

Influencia del drenaje ácido de rocas producto del retroceso glaciar: hallazgos y propuestas de mitigación frente al cambio climático

Influence of acid rock drainage as a product of glacier retreat: Findings and mitigation proposals in the face of climate change

Channel Yurico Rodriguez-Torres^{1*} 

¹ Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.



Citar como: Rodriguez-Torres, C. Y. (2025). «Influencia del drenaje ácido de rocas producto del retroceso glaciar: hallazgos y propuestas de mitigación frente al cambio climático». *South Sustainability*, 5(2), e134.
DOI: 10.21142/SS-0602-2025-e134

Artículo recibido: 9/5/2025
Revisado por pares
Artículo aceptado: 24/11/2025

El presente manuscrito fue seleccionado y presentado en el evento «Diálogos académicos: aportes de la ciencia a nuestro desafío climático, 8.ª ed.» (noviembre de 2024), organizado por el Ministerio del Ambiente (Minam) y el Grupo Impulsor de Acción Climática de la Academia.



© El autor, 2025. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
channel.rodriguez@unmsm.edu.pe

RESUMEN

El cambio climático está intensificando la pérdida de glaciares en el Perú, lo que afecta de manera directa la calidad y disponibilidad del agua en las zonas altoandinas. Este proceso da origen al drenaje ácido de roca (DAR), resultado de la exposición y oxidación de rocas mineralizadas tras el retroceso glaciar. A ello se suman factores antropogénicos como la minería, la agricultura y la falta de infraestructura de saneamiento en zonas rurales, que agravan la degradación de los recursos hídricos. El presente *policy brief* sintetiza los principales hallazgos de investigaciones realizadas en zonas con y sin influencia del DAR, mediante la evaluación de parámetros fisicoquímicos y biológicos que determinan la calidad del agua y su impacto sobre la población y los ecosistemas. Los resultados evidencian una pérdida progresiva de calidad del agua, especialmente en áreas afectadas por DAR, donde la acidez y los metales pesados comprometen la salud ambiental y humana. Ante ello, se propone fortalecer la gestión integral y preventiva del recurso hídrico, priorizando estrategias sostenibles como la fitorremediación, las barreras reactivas permeables y los sistemas de biorremediación, junto con una mayor inversión en investigación aplicada y planificación territorial.

Palabras clave: calidad del agua, drenaje ácido de roca, cambio climático, Perú

ABSTRACT

Climate change is intensifying glacier loss in Peru, directly affecting both the quality and availability of water in high Andean areas. This process leads to acid rock drainage (ARD), resulting from the exposure and oxidation of mineralized rocks following glacier retreat. Added to this are anthropogenic pressures such as mining, agriculture and a lack of sanitation infrastructure in rural areas, which further exacerbate the degradation of water resources. The aim of this policy brief is to summarize the key findings from studies conducted in areas with and without ARD influence, assessing physicochemical and biological indicators that determine water quality and its effects on populations and ecosystems. The results indicate a progressive decline in water quality, particularly in ARD-affected zones, where acidity and metal concentrations pose risks to both the environment and human health. In this context, this policy brief calls for the strengthening of integrated and preventive water management measures, and the prioritizing of sustainable remediation strategies such as phytoremediation, permeable reactive barriers and bioremediation systems, alongside greater investment in applied research and territorial planning.

Keywords: Water quality, acid rock drainage, climate change, Peru



1. Introducción

El 71 % de los glaciares tropicales del mundo se encuentran en el Perú, y constituyen una fuente vital de agua y regulación hídrica andina. De acuerdo con el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Inaigem, 2025), en las últimas seis décadas la superficie glaciar peruana se ha reducido en más del 50 %, lo que evidencia un retroceso acelerado en cordilleras como la Blanca, Huaytapallana y Vilcanota. Este proceso ha generado una disminución progresiva de los glaciares de menor altitud, algunos de los cuales ya han desaparecido.

El cambio climático está acelerando el retroceso de los glaciares y ello altera de manera significativa los ciclos hidrológicos en las cuencas andinas. Estos ciclos, regulados por las lagunas y los ríos de cabecera, dependen directamente del aporte glaciar (Dyurgerov, 2002; Baraer *et al.*, 2009; Vuille *et al.*, 2008). En consecuencia, el rápido deshielo en los ecosistemas altoandinos no solo compromete la disponibilidad de agua para las poblaciones, sino que también deteriora su calidad y amenaza la biodiversidad local (La Matta, 2020).

