

XII

Modelamiento espacio-temporal de la hidroquímica y disponibilidad de agua por retroceso glaciar en la subcuenca del río Quillcay, Cordillera Blanca, Áncash

Jose Victor Quiroz Ramirez

Modelamiento espacio-temporal de la hidroquímica y disponibilidad de agua por retroceso glaciar en la subcuenca del río Quillcay, Cordillera Blanca, Áncash

Jose Victor Quiroz Ramirez

RESUMEN

El retroceso glaciar provocado por el cambio climático en la subcuenca del río Quillcay (Cordillera Blanca, Perú) ha desencadenado una severa transición cuantitativa e hidroquímica del recurso hídrico. Al haber superado el umbral del peak water, la subcuenca experimenta una reducción progresiva de los caudales de estiaje y una creciente dependencia del almacenamiento subterráneo en morrenas y bofedales. Simultáneamente, la desglaciación expone lechos de roca madre ricos en minerales sulfurados como la pirita, acelerando los procesos de meteorización e intemperismo que generan Drenaje Ácido de Roca (DAR) de origen natural. Esta fenomenología provoca una marcada acidificación de los cursos de agua y un incremento crítico en la solubilización de metales pesados (hierro, aluminio, manganeso, arsénico y cadmio), comprometiendo la calidad del agua desde las microcuencas de cabecera (Llaca y Shallap) hasta el curso principal. Frente a la alteración de los servicios ecosistémicos y los riesgos emergentes para la salud pública y las actividades agropecuarias en Huaraz, resulta imperativo fortalecer los modelos de simulación hidrológica e hidroquímica de alta frecuencia e implementar estrategias de adaptación basadas en ecosistemas, infraestructura verde y gobernanza participativa del agua para garantizar la seguridad hídrica en cuencas de alta montaña.

Palabras clave: Retroceso glaciar, Hidroquímica, Drenaje Ácido de Roca, Disponibilidad hídrica, Río Quillcay.

ABSTRACT

Glacier retreat driven by climate change in the Quillcay River sub-basin (Cordillera Blanca, Peru) has triggered a severe quantitative and hydrochemical shift in water resources. Having surpassed the "peak water" threshold, the sub-basin is experiencing a progressive reduction in dry-season flows and an increasing reliance on groundwater stored in moraines and *bofedales* (high-altitude wetlands). Simultaneously, deglaciation exposes bedrock rich in sulfide minerals—such as pyrite—accelerating weathering processes that generate naturally occurring Acid Rock Drainage (ARD). This phenomenon causes marked acidification of watercourses and a critical increase in the solubilization of heavy metals (iron, aluminum, manganese, arsenic, and cadmium), compromising water quality from headwater micro-basins (Llaca and Shallap) down to the main river channel. Given the disruption of ecosystem services and emerging risks to public health and agricultural activities in Huaraz, it is imperative to strengthen high-frequency hydrological and hydrochemical simulation models and to implement adaptation strategies based on ecosystems, green infrastructure, and participatory water governance to ensure water security in high-mountain basins.

Keywords: Glacier retreat, Hydrochemistry, Acid Rock Drainage, Water availability, Quillcay River.

INTRODUCCIÓN

La subcuenca del río Quillcay, situada en la vertiente occidental de la Cordillera Blanca en la región Áncash, Perú, constituye una unidad hidrográfica estratégica de fundamental importancia ecológica y socioeconómica. Esta subcuenca abastece de agua potable a la ciudad de Huaraz y sustenta múltiples actividades agrícolas, ganaderas y energéticas a nivel local. Sin embargo, su equilibrio hidrológico se encuentra fuertemente amenazado por su elevada vulnerabilidad frente a las variaciones climáticas globales (Baraer et al., 2012; Mark & Seltzer, 2003).

