscilaron entre 22.0 mm y 47.8 mm. Esta variabilidad es crucial para entender el régimen pluvial de la cuenca del río Tipani y su impacto en la gestión de recursos hídricos (Figura 1).

### *Análisis de precipitaciones*

El análisis estadístico reveló una tendencia positiva significativa en las precipitaciones máximas, con una pendiente de 1.32 mm/año ( $p < 0.001$ ) (Figura 2). Esto indica un aumento aproximado del 25% en las precipitaciones máximas durante el período analizado. Los valores de la media calculada fue 36,24 mm, la desviación estándar calculada fue de 7,4 mm y un coeficiente de variación de 19,9 %, lo que sugiere una alta variabilidad interanual en los eventos de precipitación. Los eventos extremos se concentraron principalmente entre los años 2016 y 2019 (Figura 3), lo que coincide con un aumento notable en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones. Este patrón resalta la importancia de considerar estos eventos al planificar la infraestructura hidráulica y las estrategias de gestión del agua.

### *Implicaciones climáticas*

Se identificó un patrón estacional claro en las precipitaciones, con los máximos registrados predominantemente en enero y febrero, y los valores más bajos en julio y agosto (Figura 4). La variación mensual entre los meses más húmedos y los más secos es considerable, lo que resalta la importancia de implementar estrategias adaptativas para la gestión del agua. El análisis reveló una correlación negativa significativa entre la temperatura y la precipitación, con un coeficiente de correlación de -0,97. Esto sugiere que, a medida que las temperaturas aumentan, las precipitaciones tienden a disminuir, lo que podría tener implicaciones serias para la disponibilidad de agua en el futuro.

### *Caudal de diseño significativo*

A través de un análisis probabilístico riguroso, se determinó un caudal de diseño significativo de 248,31 m<sup>3</sup>/s, valor esencial para el dimensionamiento adecuado de las estructuras hidráulicas. Este parámetro es fundamental para asegurar la seguridad y eficacia del manejo del agua en la cuenca. Los resultados obtenidos ofrecen parámetros clave para el diseño estructural necesario para garantizar la seguridad frente a eventos extremos. La determinación de la curva de intensidad-duración-frecuencia específica para la cuenca permitirá una predicción más precisa y una mejor preparación para futuros eventos (Figura 5). Además, la identificación y consideración de parámetros hidráulicos, como la altura requerida del agua (2.705 m), son fundamentales para el diseño eficiente y seguro de infraestructuras hidráulicas.

## Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una clara variabilidad en las precipitaciones de la cuenca del río Tipani durante el periodo 2002-2020, influenciada por los eventos extremos climáticos de El Niño y La Niña, lo que respalda la hipótesis de que estos eventos extremos tienen un impacto significativo en la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos en la región. La identificación de patrones de precipitación

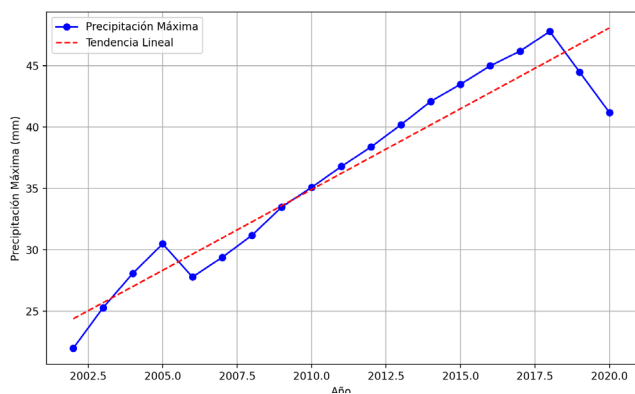


Figura 1. Tendencia de la Precipitación Máxima en 24 horas (2002 - 2020)

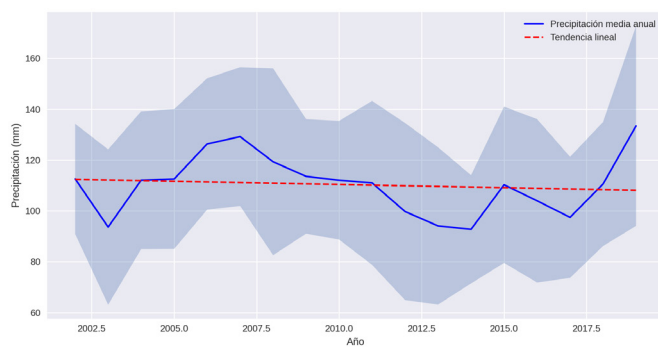


Figura 2. Tendencia de la precipitación anual (2002 - 2020)