El retroceso glaciar genera además procesos de acidificación natural del ambiente y la liberación de metales. Esto ocurre porque el deshielo deja al descubierto amplias zonas de rocas mineralizadas que, al oxidarse por acción de la intemperie, producen drenaje ácido de roca (DAR), un fenómeno que favorece la movilización de metales hacia los cuerpos de agua (Thorsteinsson *et al.*, 2013).

A ello se suma la contaminación de origen antropogénico, derivada de actividades como la agricultura, la ganadería, la minería y el turismo, que impactan directamente la calidad del agua en las cuencas andinas (Reyes y Morales, 2021). Este impacto se refleja en el incremento gradual de variables fisicoquímicas y biológicas, como la temperatura, los sólidos disueltos, los nutrientes, la carga orgánica, la turbidez y los microorganismos indicadores de contaminación fecal, desde las cabeceras hasta las zonas bajas de los ríos (Rivera, 2016).

La gestión inadecuada del saneamiento agrava esta situación. Las aguas residuales, entendidas como el agua contaminada de origen doméstico, industrial o agrícola que requiere tratamiento, y los efluentes, que son el agua tratada que deriva de una planta de tratamiento, suelen descargarse en los cuerpos de agua sin un control adecuado. Esto genera contaminación puntual, proveniente de fuentes identificables como vertidos directos, que, junto con la contaminación difusa, originada por escorrentía agrícola, urbana o industrial, incrementa la presencia de metales pesados y metaloides, los cuales representan una de las amenazas más severas para la seguridad alimentaria y la salud pública (Montano *et al.*, 2022). Estos contaminantes son altamente tóxicos,

se bioacumulan en los ecosistemas acuáticos y deterioran la flora y fauna asociada (Abdel *et al.*, 2022).

En el Perú, la gestión del recurso hídrico enfrenta importantes debilidades institucionales y técnicas, las cuales se verán agravadas por los efectos del cambio climático. Por ello, es urgente fortalecer las acciones de prevención, mitigación y adaptación que garanticen la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y la seguridad hídrica de las poblaciones. En este contexto, el presente artículo analiza los hallazgos y propone alternativas de mitigación para la gestión adecuada del recurso hídrico, tanto en zonas altoandinas sin influencia del DAR como en áreas afectadas por este fenómeno, con base en evidencia científica nacional e internacional.

2. Enfoque y discusión

Con respecto a las zonas afectadas por DAR, las áreas periglaciares del Perú concentran los principales impactos, especialmente aquellas que hasta hace unas décadas estaban cubiertas por glaciares. Existen indicios de afectación en las regiones de Áncash, Lima, Junín, Cusco, Arequipa, Moquegua, Tacna y Puno (Montano *et al.*, 2022). Sin embargo, aún es necesario desarrollar más investigaciones que permitan consolidar una base de datos nacional sobre la extensión y severidad del fenómeno.

En cuerpos de agua influenciados por DAR, como el río Quillcayhuanca, Paria y la quebrada Shallap, se han obtenido resultados que indican una mala y muy mala calidad del Índice Biótico Andino (IBA), caracterizados por un pH entre 3.44 y 4.42. Este fenómeno está vinculado al retroceso glaciar y a la oxidación de rocas altamente mineralizadas, ricas en metales ferrosos y sulfurosos, lo que genera condiciones ideales para la lixiviación y movilización de metales, y, además, incrementa sus concentraciones, la conductividad (128-217 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y los sólidos totales disueltos (STD, 77.67-197 ppm) (La Matta, 2020).

Investigaciones realizadas en arroyos altoandinos del Perú y en ecosistemas templados de otras regiones del mundo han demostrado que el aumento de la acidez y la presencia de metales afectan significativamente la abundancia y riqueza de macroinvertebrados sensibles a la contaminación. En contraste, se observa un incremento en la composición de especies más tolerantes, lo que refleja el impacto en la biodiversidad acuática (Loayza-Muro *et al.*, 2010; Courtney y Clements, 2000).

Frente a esto, en zonas sin influencia de DAR, como la microcuenca del río Chucchun, Rodríguez (2023a, 2023b) reporta que los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: pH, conductividad, turbidez, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nutrientes (nitratos, fosfatos) y coliformes termotolerantes, se mantienen dentro de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, Categoría 1-A2. No obstante, en los puntos más bajos

ubicados en la zona de transición de la Reserva de Biosfera del Parque Nacional Huascarán, se identificaron valores elevados de coliformes fecales, lo cual evidencia la influencia de actividades antrópicas como la ganadería, el turismo y el vertimiento de aguas residuales domésticas.