En las últimas décadas, los Andes Tropicales han experimentado un acentuado proceso de deglaciación impulsado por el incremento de la temperatura atmosférica, ubicando a Perú entre los países más afectados por la pérdida de masa glaciar. En la subcuenca del río Quillcay, este fenómeno se evidencia en la drástica contracción

del volumen de hielo en sus principales microcuencas aportantes, tales como Llaca, Cojup, Quilcayhuanca y Shallap (Bury et al., 2011; Soruco et al., 2015). Si bien el derrame inicial por retroceso glaciar genera un incremento temporal en los caudales, la cuenca ha sobrepasado o se aproxima al umbral crítico conocido como peak water, lo que desencadena una disminución sostenida de la disponibilidad hídrica en época de estiaje y acentúa la dependencia del almacenamiento subterráneo y las precipitaciones estacionales (Baraer et al., 2012; McKenzie et al., 2012).

A la reducción cuantitativa de la oferta de agua se le suma una compleja fenomenología hidroquímica derivada del desglaciamiento. El retroceso de la cobertura glaciar expone lechos de roca madre ricos en minerales sulfurados, como la piritita y la pirrotina, a la acción directa del oxígeno atmosférico y la humedad (Fortner et al., 2011; Santofimio & López-Pamo, 2013). Este proceso acelera la meteorización química y desencadena la generación de Drenaje Ácido de Roca (DAR) de origen natural, caracterizado por una marcada acidificación de los cursos de agua y la consiguiente solubilización y transporte de metales pesados como hierro, aluminio, manganeso, arsénico y cadmio (Burns et al., 2022; Guittard et al., 2017). Esta alteración de la firma hidrogeoquímica compromete seriamente la calidad del agua desde las cabeceras hasta la confluencia con el río Santa.

Frente a este escenario, resulta imperativo articular la amplia pero fragmentada literatura científica existente sobre la dinámica del balance hídrico y las modificaciones hidroquímicas en la zona. Aunque diversos autores han abordado de forma independiente aspectos físicos, químicos o socioambientales del retroceso glaciar en el Quillcay, es necesario integrarlos bajo un enfoque global que consolide el estado del arte del modelamiento espacio-temporal (Burns et al., 2022; Guittard et al., 2017). Un análisis sistemático y unificado es indispensable para sustentar decisiones informadas en la gestión adaptativa de los recursos hídricos y la formulación de políticas públicas sostenibles en cuencas de alta montaña.

Por consiguiente, el presente estudio tiene como objetivo general evaluar y sintetizar las evidencias científicas publicadas sobre el comportamiento espacio-temporal de las características hidroquímicas y la evolución de la disponibilidad del recurso hídrico en la subcuenca del río Quillcay.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión narrativa de la literatura científica, orientada a examinar la evidencia sobre el modelamiento hidroquímico y la disponibilidad hídrica en la subcuenca del río Quillcay. Para garantizar la exhaustividad y rigor en la recolección de información, se adoptó una estrategia estructurada de identificación, selección y síntesis de estudios especializados (Grant & Booth, 2009; Page et al., 2021).

Estrategia de búsqueda

La búsqueda documental se llevó a cabo en las bases de datos bibliográficas de alto impacto Scopus y Web of Science, así como en la plataforma regional SciELO y repositorios institucionales especializados como los del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA). La estrategia empleó cadenas de búsqueda compuestas por términos controlados y palabras clave combinados mediante operadores booleanos (AND, OR). Se utilizaron combinaciones en inglés y español, tales as: ("Quillcay" OR "Quilcay" OR "Cordillera Blanca") AND ("hydrochemistry" OR "water availability" OR "acid rock drainage" OR "glacier retreat" OR "hydrogeology") AND ("hydrochemical modeling" OR "isotopic hydrology").

Criterios de inclusión y exclusión

Para la delimitación del corpus documental, se definieron criterios de elegibilidad rigurosos alineados con el objetivo del estudio (Siddaway et al., 2019). Se incluyeron artículos científicos originales publicados en revistas indexadas con revisión por pares, tesis doctorales y de maestría, e informes técnicos oficiales emitidos por organismos hidrológicos e investigación científica de alta montaña. Geográficamente, las publicaciones debían enfocarse de manera directa en la subcuenca del río Quillcay o en sus microcuencas aportantes (Llaca, Cojup, Quilcayhuanca y Shallap), o abordar de manera comparativa la dinámica hidroquímica de la Cordillera Blanca (Baraer et al., 2012; Santofimio & López-Pamo, 2013). Se excluyeron editoriales, notas breves, estudios de divulgación sin soporte empírico y trabajos centrados en otras cuencas sin relevancia comparativa directa para el Quillcay.

