

Métodos para estimar la incertidumbre en modelos hidrológicos en cuencas altoandinas del Perú

Edgar R. Quiroz^{1*} y Eduardo A. Chavarri²

1. Profesor, Unidad del posgrado/Facultad de Ingeniería Civil/Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, Teléfono: (51) 481-1070, Email: edquirozv@uni.pe
2. Profesor, Escuela de posgrado/Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú, Teléfono: (51) 614-7800, Email: echavarri@lamolina.edu.pe

RESUMEN

La gestión efectiva de los recursos hídricos en las cuencas altoandinas del Perú se ve significativamente afectada por la intrínseca complejidad hidrológica de la región, la marcada variabilidad climática y, fundamentalmente, la escasez de datos hidrometeorológicos observados. En este contexto, la modelización hidrológica, si bien es una herramienta crucial para la toma de decisiones, está sujeta a múltiples fuentes de incertidumbre que pueden comprometer la fiabilidad de sus predicciones. Este artículo analiza y aplica diversos métodos para la estimación y reducción de esta incertidumbre, con el objetivo de mejorar la capacidad predictiva de los modelos hidrológicos y apoyar una gestión del agua más robusta y sostenible en la escala de subcuenca. Se destacan metodologías como la regionalización de parámetros, la calibración multi-objetivo, la asimilación de datos y la evaluación crítica de productos de precipitación basados en satélites, que en conjunto permiten cuantificar y, en cierta medida, mitigar la incertidumbre en la simulación de la disponibilidad hídrica.

1. Introducción

El Perú, un país caracterizado por su compleja topografía andina y su ubicación en el corazón de la cuenca amazónica, alberga una inmensa diversidad hidrológica. La cuenca del Amazonas, la más grande del planeta, cubre el 10% de su área total en la Amazonía peruana-andina (PAB), distinguiéndose por regiones con planicies de tierras bajas amazónicas y las empinadas y altas montañas de los Andes. Esta configuración geográfica genera una notable variabilidad espacio-temporal en la precipitación y eventos extremos como sequías y crecidas históricas. Paradójicamente, la vertiente del Pacífico, que concentra casi el 50% de la población peruana, dispone de apenas el 2% del total nacional de agua dulce, situación que subraya una severa escasez hídrica y presiones sobre el recurso.

La escasez de datos hidrometeorológicos observados es un desafío recurrente en la región andina, lo que dificulta una comprensión precisa de los procesos hidrológicos y la implementación de modelos robustos. Los modelos hidrológicos, si bien son herramientas esenciales para la estimación y gestión de los recursos hídricos, están inherentemente sujetos a incertidumbres. Estas provienen de la entrada de datos (especialmente precipitación), la estructura del modelo y la estimación de sus parámetros. La cuantificación y reducción de estas incertidumbres es fundamental para mejorar la

capacidad predictiva de los modelos y garantizar que las decisiones de gestión del agua se basen en información lo más fiable posible, un aspecto crítico para la planificación a corto y largo plazo frente a los impactos del cambio climático y el crecimiento poblacional. El objetivo de este artículo es analizar y aplicar diversos métodos de estimación de incertidumbre en modelos hidrológicos, enfocados en mejorar la capacidad predictiva de dichos modelos y apoyar la toma de decisiones en la gestión del agua en cuencas altoandinas. En particular, se consideran metodologías que permiten cuantificar y reducir la incertidumbre en la simulación de la disponibilidad hídrica a escala de subcuenca.

2. Metodología

La cuantificación y reducción de la incertidumbre en la modelización hidrológica en cuencas altoandinas del Perú requiere un enfoque metodológico multifacético que aborde las distintas fuentes de error. Las principales fuentes de incertidumbre incluyen:

- Incertidumbre de los parámetros del modelo: Relacionada con los valores óptimos de los parámetros del modelo, que pueden variar y no ser únicos (equifinalidad).
- Incertidumbre de los datos de entrada (forzamiento): Principalmente la precipitación, pero también la evapotranspiración, temperatura, uso del suelo y características del suelo. En la región andina, la baja densidad de estaciones de aforo y la complejidad orográfica son factores clave que introducen incertidumbre en las estimaciones de precipitación.
- Incertidumbre estructural del modelo: Derivada de las simplificaciones en la representación de los procesos hidrológicos reales.