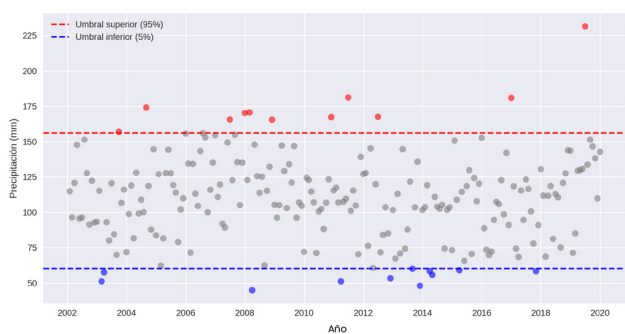


Figura 3. Identificación de eventos extremos de precipitación

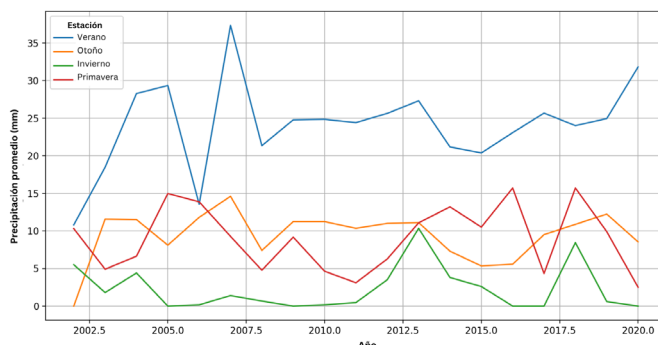


Figura 4. Tendencias de precipitación estacional

Tabla 1: Resumen de las implicaciones en la gestión de recursos hídricos

Aspecto	Hallazgos clave
Influencias climáticas	Los fenómenos del Niño y de la Niña afectan significativamente los patrones de precipitación.
Tendencias temporales	Comportamiento oscilatorio multidecenal en patrones de precipitación.
Eventos extremos	Aumento de la frecuencia e intensidad de inundaciones y sequías.
Impacto de eventos extremos	Impactos socioeconómicos significativos, incluidas pérdidas agrícolas, humanas y daños a la infraestructura.
Gestión del agua	Importancia de la previsión, las estrategias de adaptación y el desarrollo de políticas para la gestión de los recursos hídricos.

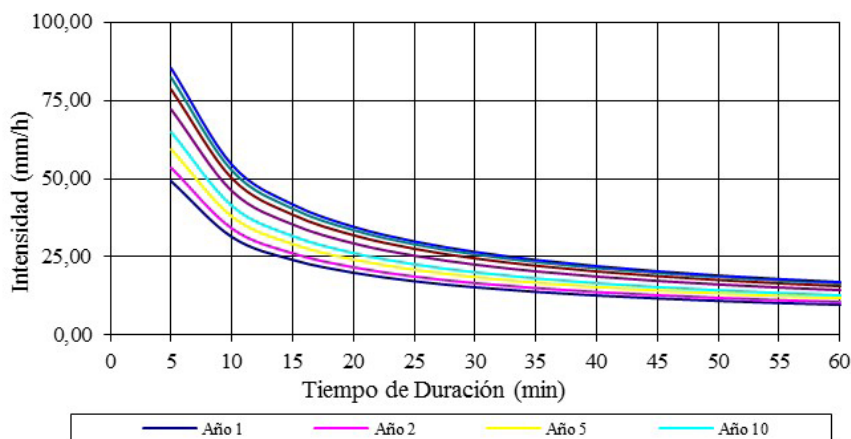


Figura 5. Curva de intensidad-tiempo de duración-periodo de retorno

interanual y multi decenal en la cuenca, con fluctuaciones notables en los periodos secos y húmedos, resalta la vulnerabilidad del área a estos eventos extremos climáticos. A nivel global, estudios previos han mostrado que El Niño y La Niña provocan variaciones en los regímenes de precipitación, que se reflejan en ciclos de sequías e inundaciones que afectan la seguridad hídrica de las poblaciones rurales (Seiler et al., 2013; González, 2015).