Síntesis y procesamiento de la información

El procesamiento de la información se estructuró a través de un análisis temático-analítico y una matriz de extracción de datos (Arksey & O'Malley, 2005). Los documentos seleccionados fueron categorizados en tres ejes analíticos principales: 1) modelamiento matemático y simulaciones hidrológicas del balance de masa glaciar y oferta hídrica (Baraer et al., 2012; Soruco et al., 2015); 2) caracterización hidrogeológica y estudios de trazadores isotópicos (^{18}O , ^2H , ^{222}Rn) para la determinación de las rutas de flujo y recarga subterránea (McKenzie et al., 2012); y 3) evaluación de la dinámica espacio-temporal de la calidad del agua, enfocada en la acidificación por Drenaje Ácido de Roca (DAR), fluctuaciones de pH, conductividad y movilización de metales pesados (Burns et al., 2022; Fortner et al., 2011; Guittard et al., 2017). Finalmente, se realizó una síntesis cualitativa para contrastar hallazgos, vacíos de conocimiento y tendencias metodológicas.

RESULTADOS

Dinámica del flujo hídrico y régimen hidrológico

Las investigaciones hidrológicas en la subcuenca del río Quillcay coinciden en que la zona ha superado el umbral máximo de rendimiento hídrico (peak water), lo que marca una transición crítica en su régimen de caudales (Baraer et al., 2012). Como consecuencia, los aportes por escorrentía nival y glaciar muestran una tendencia decreciente, reflejándose en una drástica reducción de los caudales de estiaje durante la época seca (Bury et al., 2011). La estructura de contribución de fuentes hídricas ha cambiado sustancialmente: la descarga de fusión glaciar directa disminuye progresivamente, cediendo mayor peso relativo a la precipitación estacional y al almacenamiento subterráneo sostenido por depósitos morrénicos y bofedales (McKenzie et al., 2012; Soruco et al., 2015). Los modelos hidrológicos glacio-fluviales aplicados en la cuenca, como el HBV-Light y el WEAP, proyectan escenarios de acentuada escasez hídrica estival hacia mediados del siglo XXI, proyectando un escenario de estiaje severo a medida que la cobertura glaciar continúe su retracción (Baraer et al., 2012; Mark et al., 2010).

Evolución hidroquímica espacio-temporal

Espacialmente, se observa un marcado degradiente en las firmas hidroquímicas desde las microcuencas de cabecera hasta la confluencia con el río Santa. Las microcuencas de Llaca y Shallap presentan niveles críticos de alteración de calidad debido a la alta exposición de rocas sulfuradas, mientras que Cojup y Quilcayhuanca muestran un comportamiento más moderado pero en progresiva acidificación (Burns et al., 2022; Santofimio & López-Pamo, 2013). La variabilidad estacional condiciona fuertemente los parámetros fisicoquímicos: durante la temporada seca, la menor dilución por esorrentía superficial incrementa la conductividad eléctrica y la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), registrándose los valores de pH más bajos ($\text{pH} < 4.0$ en cabeceras) (Fortner et al., 2011). La meteorización química acelerada de rocas piríticas expuestas libera metales pesados disueltos como hierro (Fe), aluminio (Al), manganeso (Mn), arsénico (As) y cadmio (Cd), superando con frecuencia los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua en los tramos altos y medios (Guittard et al., 2017; Mark & Seltzer, 2003).

Procesos de interacción agua-roca y atenuación natural

A medida que el agua discurre hacia cotas más bajas, ocurren mecanismos geoquímicos de atenuación natural. El contacto con formaciones rocosas ricas en carbonatos y silicatos favorece la neutralización ácida, incrementando gradualmente el pH y promoviendo la precipitación de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio en el cauce (Santofimio & López-Pamo, 2013). Asimismo, los ecosistemas de humedales andinos o bofedales cumplen un rol de amortiguamiento hidroquímico clave. Estos ecosistemas actúan como filtros biogeoquímicos capaces de retener metales pesados mediante procesos de adsorción, acomplejamiento en materia orgánica y sedimentación, atenuando temporalmente la carga contaminante que fluye hacia el curso principal del río Quillcay antes de su integración al río Santa (Burns et al., 2022; McKenzie et al., 2012).