Para abordar estas incertidumbres, diversas metodologías han sido exploradas y aplicadas en el contexto peruano:

2.1. Calibración y Validación de Modelos La calibración y validación son pasos fundamentales para asegurar la robustez de un modelo hidrológico. Este proceso implica ajustar los parámetros del modelo utilizando un conjunto de datos observados (calibración) y luego verificar su rendimiento con un conjunto de datos independiente (validación). En cuencas altoandinas con escasez de datos, la disponibilidad de series temporales fiables de caudal y variables climáticas es limitada. Sin embargo, se ha demostrado que, incluso con datos escasos, es posible obtener simulaciones de caudal aceptables. Por ejemplo, modelos como el GR2M y MWB3 han sido calibrados y validados en cuencas amazónicas-andinas peruanas, mientras que el modelo PREVAH ha sido aplicado en la cuenca de Vilcanota con datos de aforos y estimaciones satelitales post-procesadas.

2.2. Regionalización de Parámetros Cuando la información de aforo es inexistente o muy limitada en una cuenca, la regionalización de parámetros permite transferir información de cuencas calibradas (donantes) a cuencas no aforadas (receptoras). Este enfoque se basa en la suposición de que cuencas con similitudes físicas e hidroclimáticas (como topografía, uso del suelo, tipo de suelo y clima) presentarán respuestas hidrológicas similares y, por lo tanto, parámetros de modelo comparables. En el Perú, se ha desarrollado una metodología para la estimación de parámetros regionales del modelo SWAT en la vertiente del Pacífico, agrupando cuencas en regiones hidrológicamente homogéneas. La incertidumbre asociada a este proceso se ha cuantificado mediante técnicas como el bootstrapping, que permite derivar bandas de incertidumbre alrededor de los parámetros estimados regionalmente. Más recientemente, se ha implementado un modelo hidrológico nacional (ARNO/VIC+RAPID) utilizando un enfoque de regionalización basado en similitud para miles de subcuenca en todo el

Perú, logrando un buen rendimiento, especialmente en la costa del Pacífico y la transición Andes-Amazonía.

2.3. Calibración Multi-Objetivo La calibración tradicional de modelos hidrológicos a menudo se centra en un único objetivo, como la optimización de la similitud entre el caudal simulado y el observado. Sin embargo, esto no garantiza una representación precisa de los procesos hidrológicos internos. La calibración multi-objetivo busca optimizar simultáneamente varios criterios de rendimiento, como el caudal, la partición del flujo (ej. caudal base), la dinámica del índice de área foliar (LAI) o el balance hídrico. Un estudio reciente en la cuenca del río Vilcanota aplicó un marco de calibración multi-objetivo con el modelo SWAT, incorporando datos de vegetación de teledetección (LAI) y firmas hidrológicas (curva de duración de flujo, índice de caudal base) además del caudal. Este enfoque superó las estrategias de calibración basadas únicamente en el caudal, proporcionando simulaciones más consistentes y una mejor comprensión de los procesos hidrológicos internos del ecosistema andino.

2.4. Asimilación de Datos de Caudal La asimilación de datos (DA) es una técnica avanzada que combina la información de modelos hidrológicos con observaciones en tiempo real para reducir la incertidumbre en los pronósticos de caudal. Esto se logra actualizando los estados del modelo (ej. humedad del suelo, almacenamiento) a medida que las observaciones de caudal están disponibles. En la cuenca del río Vilcanota, propensa a inundaciones, se han evaluado algoritmos como el Ensemble Kalman Filter (EnKF) y el Particle Filter (PF) para la asimilación de datos de caudal horario en tiempo real. Los enfoques de modelado de *ensemble* (múltiples simulaciones para representar el rango de incertidumbre) combinados con DA han demostrado mejorar la precisión de los pronósticos de caudal a corto plazo, especialmente en situaciones de altos flujos.

2.5. Evaluación y Corrección de Productos de Precipitación Satelital (SPPs) Dado el monitoreo terrestre limitado, los SPPs son una fuente alternativa crucial de datos de entrada para la modelización hidrológica en la región andina. Sin embargo, estos productos pueden presentar sesgos y errores debido a la complejidad del terreno. Por lo tanto, su evaluación y corrección son pasos esenciales. Métodos como el mapeo de cuantiles (quantile mapping) y el cambio multiplicativo (multiplicative shift) se han aplicado para corregir los sesgos en los SPPs y datos de reanálisis (ERA-Interim).