En general, la carga de contaminantes aumenta gradualmente desde la zona núcleo (áreas protegidas con mínima intervención) hacia la zona de transición donde se intensifica la interacción humana, y ello confirma la relación directa entre el uso del suelo y la degradación de la calidad del agua. En cambio, en zonas afectadas por DAR se observa mayor concentración de metales disueltos, lo que incrementa la toxicidad para la biota acuática y el riesgo de bioacumulación en vegetales, ganado y personas (Courtney y Clements, 2000; Gaete *et al.*, 2007). A pesar de ello, las comunidades locales continúan empleando estas aguas para riego agrícola, sin cumplir los estándares de calidad establecidos.

A nivel internacional, se ha demostrado la eficacia de los sistemas pasivos de tratamiento, como humedales construidos y drenajes anóxicos de piedra caliza, donde los procesos naturales permiten neutralizar la acidez y precipitar metales. Asimismo, se han utilizado biorreactores con bacterias reductoras de sulfato, los cuales favorecen la remoción biogeoquímica de metales pesados (Younger *et al.*, 2002; Hedin *et al.*, 1994; Skousen *et al.*, 1996).

Las barreras reactivas permeables (PRB, por sus siglas en inglés) también se han aplicado exitosamente en Canadá, Estados Unidos, Australia y España, en contextos mineros (Skousen *et al.*, 2017; Younger, 2000). En el Perú, la Guía Ambiental para el Manejo del Drenaje Ácido de Minas del Ministerio de Energía y Minas (Minem) reconoce las PRB como una alternativa pasiva viable para zonas afectadas por drenaje ácido.

A nivel nacional, se han implementado estrategias de biorremediación en ecosistemas altoandinos para mitigar los efectos del DAR. Andean Glaciers (2018) ejecutó dos sistemas piloto en la cordillera Blanca: un drenaje anóxico de piedra caliza (ALD) y un humedal construido con vegetación y bacterias autóctonas, que incrementaron el pH del agua y redujeron las concentraciones de metales como hierro y aluminio.

Asimismo, resulta fundamental fortalecer la educación ambiental en torno al uso responsable de fertilizantes y pesticidas, la adopción de prácticas agrícolas sostenibles que minimicen la erosión y la escorrentía contaminada, y la gestión adecuada del estiércol y aguas residuales ganaderas mediante biodigestores u otras tecnologías apropiadas.

3. Conclusiones y recomendaciones

Basándome en la evidencia reportada y los desafíos que enfrenta el Perú en el contexto del cambio climático frente

a los recursos hídricos, a nivel nacional se recomiendan las siguientes acciones:

- **Investigación y gestión del drenaje ácido de roca (DAR)**
La comprensión, la prevención y el tratamiento del drenaje ácido de roca (DAR) deben constituir una línea prioritaria de investigación para el Estado, la academia y el sector privado. En particular, instituciones públicas como el Ministerio del Ambiente (Minam), el Inaigem, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet) y el Minem deberían fortalecer la investigación aplicada y el monitoreo ambiental en coordinación con universidades, centros de innovación tecnológica (CITE) y empresas mineras responsables.
En este marco, se recomienda promover tecnologías de tratamiento pasivo como buenas prácticas sostenibles: fitorremediación (uso de plantas tolerantes a ácidos y metales), biorremediación (empleo de bacterias sulfato reductoras) y barreras reactivas permeables (PRB), debido a su bajo costo, mantenimiento reducido y eficacia comprobada en contextos mineros.
- **Gestión sostenible del agua y saneamiento**
Se sugiere que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), en coordinación con la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y los gobiernos regionales y locales, prioricen la inversión en proyectos de adaptación y mitigación frente al cambio climático, orientados a garantizar el abastecimiento sostenible de agua potable y la mejora en la planificación y gestión de los servicios de saneamiento en zonas vulnerables.
- **Remediación sostenible y gestión de microcuencas**
El Minam, junto con el Inaigem y el Minem, deberían impulsar e implementar proyectos de remediación sostenible adaptados a las condiciones ambientales y socioeconómicas de cada microcuenca, priorizando aquellas afectadas por drenaje ácido y actividades extractivas.
- **Identificación y monitoreo de zonas afectadas por DAR**
El Inaigem, en coordinación con el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamhi), universidades nacionales y centros de investigación especializados, podría promover estudios de identificación y caracterización de zonas influenciadas por DAR. Esta es la actividad principal, ya que previamente se requiere un levantamiento de información para contar con una línea de base y así establecer el curso de acción.
A partir de estos estudios, sería recomendable elaborar un mapa nacional de zonas con potencial o presencia de drenaje ácido de roca, que sirva como herramienta base para la gestión preventiva y la priorización de intervenciones en cuencas vulnerables.
- **Monitoreo biológico e indicadores ecológicos**
Se sugiere que el Minam, en coordinación con el Inaigem, lidere los programas de monitoreo biológico, con el apoyo técnico y científico de universidades y centros de investigación. La ejecución de los muestreos y seguimiento en terreno podría realizarse en conjunto con gobiernos regionales, locales y comunidades, con el fin de garantizar la continuidad y cobertura de los programas. Esta medida debería considerarse prioritaria, dado que el