En el caso del río Tipani, el análisis de las series de tiempo de precipitación revela un comportamiento marcado de sequías durante los años asociados con El Niño y un aumento significativo de las precipitaciones durante los eventos de La Niña. Estos eventos extremos no solo afectan la cantidad de agua disponible, sino también su calidad. En años de sequía, la reducción en el caudal del río puede concentrar contaminantes y agravar la escasez de agua para consumo humano y riego agrícola. Por otro lado, las lluvias intensas de La Niña pueden generar desbordes y contaminación de las fuentes hídricas, afectando las infraestructuras y generando riesgos para la salud pública (Silva et al., 2015).

Las consecuencias de estos eventos extremos son evidentes en los municipios de la región, donde las sequías han reducido considerablemente el acceso al agua potable y afectado la producción agrícola, que depende de los ciclos de lluvia estacionales. La falta de lluvias en años críticos y el cambio abrupto en los patrones de precipitación obligan a los agricultores a modificar sus estrategias de riego, afectando la seguridad alimentaria y el bienestar económico de las comunidades (Minucci & Minucci, 2021). Este fenómeno refuerza la necesidad de incorporar en la gestión de los recursos hídricos estrategias adaptativas basadas en la variabilidad climática, como el uso de infraestructuras de almacenamiento de agua y sistemas de riego eficiente, que permitan mitigar los efectos de la sequía.

Además, el cambio climático parece haber intensificado los efectos de estos eventos extremos climatológicos, con una mayor frecuencia y severidad de los eventos de El Niño y La Niña, lo cual es consistente con las tendencias observadas a nivel global (Mu et al., 2024). Esto plantea un desafío adicional para la planificación y la gestión de los recursos hídricos, ya que las condiciones de extrema sequedad e inundaciones pueden ocurrir con mayor frecuencia y en períodos más cortos de tiempo, complicando la capacidad de respuesta de las autoridades locales y nacionales. En este sentido, el uso de modelos climáticos avanzados y sistemas de alerta temprana resulta crucial para prever y mitigar los impactos de estos eventos extremos, permitiendo una toma de decisiones más informada y proactiva.

Por otro lado, la implementación de medidas de adaptación que integren tanto conocimientos tradicionales como innovaciones tecnológicas en la gestión del agua podría ser clave para mejorar la resiliencia de la región. Prácticas como la reforestación en las cuencas hidrográficas, la conservación del suelo y el uso de tecnologías de captación de agua de lluvia pueden contribuir a mejorar la disponibilidad de agua en los periodos secos y reducir el riesgo de inundaciones durante los picos de precipitación. De la misma manera, el fortalecimiento de las infraestructuras hidráulicas y la promoción de técnicas de riego más eficientes son esenciales para enfrentar los desafíos que plantea la variabilidad climática y los eventos extremos de precipitación (Bauer et al., 2018; de la Riva et al., 2013).

Los eventos extremos de El Niño y La Niña están influyendo de manera significativa en los patrones de precipitación y en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Tipani, lo que afecta tanto a la seguridad hídrica como al desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales. La implementación de políticas públicas orientadas a la adaptación climática, basadas en una mejor gestión de los recursos hídricos y el uso de tecnologías apropiadas, es crucial para reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de la región ante estos eventos extremos.

## Conclusión

El análisis de la cuenca del río Tipani (2002-2020) revela un aumento del 25% en las precipitaciones máximas (1.32 mm/año,  $p < 0.001$ ) y eventos extremos entre 2016-2019, destacando la necesidad de infraestructuras adaptadas a caudales de 248.31 m<sup>3</sup>/s y alturas de 2.705 m. Los picos de lluvia en verano y mínimos en julio-agosto exigen estrategias de almacenamiento hídrico, mientras que las proyecciones al 2040 prevén un aumento a 74 mm y una correlación negativa temperatura-precipitación (-0.97). Estos hallazgos son clave para políticas de gestión hídrica sostenible frente al cambio climático.

### *Declaración de conflictos*

Los autores no tenemos conflictos de interés

### *Contribuciones de los autores*

V.R.M.CH. contribuyó con la conceptualización, metodología, investigación, análisis de datos, redacción del borrador y validación. N.CH.A. realizó la revisión y edición.

### *Agradecimiento*

Agradecemos a la comunidad de Arrozpata por su colaboración en la recopilación de datos, aunque la interpretación y conclusiones son responsabilidad de los autores.