Productos específicos evaluados en Perú incluyen:

- **TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA):** Ampliamente utilizado, aunque con variabilidad en su rendimiento según la cuenca.
- **PISCO (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations):** Un conjunto de datos grillados de alta resolución para Perú, que integra observaciones terrestres y satelitales (CHIRP).
- **IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM):** Ha demostrado ser uno de los productos de mayor calidad para simulación de caudales horarios en el Perú andino.
- **RAIN4PE (Rain for Peru and Ecuador):** Un nuevo conjunto de datos de precipitación grillada hidrológicamente ajustado, desarrollado mediante la fusión de múltiples fuentes (terrestres, satelitales y reanálisis) con elevación del terreno usando el método de Random Forest, y corregido inversamente con datos de caudal simulado.

3. Resultados

Los esfuerzos de investigación en las cuencas altoandinas del Perú han revelado importantes hallazgos en la cuantificación y reducción de la incertidumbre en modelos hidrológicos:

3.1. Logros en la Reducción de Incertidumbre

- Capacidad Predictiva Mejorada a Través de la Regionalización: La aplicación de metodologías de regionalización, particularmente aquellas basadas en la similitud física e hidroclimática, ha permitido la estimación de caudales diarios en cuencas no aforadas (ver figura 1). Los modelos como SWAT y el marco ARNO/VIC+RAPID han mostrado un buen rendimiento en cuencas de la vertiente del Pacífico y la transición Andes-Amazonía, donde las cuencas se agrupan eficazmente según sus características. La cuantificación de bandas de incertidumbre mediante bootstrapping ha proporcionado una medida de la robustez de estas estimaciones regionales.
- Representación Consistente de Procesos Hidrológicos Internos con Calibración Multi-Objetivo: La calibración multi-objetivo ha demostrado ser superior a los enfoques de calibración de un solo objetivo, al mejorar no solo la simulación del caudal, sino también la representación de procesos hidrológicos internos como la partición del flujo (ej., el caudal base) y la dinámica del Índice de Área Foliar (LAI). Esto conduce a modelos hidrológicos más realistas y físicamente consistentes, lo cual es crucial para comprender el presupuesto hídrico de la cuenca.
- Mayor Precisión en Pronósticos de Caudal Mediante Asimilación de Datos: Los estudios que emplean técnicas de asimilación de datos, como el Ensemble Kalman Filter (EnKF) y el Particle Filter (PF), han logrado mejorar la precisión de los pronósticos de caudal a corto plazo, especialmente en eventos de altos flujos. La combinación de datos de modelos y observaciones en tiempo real reduce las incertidumbres en las simulaciones, sentando las bases para sistemas de alerta temprana de inundaciones en cuencas altoandinas escasamente aforadas.

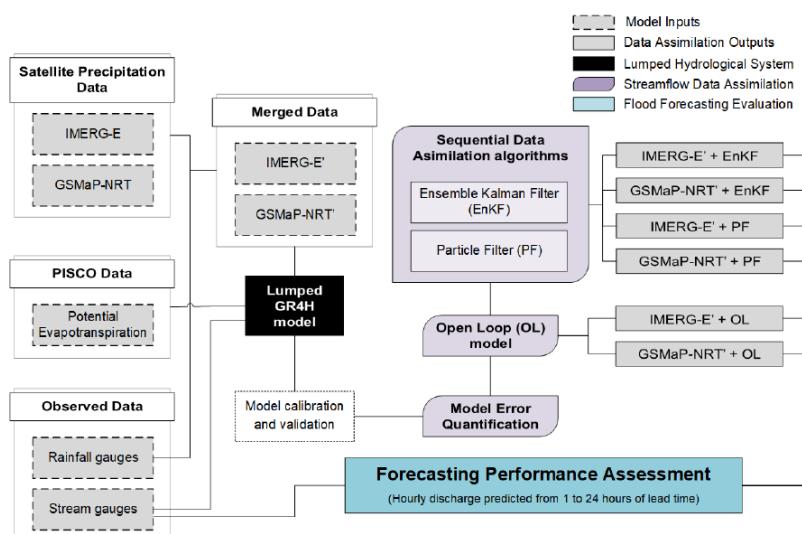


Figura 1 Marco de asimilación de datos de caudal en la cuenca del río Vilcanota. (Llaucha et al., 2023)