uso de macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad del agua representa una alternativa eficiente y de bajo costo frente a los análisis fisicoquímicos convencionales, es altamente sensible a los cambios ambientales y refleja de manera confiable el estado ecológico de los cuerpos de agua.

- Fortalecimiento de capacidades locales e infraestructura natural

Se recomienda fortalecer las capacidades de comunidades, gobiernos locales y regionales para integrar eficazmente proyectos de infraestructura natural vinculados al recurso hídrico. Para ello, deben impulsarse programas de capacitación que permitan identificar brechas en la calidad del agua y formular proyectos adaptados a las necesidades de cada región.

Es fundamental incorporar el enfoque de cambio climático en estas capacitaciones, para asegurar la conservación de los recursos y la sostenibilidad de las intervenciones. La estrategia debe incluir acompañamiento técnico integral y talleres especializados que fomenten la gestión y mantenimiento continuo de los proyectos implementados.

La participación activa de las comunidades locales en la gestión del recurso hídrico es esencial, dado que poseen conocimiento tradicional y territorial que puede mejorar la efectividad de las soluciones. En paralelo, se deben financiar proyectos de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales en comunidades altoandinas sin infraestructura adecuada.

Finalmente, se recomienda adoptar un enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), que incorpore las variaciones climáticas, la reducción glaciar y

los cambios en precipitación, con el objetivo de minimizar los riesgos de contaminación difusa y proteger las fuentes hídricas en ecosistemas frágiles.

Contribución de autoría

El autor (ChYR-T) desarrolló todas las etapas del manuscrito: revisión de literatura, análisis, redacción y edición final.

Conflictos de interés

Se declara no tener conflictos de interés directos o indirectos que puedan haber influido en el contenido de este documento.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Inaigem), al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Ingemmet) y a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) por la información técnica consultada. También se agradece el acompañamiento académico de los docentes de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, y los aportes de colegas y especialistas en calidad de agua y gestión de cuencas, cuyos comentarios enriquecieron el desarrollo del presente *policy brief*. Finalmente, se reconoce la colaboración indirecta de las comunidades altoandinas cuyos conocimientos tradicionales inspiran estrategias de gestión sostenible del recurso hídrico.

