

La producción hidroeléctrica y su influencia hidrológica: principales hallazgos y propuestas para la toma de decisiones en el Perú

Hydroelectric production and its hydrological influence: main findings and proposals for decision-making in Peru

Cintha Bello Chirinos^{1*}, Wilson Suarez Alayza²,
Fabian Drenkhan³, Fiorella Vega-Jácome⁴

- 1 Carrera de Biología Marina, Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.
- 2 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Lima, Perú.
- 3 Geografía y Medio Ambiente, Departamento de Humanidades, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- 4 Institute of Environmental Science and Geography, University of Potsdam. Potsdam, Germany.



Citar como: Bello Chirinos, C. *et al.* (2024). « La producción hidroeléctrica y su influencia hidrológica: principales hallazgos y propuestas para la toma de decisiones en el Perú». *South Sustainability*, 5(1). DOI: 10.5011/2024-e099

Artículo recibido: 6/10/2023
Revisado por pares
Artículo aceptado: 4/6/2024

El presente manuscrito fue seleccionado y presentado en el evento «Diálogos académicos: aportes de la ciencia a nuestro desafío climático, 5.ª ed.» (julio de 2023), organizado por el Ministerio del Ambiente (Minam) y el Grupo Impulsor de Acción Climática de la Academia.



© Los autores, 2023. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
cbelloc@cientifica.edu.pe

RESUMEN

El presente *policy brief* analiza el rol de la regulación hidroenergética de la laguna Sibinacocha sobre el caudal del río Vilcanota-Urubamba. Para esto, se llevó a cabo una revisión de diferentes artículos vinculados al servicio ecosistémico que brinda el agua procedente de la escorrentía glaciar, con énfasis en la disponibilidad de dicho recurso, debido al impacto del cambio climático o la regulación hidroenergética sobre el régimen hidrológico del río Vilcanota-Urubamba. A partir de ello, se concluye que existe la necesidad de fortalecer la toma de datos de la red hidrometeorológica instalada a nivel nacional. Además, se debe promover el desarrollo de investigaciones que evalúen los impactos asociados con los cambios en el régimen en cuencas reguladas y la identificación de estrategias para el desarrollo de infraestructura físicas que garanticen la regulación hídrica y su aprovechamiento hidroenergético.

Palabras clave: *ecoflujo, alteración hidrológica, regulación hidroenergética, río Vilcanota-Urubamba*

ABSTRACT

This policy brief analyzes the role of the hydropower regulation of Lake Sibinacocha in the streamflow of the Vilcanota-Urubamba River. To this end, a review was conducted of different articles related to the ecosystem service provided by the glacial runoff, with an emphasis on the availability of that resource due to the impact of climate change and/or hydropower regulation on the hydrological regime of the Vilcanota-Urubamba River. We concluded that there is a need for strengthening the data collection of the hydro-meteorological network installed at the national level, as well as for the development of research to evaluate the impacts associated with changes in the regime in regulated basins, and the identification of strategies for the development of physical infrastructure to guarantee water regulation and its hydro-energy use.

Keywords: *eco-flow, hydrological alteration, hydro-energetic regulation, Vilcanota-Urubamba River*



1. Introducción

El agua es una fuente natural de recurso invaluable que brinda una serie de servicios ecosistémicos fundamentales para garantizar el bienestar del hombre de forma directa (por ejemplo, suministro de agua potable, producción de energía hidroeléctrica, irrigación, navegación) e indirecta (por ejemplo, recreación, humectación del suelo y fertilización de llanuras aluviales). En la actualidad su disponibilidad se encuentra amenazada (Bhaduri *et al.*, 2017; Bello *et al.*, 2023). Considerando que alrededor del 99 % de todos los glaciares tropicales del mundo se localizan en los Andes tropicales, y el Perú alberga alrededor del 70 %, estos ejercen un papel esencial como fuentes de agua dulce (Yarleque *et al.*, 2018). Los glaciares liberan agua en forma de escorrentía a consecuencia del retroceso glaciar, lo que repercute sobre la disponibilidad del agua actual y futura en regiones de alta montaña y áreas adyacentes río abajo. Debido a la estacionalidad de la escorrentía glaciar, así como la alta variabilidad en el régimen de las precipitaciones que caracteriza a nuestro país, la disponibilidad de agua dulce será afectada con la alteración de los regímenes hidrológicos fluviales (Drenkhan *et al.*, 2023). Esta situación, exacerbada por los impactos del cambio climático y las dinámicas socioeconómicas cambiantes, representan desafíos a escalas locales y regionales asociadas con la adopción de medidas apropiadas para la gestión del recurso hídrico (Drenkhan *et al.*, 2023).