- Mejora de la Calidad de Datos de Entrada con Productos Satelitales Corregidos: La evaluación y corrección de Productos de Precipitación Satelital (SPPs) ha sido fundamental. Productos como IMERG (ver figura 2), GPM+SM2RAIN y SM2RAIN-ASCAT han demostrado un buen potencial tras la aplicación de métodos de corrección de sesgos como el mapeo de cuantiles. PISCO, el producto grillado nacional de precipitación y temperatura, y RAIN4PE, un nuevo conjunto de datos hidrológicamente ajustado que fusiona múltiples fuentes y utiliza datos de caudal para la corrección inversa, han mostrado un rendimiento superior en la modelización hidrológica en cuencas peruanas. Estos avances son clave para superar la limitación de la escasez de datos *in situ*.

3.2. Desafíos Persistentes

- Persistencia de la Escasez de Datos: A pesar de los avances en el uso de SPPs y la regionalización, la limitada disponibilidad de datos *in situ* a largo plazo y de alta resolución sigue siendo una restricción importante, especialmente en regiones de difícil acceso.
- Complejidad Orográfica y Heterogeneidad Hidroclimática: La extrema variabilidad altitudinal y climática de los Andes peruanos dificulta la representación precisa de los patrones de precipitación y los procesos hidrológicos, incluso con los modelos y datos más avanzados. Los modelos climáticos globales (GCMs) tienen una capacidad limitada para simular adecuadamente esta variabilidad debido a su resolución espacial y la compleja influencia dinámica en el clima local.
- Cuantificación de Flujos Extremos: Algunos modelos hidrológicos aún presentan desafíos para cuantificar correctamente las tasas de flujos altos (crecidas) durante los períodos húmedos.

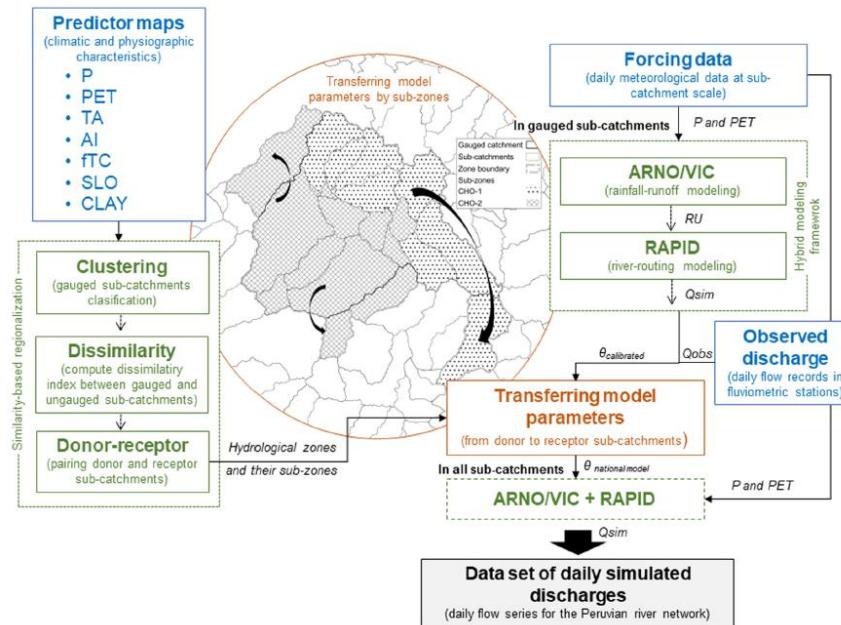


Figura 2 Marco para la simulación nacional de series de caudal diario a nivel de subcuenca aplicando una regionalización basada en la similitud para identificar zonas y subzonas hidrológicas, y un marco de modelado híbrido para la calibración de parámetros y la simulación de caudales en toda la red. (Llaucha et al., 2023b)

- Elección de Modelos: Los estudios sugieren que los modelos parsimoniosos (con menos parámetros) pueden ofrecer resultados más robustos que los modelos más complejos en entornos con escasez de datos. Los modelos complejos, aunque tienen el potencial de proporcionar una mayor comprensión de los procesos, requieren una calibración más exhaustiva y un mayor entendimiento de los procesos hidrológicos subyacentes, lo cual a menudo se ve obstaculizado por la falta de datos.