DISCUSIÓN

La síntesis de los hallazgos evidencia que el retroceso glaciar en la subcuenca del río Quillcay genera un impacto dual e interconectado: la alteración de la cantidad del recurso hídrico y la degradación severa de su calidad química. La pérdida de la capacidad reguladora de la cobertura glaciar rompe el amortiguamiento hídrico

natural, incrementando la vulnerabilidad del caudal de estiaje y alterando la firma hidrogeoquímica del agua superficial (Baraer et al., 2012; Burns et al., 2022). La mayor dependencia de flujos subterráneos y de la escorrentía en áreas de reciente desglaciamiento acentúa la interacción agua-roca, prolongando el tiempo de residencia del agua en lechos piríticos y acelerando la generación de Drenaje Ácido de Roca (DAR) de origen natural (Fortner et al., 2011; Santofimio & López-Pamo, 2013).

Esta transición hidroquímica y cuantitativa conlleva significativos riesgos socioambientales y de salud pública en el valle del Callejón de Huaylas. La creciente presencia de metales pesados disueltos como hierro, aluminio, manganeso y arsénico dificulta y encarece los procesos convencionales de potabilización para la ciudad de Huaraz, demandando insumos químicos adicionales para la coagulación y neutralización (Guittard et al., 2017). En el ámbito agropecuario, el uso de agua ácida y cargada de metales para el riego y abrevadero de ganado restringe el rendimiento agrícola y amenaza la seguridad alimentaria local por bioacumulación en pastizales (Bury et al., 2013). Asimismo, la acidificación persistente destruye la macrofauna bentónica y la biodiversidad acuática nativa en los tramos altos de la subcuenca, colapsando los servicios ecosistémicos fluviales (Mark et al., 2010).

El análisis de la literatura también revela importantes desafíos y vacíos en el modelamiento espacio-temporal de la subcuenca. La baja densidad y desigual distribución espacial de estaciones meteorológicas sobre los 4000 m s. n. m. limita la precisión en la calibración de modelos hidrológicos glacio-fluviales frente a escenarios de cambio climático (Baraer et al., 2012; Condom et al., 2020). Además, existe una limitada caracterización de la geometría interna y de las propiedades de conductividad hidráulica de los depósitos morrénicos y acuíferos fisurados, lo que dificulta la simulación precisa de los caudales de recarga y descarga subterránea (McKenzie et al., 2012).

Ante este escenario, las estrategias de gestión adaptativa deben trascender las intervenciones tradicionales de infraestructura gris. Es urgente implementar un enfoque de Adaptación basada en Ecosistemas (AbE) articulado con soluciones de infraestructura verde, promoviendo la conservación y restauración de bofedales y humedales de alta montaña para reforzar la regulación hídrica natural (Carey et al., 2014; Drenkhan et al., 2015). Complementariamente, la instalación de sistemas de remediación pasiva en las microcuencas afectadas, como humedales artificiales y barreras reactivas permeables con sustratos alcalinos, representa una alternativa viable y sostenible para neutralizar la acidez y precipitar metales pesados en la cabecera de la subcuenca (Santofimio & López-Pamo, 2013).

CONCLUSIÓN

La revisión narrativa desarrollada permite sintetizar evidencia científica determinante sobre el impacto del retroceso glaciar en la subcuenca del río Quillcay. Los hallazgos confirman la existencia de una doble vulnerabilidad: por un lado, una severa degradación hidroquímica caracterizada por la acidificación de las aguas y la alta movilización de metales pesados debido al Drenaje Ácido de Roca de origen natural; por otro, una contracción progresiva de la disponibilidad hídrica en épocas de estiaje, tras haber sobrepasado el umbral del peak water.

