

Modelado de eventos extremos de precipitación en Puno mediante distribuciones de cola pesada y validación bootstrap

Renzo Robiño Tito Chura

1. Introducción

Los eventos extremos de precipitación representan un desafío crítico para la seguridad hídrica y alimentaria a nivel global, con impactos particularmente severos en regiones montañosas tropicales [1]. En el Altiplano peruano, la agricultura de secano depende directamente de patrones pluviales cada vez más erráticos, lo que afecta sustancialmente a la economía y subsistencia de la población de Puno [2]. Aunque existen metodologías consolidadas para el modelado estadístico de extremos [3], su aplicación en contextos andinos sigue siendo limitada, especialmente en lo que respecta al uso de distribuciones de probabilidad modernas capaces de capturar comportamientos de cola pesada y asimetrías pronunciadas [4].

Las evaluaciones recientes confirman que los impactos de los eventos extremos (sequías e inundaciones) en los Andes son ya sustanciales y atribuibles al cambio climático [2]. Para la modelación estadística de estos extremos, la práctica hidrológica a nivel global a menudo recurre a distribuciones tradicionales como la Generalizada de Valores Extremos (GEV) o Gumbel, las cuales pueden subestimar la probabilidad de eventos raros cuando los datos presentan colas pesadas [5,6]. Esta brecha metodológica—entre la complejidad de los fenómenos andinos y las herramientas estadísticas comúnmente empleadas—reduce la confiabilidad de los pronósticos de diseño, aumentando la vulnerabilidad frente a sequías e inundaciones [7]. El análisis de sistemas hídricos andinos, como el del proyecto Rositas en Bolivia [15], evidencia la necesidad de modelación precisa de extremos para la planificación de infraestructura resiliente. Por ello, se requiere con urgencia evaluar distribuciones más flexibles, como la Power Lindley [8], que han demostrado superior ajuste en datos extremos de otros contextos geográficos pero que no han sido aplicadas sistemáticamente en el Altiplano peruano. Estudios recientes sobre fluctuaciones extremas no-Gaussianas [9] refuerzan la relevancia de estos enfoques teóricos avanzados.

Este trabajo tiene como objetivo principal desarrollar un marco comparativo robusto para modelar precipitaciones máximas diarias en Puno, incorporando tanto distribuciones clásicas como alternativas de cola pesada, y cuantificando la incertidumbre mediante técnicas de remuestreo bootstrap [10]. Se espera identificar el modelo que mejor capture la probabilidad de eventos extremos locales, generar pronósticos de diseño con intervalos de confianza para períodos de retorno entre 2 y 100 años, y proporcionar una herramienta computacional accesible que apoye la toma de decisiones en el sector agrícola [11]. La contribución radica en cerrar la brecha entre avances metodológicos en estadística de extremos y su aplicación concreta a problemáticas socioambientales andinas, ofreciendo no solo evidencia estadística sólida sino también un producto de transferencia tecnológica escalable [12].

La solución propuesta se basa en una metodología de cuatro etapas: (1) procesamiento de series históricas de precipitación diaria (2004–2024) del SENAMHI; (2) ajuste y comparación de distribuciones clásicas (GEV, Gumbel, Gamma) y modernas (Power Lindley, Zeghdoudi) mediante criterios de información (AIC/BIC) y pruebas de bondad de ajuste; (3) cuantificación de incertidumbre vía bootstrap paramétrico para la construcción de intervalos de confianza [13]; y (4) implementación de los resultados en una aplicación interactiva desarrollada en R-Shiny. Este enfoque integra rigor metodológico con aplicabilidad práctica, asegurando que los hallazgos sean tanto estadísticamente válidos como útiles para los actores locales [14].