4. Conclusiones

La modelización hidrológica en las cuencas altoandinas del Perú es una tarea compleja y de vital importancia para la gestión del agua, enfrentada a la inevitable incertidumbre derivada de la escasez de datos y la heterogeneidad del entorno. La investigación en la región ha avanzado significativamente en el desarrollo y aplicación de métodos para cuantificar y, en gran medida, reducir esta incertidumbre, mejorando la fiabilidad de las predicciones de disponibilidad hídrica.

La regionalización de parámetros ha demostrado ser una herramienta indispensable para extender la capacidad predictiva de los modelos a cuencas no aforadas, mientras que la calibración multiobjetivo ha refinado la comprensión de los procesos hidrológicos internos, y la asimilación de datos ha optimizado los pronósticos en tiempo real, especialmente para la gestión de eventos extremos. Además, la evaluación rigurosa y la corrección de sesgos en los productos de precipitación satelital han sido cruciales para generar datos de entrada más precisos y confiables, destacando el potencial de productos como PISCO y RAIN4PE desarrollados en el propio Perú.

Estos avances han mejorado sustancialmente la capacidad predictiva de los modelos hidrológicos, proporcionando una base más sólida para la toma de decisiones en la planificación y gestión de los recursos hídricos en el Perú. Sin embargo, persisten desafíos importantes, principalmente la continua escasez de datos de alta calidad y la complejidad del terreno, que limitan la completa resolución de la incertidumbre. El futuro de la modelización hidrológica en los Andes peruanos requiere de una inversión continua en redes de monitoreo, la exploración de nuevas fuentes de datos (ej., teledetección de humedad del suelo, glaciares), y el desarrollo de enfoques interdisciplinarios que integren mejor los aspectos hidrológicos con los socioeconómicos y climáticos para una gestión del agua verdaderamente sostenible.

5. Bibliografía

- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a Sequential Uncertainty Fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340–1352. Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752. Abbaspour, K. C., Vaghefi, S., & Srinivasan, R. (2017). A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: a review of papers from the 2016 international SWAT conference. *Water*, 10(1), 6. Andres, N., Vegas Galdos, F., Lavado Casimiro, W. S., & Zappa, M. (2014). Water resources and climate change impact modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 2043–2059. Asurza-Véliz, F. A., & Lavado-Casimiro, W. S. (2020). Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage. *Water*, 12(11), 3198. Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. Aybar, C.,

Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a High-Resolution Gridded Rainfall Dataset for Peru from 1981 to the Present Day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785.

Baltazar, L. A., Viola, M. R., de Mello, C. R., Junqueira, R., & Amorim, J. da S. (2023). Hydrological modeling in a region with sparsely observed data in the eastern Central Andes of Peru, Amazon. *Journal of South American Earth Sciences*, 121, 104151.

Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology—The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105(1–2), 157–172.

Beven, K. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16(1), 41–51.

Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), 279–298.

Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 22–30.

Buytaert, W., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C., & Verbist, K. M. J. (2017). Glacial melt content of water use in the tropical Andes. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114014.

Carlos Mendoza, J. A., Chavez Alcazar, T. A., & Zuñiga Medina, S. A. (2021). Calibration and Uncertainty Analysis for Modelling Runoff in the Tambo River Basin, Peru, Using Sequential Uncertainty Fitting Ver-2 (SUFI-2) Algorithm. *Air, Soil and Water Research*, 14.

Carrillo-Rojas, G., Silva, A., Córdova, M., Céller, R., & Bendix, J. (2016). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data. *Mountain Research and Development*, 35(3), 230–239.

Céller, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355.

Correa, A., Ochoa-Tocachi, B. F., Birkel, C., Crespo, P., Céller, R., & Buytaert, W. (2020). A concerted research effort to advance the hydrological understanding of tropical páramos. *Hydrological Processes*, 34(21), 4609–4627.

Daneshvar, F., Frankenberger, J. R., Bowling, L. C., Cherkauer, K. A., & Moraes, A. G. de L. (2021). Development of strategy for SWAT hydrologic modeling in data-scarce regions of Peru. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(7), 04021025.

Daren-Harmel, R., & Smith, P. K. (2007). Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling. *Journal of Hydrology*, 337(3–4), 326–336.

Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, M. T. (2015). The Changing Water Cycle: Climatic and Socioeconomic Drivers of Water-Related Changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 715–733.

Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Vega-Jácome, F., & Bronstert, A. (2020). Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: a case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 66(1), 59–74.

Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds—Development and Hydrological Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 319–338.

Goyburo, A., Rau, P., Lavado-Casimiro, W., Buytaert, W., Cuadros-Adriazola, J., & Horna, D. (2023). Assessment of Present and Future Water Security under Anthropogenic and Climate Changes Using WEAP Model in the Vilcanota-Urubamba Catchment, Cusco, Perú. *Water*, 15(8), 1439.

Guyot, J. L., Bazán Córdova, H., Fraizy, P., Ordoñez Gálvez, J. J., Armijos Cardenas, E. N., & Laraque, A. (2007). Suspended Sediment Yields in the Amazon Basin of Peru, a First Estimation. *IAHS Scientific Assembly. HS2005—Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21st Century*, 314, 3–10.

Huard, D., & Mailhot, A. (2008). Calibration of hydrological model GR2M using Bayesian uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 44(2).

Huerta, A., Aybar, C., & Lavado-Casimiro, W. (2018). PISCO temperatura v.1.1. SENAMHI—DHI—2018, Lima—Perú. Llaucha, H., Arestegui, M., & Lavado-Casimiro, W. (2023). Constraining Flood

Forecasting Uncertainties through Streamflow Data Assimilation in the Tropical Andes of Peru: Case of the Vilcanota River Basin. *Water*, 15(22), 3944. Llaucha, H., Lavado-Casimiro, W., León, K., Jimenez, J., Traverso, K., & Rau, P. (2021). Assessing Near Real-Time Satellite Precipitation Products for Flood Simulations at Sub-Daily Scales in a Sparsely Gauged Watershed in Peruvian Andes. *Remote Sensing*, 13(5), 826. Llaucha, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., & Rau, P. (2021). PISCO_HyM_GR2M: A Model of Monthly Water Balance in Peru (1981–2020). *Water*, 13(8), 1048. Llaucha, H., León, K., & Lavado-Casimiro, W. (2023). Construction of a Daily Streamflow Dataset for Peru Using a Similarity-Based Regionalization Approach and a Hybrid Hydrological Modeling Framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101381. Liu, Y., & Gupta, H. V. (2007). Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, 43(7). Maggioni, V., & Massari, C. (2018). A review of satellite-based precipitation products and their hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 558, 214–227. Manz, B., Páez-Bimos, S., Horna, N., Buytaert, W., Ochoa-Tocachi, B., Lavado-Casimiro, W., & Willems, B. (2017). Comparative ground validation of IMERG and TMPA at variable spatiotemporal scales in the tropical Andes. *Journal of Hydrometeorology*, 18(9), 2469–2489. Mazer, K. E., Tomasek, A. A., Daneshvar, F., Bowling, L. C., Frankenberger, J. R., McMillan, S. K., Novoa, H. M., & Zeballos-Velarde, C. (2022). Integrated Hydrologic and Hydraulic Analysis of Torrential Flood Hazard in Arequipa, Peru. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 171, 93–110. Mendoza, P. A., McPhee, J., & Vargas, X. (2012). Uncertainty in Flood Forecasting: A Distributed Modeling Approach in a Sparse Data Catchment. *Water Resources Research*, 48(9). Monge-Salazar, M. J., Tovar, C., Cuadros-Adriazola, J., Baiker, J. R., Montesinos-Tubée, D. B., Bonnesoeur, V., Antiporta, J., Román-Dañobeytia, F., Fuentealba, B., Ochoa-Tocachi, B. F., & Buytaert, W. (2022). Ecohydrology and ecosystem services of a natural and an artificial bofedal wetland in the Central Andes. *The Science of the Total Environment*, 838, 155968. Muñoz, R., Huggel, C., Drenkhan, F., Vis, M., & Viviroli, D. (2021). Comparing model complexity for glacio-hydrological simulation in the data-scarce Peruvian Andes. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100932.

***Autor Correspondiente:** Unidad de posgrado/Facultad de Ingeniería Civil/Universidad Nacional de Ingeniería, Profesor, Av. Tupac Amaru 210, Rimac, Lima, Perú, Código postal: 15333. Teléfono: +51 4811070. Correo electrónico: equiroz.eng@gmail.com; edquirozv@uni.pe