Referencias bibliográficas

- Abdel-Meguid, N., Kheirallah, A. M., Abu-Shaban, K. y Abdel-Moneim. (2002).** «Histochemical and Biochemical Changes in Liver of *Tilapia zillii* G. as a Consequence of Water Pollution». *Journal of Biological Sciences*, 2(4), pp. 224-229. Disponible en: <https://doi.org/10.3923/jbs.2002.224.229>
- Andean Glaciers. (2018).** «Implementación de dos sistemas de biorremediación como estrategia para la prevención y mitigación de los efectos del drenaje ácido de roca en la Cordillera Blanca, Perú». *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montañas*, 3(4), pp. 57-76. Disponible en: https://www.andean-glaciers.org/wp-content/uploads/2022/02/Revista_Inaigem2018-extract-biorremediacion.pdf
- Baraer, M., McKenzie, J., Mark, B., Bury, J. y Knox, S. (2009).** «Characterizing contributions of glacier melt and groundwater during the dry season in a poorly gauged catchment of the Cordillera Blanca (Peru)». *Advances in Geosciences*, 22, pp. 41-49. Disponible en: <https://adgeo.copernicus.org/articles/22/41/2009/>
- Courtney, L. A. y Clements, W. H. (2000).** «Sensitivity to acidic pH in benthic macroinvertebrate communities in streams: Implications for acid mine drainage». *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(10), pp. 2606-2613. <https://doi.org/10.1002/etc.5620191026>
- Dyrgerov, M. (2002).** *Glacier mass balance and regime: data of measurement and analysis*. Boulder: Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado Boulder.
- Gaete, H., Aranguiz, F., Cienfuegos, G. y Tejos, M. (2007).** «Metales pesados y toxicidad de aguas del río Aconcagua en Chile». *Química Nova*, 30, pp. 885-891.
- Hedin, R. S., Nairn, R. W. y Kleinmann, R. L. P. (1994).** *Passive treatment of coal mine drainage*. (Information Circular 9389). Washington: U. S. Bureau of Mines.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Inaigem). (2025).** *Informe sobre el estado de los glaciares y ecosistemas de montaña del Perú 1962-2024*. Huaraz: Inaigem.
- La Matta, F. (2020).** *Influencia del Drenaje Ácido de Roca en la comunidad de macroinvertebrados bentónicos, Índices Bióticos de Calidad de Agua y Grupos Funcionales Alimenticios en ríos y cabeceras de la Cordillera Blanca (Subcuenca de Quillcay, Ancash)*. [Tesis de grado, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12866/8533>
- Loayza-Muro, R., Elías, R., Marticorena, J., Palomino, E., Duivenvoorden, J., Kraak, M. y otros. (2010).** «Metal-induced shifts in benthic macroinvertebrate community composition in Andean high-altitude streams». *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29, pp. 2761-2768.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (Minem). (2004).** «Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de minas. Lima». Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5217272/Gu%C3%ADa%20Ambiental%20para%20el%20Manejo%20de%20Drenaje%20Acido%20de%20Minas.pdf>
- Ministerio del Ambiente (Minam). (2022).** Montañas, glaciares y agua en cifras. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/glaciares/montanas-glaciares-y-agua-en-cifras/>
- Montano, Y., Tapia, P. M., Quispe, C. y Fuentealba, B. (2022).** «El drenaje ácido de roca y sus potenciales impactos ambientales». Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña e Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM). Disponible en: <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/dfbf0722-66de-4e1f-b226-ce40c090f313>
- Reyes, R. y Morales, R. (2021).** «Informe de calidad de agua de ríos de la cuenca del lago de Atitlán 2021». Departamento de Investigación y Calidad Ambiental. Disponible en: <https://www.amsclae.gob.gt/wp-content/uploads/2021/12/rios2021.pdf>
- Rivera, M. (2016).** *Relación de parámetros fisicoquímicos y presencia de macroinvertebrados para determinar la calidad del agua del río Duero, Michoacán*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/24587>
- Rodríguez, C. (2023a).** «Calidad del agua según variables fisicoquímicas y macroinvertebrados bentónicos en la microcuenca del río Chuchun». *Revista de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 26(51). Disponible en: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.24158>
- Rodríguez, C. (2023b).** *Determinación de la calidad del agua mediante variables fisicoquímicas y la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en la microcuenca del río Chuchun, 2021-2022*. [Tesis para optar el grado de Magister, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/df5c0060-259d-4d97-a882-6a041af0ed5f>
- Skousen, J., Hilton, T. y Faulkner, B. B. (1996).** «Overview of passive systems for treating acid mine drainage». *Green Lands*, 26(4), pp. 36-45.
- Skousen, J., Ziemkiewicz, P. y McDonald, L. M. (2017).** Acid mine drainage formation, control and treatment: Approaches and strategies. *The Extractive Industries and Society*, 4(2), pp. 241-249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.02.001>
- Thorsteinsson, T., Jóhannesson, T. y Snorrason, Á. (2013).** «Glaciers and ice caps: Vulnerable water resources in a warming climate». *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, pp. 590-598.
- Vuille, M., Kaser, G. y Juen, I. (2008).** «Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation». *Global and Planetary Change*, 62, pp. 14-28.
- Younger, P. L. (2000).** «Passive treatment of acidic mine waters in subsurface-flow constructed wetlands: A sustainable approach to mine water remediation». *Ecological Engineering*, 16(4), pp. 351-370. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00056-2)
- Younger, P. L., Banwart, S. A. y Hedin, R. S. (2002).** *Mine water. Hydrology, pollution, remediation*. Londres: Kluwer Academic Publishers.