En las últimas décadas, la alta dependencia del agua para la generación energética mundial, factor crítico para el crecimiento económico, ha ocasionado un incremento de los proyectos hidroeléctricos (Anderson *et al.*, 2018). Estos proyectos están priorizando la construcción de infraestructura hidráulica (como presas y embalses), esenciales para la seguridad hídrica en regiones con caudales fluviales estacionales elevados. En dicho contexto, las presas o embalses cumplen funciones clave para el almacenamiento (durante periodos húmedos o de baja demanda) y liberación de agua (durante periodos secos o de alta demanda) (Vuille *et al.*, 2008). Asimismo, el incremento de dichos proyectos se debe a su importancia dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, por los beneficios que la energía hidroeléctrica brinda como fuente de energía renovable. De esta manera, contribuye con el séptimo ODS en la reducción de emisiones de carbono, así como en la adopción de acciones para promover la energía limpia y asequible (ODS 7) y la acción climática (ODS 13) (Ortigoza *et al.*, 2021).

En ese contexto, en América del Sur los proyectos hidroeléctricos en la región andino-amazónica se incrementaron debido a la demanda de energía, motivo por el que los gobiernos regionales han priorizado la construcción de represas con fines de suministro de energía. En el Perú, la capacidad hidroeléctrica instalada ha aumentado un 147 % desde 2005, y actualmente representa el 36 % de la capacidad total de energía

(15 340 MW) (Minem, 2022 y 2015). Esta situación genera preocupación sobre las posibles consecuencias ambientales que podría ocasionar esta actividad (Anderson *et al.*, 2018; Finer y Jenkins, 2012). Sin embargo, en América del Sur existen pocos estudios a nivel regional que evalúen los regímenes fluviales alterados producto de actividades antropogénicas (como la presencia de hidroeléctricas y represas). Específicamente para los Andes peruanos, solo unos pocos estudios abordan esta temática (Castello y Macedo, 2016; Ochoa-Tocachi *et al.*, 2016; Vega-Jácome *et al.*, 2018). Asimismo, se destaca el estudio desarrollado por Drenkhan *et al.* (2019) sobre la evaluación hidrológica de la cuenca alta del río Vilcanota-Urubamba, ubicada al sur de Perú. En este estudio se estima que la descarga futura del río podría disminuir entre un 2 % a 11 % para 2050 y entre un 7 % al 14 % para 2100, a causa de la pérdida sustancial de glaciares, relacionada con escenarios de cambio climático. Por lo tanto, el presente estudio tiene por finalidad evaluar las alteraciones hidrológicas del periodo 1965-2016 asociadas a los cambios en el régimen del caudal en la cuenca del río Vilcanota-Urubamba (Andes centrales, Cusco), con el propósito de generar información que permita comprender e identificar los principales impulsores del cambio hidrológico en la región. Con ello se espera brindar información para la planificación de las políticas públicas que serían necesarias a fin de contribuir con la seguridad hídrica y energética.