### **Referencias**

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(1), 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Bauer, T., Ingram, V., De Jong, W., & Arts, B. (2018). The socio-economic impact of extreme precipitation and flooding on forest livelihoods: evidence from the Bolivian Amazon. *International Forestry Review*, 20(3), 314-331. <https://doi.org/10.1505/146554818824063050>
- Canedo-Rosso, C., Uvo, C. B., & Berndtsson, R. (2019). Precipitation variability and its relation to climate anomalies in the Bolivian Altiplano. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2096-2107. DOI: 10.1002/joc.5937
- Castillo-Castillo, M., Delgado-Granados, H., García-Marín, R., & López-Moreno, J. I. (2021). Assessment of climate variability and trends in the Bolivian Andes through hydroclimatic indices. *European Journal of Remote Hydrology*, 35(2), 100832 <https://doi.org/10.1016/j.jrh.2021.10083>
- De la Riva, M. V., Lindner, A., & Pretzsch, J. (2013). Assessing adaptation–Climate change and indigenous livelihood in the Andes of Bolivia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)*, 114(2), 109-122.
- Gonzalez, R. B. (2015). Impacts of climate change on crop production in Bolivia and Peru: A systematic review of evidence. *Outlook on Agriculture*, 44(2), 143-149. <https://doi.org/10.5367/oa.2015.0208>.
- López-García, J., Martínez-Austria, P. F., Rodríguez-Varela, J. M., & Pacheco-Salazar, V. H. (2021). Development and validation of intensity-duration-frequency curves in the central Andes: A case study for Bolivia. *European Journal of Remote Hydrology*, 36(3), 100917. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100917>
- Minucci, G., & Minucci, G. (2021). Bolivia Case Study. Enabling Adaptive Water Management to Face Drought Risk in a Changing Climate, 71-113. riverari DOI: 10.1007/978-3-030-55137-7
- Molina-Carpio, J., Espinoza, J. C., Vauchel, P., Ronchail, J., Caloir, B. G., Guyot, J. L., & Noriega, L. (2017). Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends. *European Journal of Remote Hydrology*, 15, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.09.004>
- Morales-González, D. F., Rodríguez-Sánchez, J. P., & González-Méndez, M. (2023). Comparison of time of concentration estimation methods for mountain watersheds in the tropical Andes. *Water*, 15(1), 183. <https://doi.org/10.3390/water15010183>
- Mu, Y., Jones, C., Carvalho, L., Xue, L., Liu, C., & Ding, Q. (2024). Pacific decadal oscillation and ENSO forcings of northerly low-level jets in South America. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00852-6>
- Pereira-Cardenal, S. J., Riegels, N. D., Berry, P. A. M., Smith, R. G., Yakovlev, A., Siegfried, T. U., & Bauer-Gottwein, P. (2019). Real-time remote sensing driven river basin modeling using radar altimetry. *Journal of Hydrology*, 573, 496-505. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124033>
- Ramírez-Villegas, J., Salazar, A., Jarvis, A., & Navarro-Racines, C. E. (2020). A way forward on adaptation to climate change in Colombian agriculture: perspectives towards 2050. *Environmental Letters*, 15(2), 025005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8e40>
- Rivera-Velázquez, H. G., Martínez-Santos, P., & Holguín-Quiroz, E. (2022). Application of the modified rational method for flash flood assessment in high-mountain watersheds of the tropical Andes. *Hydrology*, 9(4), 58. <https://doi.org/10.3390/hydrology9040058>
- Segura-Delgado, F., Gómez-Beas, R., & Polo, M. J. (2020). Long-term analysis of water resources in semi-arid high mountain regions: trends and correlations with climate variables. *Water*, 12(1), 216. <https://doi.org/10.3390/w12010216>
- Seiler, C., Hutjes, R. W., & Kabat, P. (2013). Climate variability and trends in Bolivia. *Journal of applied meteorology and climatology*, 52(1), 130-146. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0105.1>
- Seth, A., Thibeault, J., Garcia, M., & Valdivia, C. (2010). Making sense of twenty-first-century climate change in the Altiplano: observed trends and CMIP3 projections. *Annals of the association of American geographers*, 100(4), 835-847. <https://doi.org/10.1080/00045608.2010.500193>
- Silva, A. C. S., Galvão, C. D. O., & Silva, G. N. S. (2015). Droughts and governance impacts on water scarcity: an analysis in the Brazilian semi-arid. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 369(369), 129-134. <https://doi.org/10.5194/piahs-369-129-2015>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges for water management. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.001>