Estos procesos consolidan un cambio de paradigma hidrológico en la cuenca, transitando de un sistema dominado históricamente por la escorrentía estival de fusión glaciar hacia un régimen con marcada dependencia de la dinámica pluviométrica estacional y de la capacidad de regulación de los acuíferos subterráneos y humedales andinos. La pérdida definitiva de la masa glaciar reduce la capacidad amortiguadora del ecosistema, comprometiendo el abastecimiento seguro de agua para la ciudad de Huaraz y las actividades productivas locales.

Frente a esta realidad, las líneas de investigación futuras deben priorizar el establecimiento de redes de monitoreo hidroquímico e hidrológico continuo y de alta frecuencia, orientadas a refinar la calibración de modelos predictivos en zonas de alta montaña. Asimismo, resulta indispensable integrar el conocimiento científico con esquemas participativos de gobernanza del agua e infraestructura verde, promoviendo estrategias de adaptación basadas en ecosistemas que mitiguen la contaminación ácida y garanticen la resiliencia hídrica de la población en la Cordillera Blanca.

REFERENCIAS

- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K. I., Portocarrero, C., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150.

<https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>

- Burns, R., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Baraer, M., Wigmore, O., Fernández, A., & Gómez, J. (2022). Changing water chemistry in response to glacier retreat in the tropical Andes, Cordillera Blanca, Peru. *Frontiers in Water*, 4, 829285. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.829285>
- Bury, J., Mark, B. G., Carey, M., Young, K. R., McKenzie, J. M., Baraer, M., French, A., & Polk, M. H. (2011). New geography of glacier retreat: Climate change and water security in the Peru's Cordillera Blanca. *Annals of the Association of American Geographers*, 101(2), 363–372. <https://doi.org/10.1080/00045608.2010.534714>
- Carey, M., Baraer, M., Mark, B. G., French, A., Bury, J., Young, K. R., & McKenzie, J. M. (2014). Toward hydro-social modeling: Merging household surveys and snow-redistribution hydrology to understand climate change impacts in the Peruvian Andes. *Water Resources Research*, 50(6), 5002–5016. <https://doi.org/10.1002/2013WR015201>
- Condom, T., Martínez, R., Pabón, J. D., Costa, F., Pineda, L., Nieto, J. J., López, F., & Villacis, M. (2020). Climatology and trends of precipitation and temperature in the Andes: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 598886. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.598886>
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Haeblerli, W. (2015). The changing water cycle: Glacier recession and water resources in the Peruvian Andes. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 705–723. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>
- Fortner, S. K., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Bury, J., Trierweiler, A., Baraer, M., & Mony, C. (2011). Elevated stream metal concentrations in a glacierized Andean catchment. *Applied Geochemistry*, 26(11), 1801–1812. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.06.003>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Guittard, A., Baraer, M., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Wigmore, O., Stahl, K., Bury, J., & Huamaní, A. (2017). Trace metal contamination in the glacierized

- Rio Santa basin, Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6), 282. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5986->
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2003). Tropical glacier recession along the Cordillera Blanca, Peru, between 1970 and 2003. *The Holocene*, 13(2), 228–238. <https://doi.org/10.1191/0959683603hl612rp>
- Mark, B. G., Bury, J., McKenzie, J. M., French, A., & Baraer, M. (2010). Climate change and tropical Andean glacier recession: Evaluating hydrologic pathways and climate change vulnerabilities in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4), 794–805. <https://doi.org/10.1080/00045608.2010.500199>
- McKenzie, J. M., Mark, B. G., Baraer, M., Lautz, L. K., Lachniet, M. S., & Young, B. (2012). Groundwater hydrogeology of a tropical glacierized watershed, Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 26(7), 1079–1089. <https://doi.org/10.1002/hyp.8208>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Santofimio, E., & López-Pamo, E. (2013). Hydrochemical characterization of the Quilcay river basin (Cordillera Blanca, Peru) affected by natural acid drainage. *Environmental Earth Sciences*, 70(6), 2631–2645. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2315-9>
- Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to do a systematic review: A best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and scoping reviews. *Annual Review of Psychology*, 70, 747–770. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>
- Soruco, A., Vincent, C., Rabatel, A., Francou, B., Thibert, E., Sicart, J. E., & Condom, T. (2015). Glacier discharge contribution to water resources in the tropical Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(11), 4589–4603. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4589-2015>