Referencias

- [1] K. Hove, P. Nyamugure, P. Mdlongwa, S. K. Awala, T. Nyathi, T. Dube, “Statistical modelling of spatio-temporal rainfall trends, dependence, and extremes in Zimbabwe (1984–2024)”, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 156, no. 11, p. 625, 2025. doi:[10.1007/s00704-025-05865-6](https://doi.org/10.1007/s00704-025-05865-6).
- [2] A. Ochoa-Sánchez, D. Stone, F. Drenkhan, D. Mendoza, R. Gualán, C. Huggel, “Detection and attribution of climate change impacts in coupled natural-human systems in the Andes”, *Communications Earth & Environment*, vol. 6, no. 1, p. 314, 2025. doi:[10.1038/s43247-025-02092-9](https://doi.org/10.1038/s43247-025-02092-9).
- [3] S. M. Papalexiou, D. Koutsoyiannis, “Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme rainfall”, *Water Resources Research*, vol. 49, no. 1, pp. 187–201, 2013. doi:[10.1029/2012WR012557](https://doi.org/10.1029/2012WR012557).
- [4] E. MacDonald, B. Merz, B. Guse, V. D. Nguyen, X. Guan, S. Vorogushyn, “What controls the tail behaviour of flood series: rainfall or runoff generation?”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 28, no. 4, pp. 833–850, 2024. doi:[10.5194/hess-28-833-2024](https://doi.org/10.5194/hess-28-833-2024).
- [5] Z. A. Zakaria, N. S. Suhami, M. A. Syahmi, N. A. Mahiddin, R. H. R. Bongsu, “L-Moments Approach for Modelling Maximum Daily Rainfall”, *Environment and Ecology Research*, vol. 13, no. 5, pp. 657–667, 2025. doi:[10.13189/eer.2025.130505](https://doi.org/10.13189/eer.2025.130505).
- [6] M. Boutigny, P. Ailliot, A. Chaubet, P. Naveau, B. Saussol, “A meta-Gaussian distribution for sub-hourly rainfall”, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 37, no. 10, pp. 3915–3927, 2023. doi:[10.1007/s00477-023-02487-0](https://doi.org/10.1007/s00477-023-02487-0).
- [7] Á. Ayala, E. Muñoz-Castro, D. Farinotti, D. Farías-Barahona, P. A. Mendoza, “Less water from glaciers during future megadroughts in the Southern Andes”, *Communications Earth & Environment*, vol. 6, no. 1, p. 860, 2025. doi:[10.1038/s43247-025-02845-6](https://doi.org/10.1038/s43247-025-02845-6).
- [8] M. E. Ghitany, B. Atieh, S. Nadarajah, “Power Lindley distribution and associated inference”, *Computational Statistics & Data Analysis*, vol. 64, pp. 20–33, 2013. doi:[10.1016/j.csda.2013.02.027](https://doi.org/10.1016/j.csda.2013.02.027).
- [9] Y. Zheng, Y. Hu, N. Boers, J. Duan, J. Kurths, “Impact of precipitation on the resilience of tropical forests to non-Gaussian Lévy fluctuations”, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 141, p. 115931, 2025. doi:[10.1016/j.apm.2025.115931](https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.115931).
- [10] E. Hajani, “Uncertainty in stationary and nonstationary IFD curves with future projections in Australia”, *Science of the Total Environment*, vol. 1010, p. 181127, 2026. doi:[10.1016/j.scitotenv.2025.181127](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.181127).
- [11] M. N. Ibrahim, “Assessment of the Uncertainty Associated with Statistical Modeling of Precipitation Extremes for Hydrologic Engineering Applications in Amman, Jordan”, *Sustainability*, vol. 14, no. 24, p. 17052, 2022. doi:[10.3390/su142417052](https://doi.org/10.3390/su142417052).
- [12] A. K. Dey, M. S. A. Patwary, “Utilizing non-stationary extreme value model to quantify extreme rainfall in two major cities in Bangladesh”, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 39, no. 6, pp. 2281–2296, 2025. doi:[10.1007/s00477-025-02969-3](https://doi.org/10.1007/s00477-025-02969-3).
- [13] S. E. Ali Rahmani, B. Chibane, A. Boucefiane, F. Hallouz, M. Bentchakal, “Heavy tail distribution and Deuterium excess for drought assessment case of Djelfa-watershed (Algeria)”, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 155, no. 7, pp. 6151–6165, 2024. doi:[10.1007/s00704-024-04999-3](https://doi.org/10.1007/s00704-024-04999-3).
- [14] M.-H. Yeo, V.-T.-V. Nguyen, Y. S. Kim, T. A. Kpodonu, “An Integrated Extreme Rainfall Modeling Tool (SDExtreme) for Climate Change Impacts and Adaptation”, *Water Resources Management*, vol. 36, no. 9, pp. 3153–3179, 2022. doi:[10.1007/s11269-022-03194-1](https://doi.org/10.1007/s11269-022-03194-1).

- [15] I. A. Chavez Flores, S. Mendoza Paz, M. F. Villazón Gómez, P. Willems, A. Gobin, “Impacts of climate change on the hydropower potential of a multipurpose storage system project in Bolivian Andes”, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 62, p. 102903, 2025. doi:[10.1016/j.ejrh.2025.102903](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102903).