2. Enfoque y discusión

El estudio desarrollado por Bello *et al.* (2023) (figura 1) evaluó por primera vez la alteración del caudal en los Andes centrales, con la finalidad de identificar las consecuencias de la regulación hidroeléctrica (1965-2016). Este estudio se realizó en la cuenca del río Vilcanota-Urubamba debido al funcionamiento de la central hidroeléctrica Machupicchu (potencia total instalada de 192,45 MW) y el represamiento de la laguna Sibinacocha (1988). Para ello, se realizó un análisis de tendencias y quiebres de la precipitación y caudal, así como una comparación del desempeño de los indicadores de alteración hidrológica. Estos indicadores comparan las series hidrológicas de los periodos anteriores (natural) y posteriores (alterado) a la construcción y funcionamiento de un embalse, con base en 33 variables hidrológicas y ecoflujos (construcción de curvas de duración del flujo basadas en el ecodeficit o ecoexcedente). Esto quiere decir, determinar la cantidad de agua necesaria pero no disponible para el flujo ecológico o la cantidad de agua que excede el requerimiento del ecosistema, respectivamente. Para realizar el análisis de los indicadores de alteración hidrológica y ecoflujos para identificar las variaciones hidrológicas en el caudal del río Vilcanota-Urubamba se consideró un periodo de caudal natural (1965-1987) y un periodo de caudal alterado (1988-2016). En dicho estudio se confirmó que el caudal diario en la cuenca del río Vilcanota-Urubamba es muy variable, caracterizado por un régimen estacional unimodal

registrarse valores de hasta 1100 m³/s en la época lluviosa (diciembre a abril) y mínimos de 20 m³/s durante la época seca (meses restantes) para el periodo 1985-2016. Asimismo, la precipitación anual en la cuenca varió de 466 mm a 934 mm en dicho periodo.

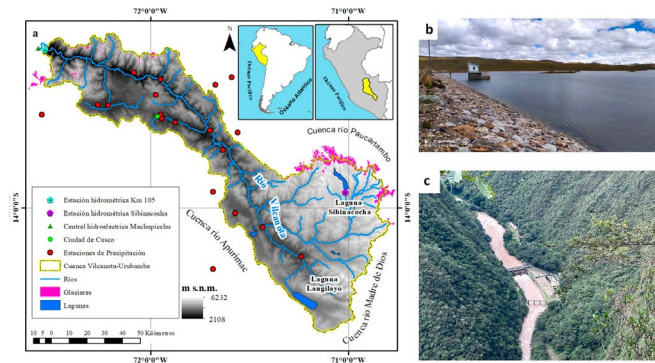


Figura 1. a) Ubicación de la cuenca del río Vilcanota-Urubamba. b) Lago Sibinacocha. c) Central hidroeléctrica Machupicchu en el río Urubamba. Nota. Extraído de Bello *et al.* (2023).

Con base en los resultados obtenidos en esa investigación, se concluye que durante la estación húmeda se presentó un déficit (20 %) de agua a partir de la operación de la laguna Sibinacocha (1988-2016) por el almacenamiento de agua priorizado (figura 2); mientras que durante la estación seca se identificó un exceso de agua (> 30 %), vinculado a la liberación de agua almacenada en la laguna Sibinacocha, para atender el requerimiento adicional de este recurso asociado con la producción de energía hidroeléctrica en ausencia de lluvias. Estos hallazgos sugieren que la operación de la laguna Sibinacocha fue el principal factor de alteración del régimen hidrológico del caudal en la cuenca del río Vilcanota-Urubamba durante la época seca. Asimismo, el análisis de indicadores de alteración hidrológica mostró un aumento del caudal promedio (5,3 m³/s) entre junio a noviembre, así como una reducción (35,2 m³/s) entre enero a febrero durante el periodo alterado (1988-2016) en comparación con el periodo natural (1965-1987). Respecto al flujo del caudal mensual durante el periodo alterado se observó un aumento que fluctuó entre 12 a 27 % durante la temporada seca correspondiente a un excedente de agua que no coincide con el régimen de precipitaciones (figuras 2 c y d), mientras que entre enero y febrero el caudal se redujo en 18,4 %. Además, los caudales extremos registraron un aumento en el número porcentual de días de caudal mínimo superior al 10 %.

Cabe mencionar que los registros de precipitación empleados en dicha investigación presentaron algunas inconsistencias o datos faltantes. Esta situación podría representar una limitante para comprender completamente las tendencias de la precipitación y los impactos sobre el caudal del río Vilcanota-Urubamba. Sin embargo, este escenario podría presentarse en otros entornos similares debido a las cortas series de datos hidrometeorológicos disponibles. Por ejemplo, la situación

que se evidencia en la escasa disponibilidad de datos en las regiones de alta montaña, como los Andes del Perú.

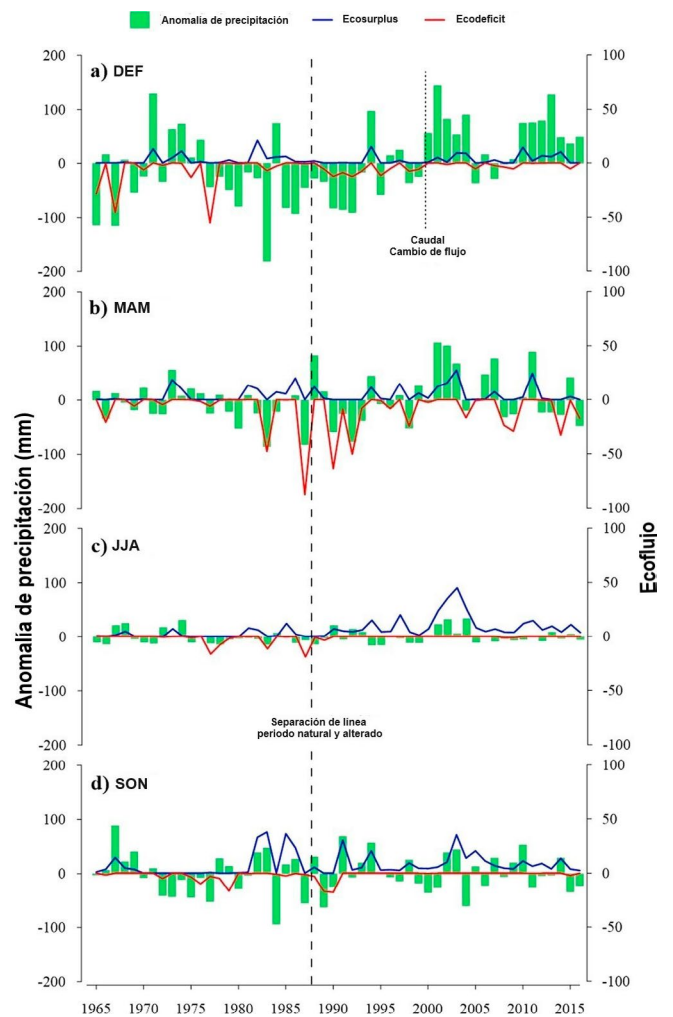


Figura 2. Anomalías de precipitación y ecoflujos estacionales para los cuatro trimestres: a) diciembre-enero-febrero (DEF), b) marzo-abril-mayo (MAM), c) junio-julio-agosto (JJA) y d) septiembre-octubre-noviembre (SON).

Nota. Extraído de Bello *et al.* (2023).

Asimismo, las inconsistencias en los datos de caudal se identificaron entre 1981 y 1986 (periodo natural) al registrarse un exceso de agua que no se relacionaba con las precipitaciones de ese periodo. Basándonos en esta información se infiere que dicha inconsistencia probablemente corresponde a una falta de homogeneidad en la recolección de datos de caudal o errores de calibración de la estación hidrométrica Km-105. No obstante, dado que para identificar alteraciones significativas en el régimen hidrológico se requiere de una serie mínima de 20 años de datos continuos de caudal diario por periodo (natural y alterado), los autores decidieron emplear todo el conjunto de datos procedente de la estación hidrométrica Km-105 (52 años), al ser la única estación disponible que brinda datos de caudal en la zona de estudio. Estas limitaciones de datos revelan una clara necesidad de contar con una red bien establecida y estratégicamente distribuida de

estaciones *in situ* que contribuya con mejorar nuestra comprensión del régimen del caudal y sus cambios potenciales ante el cambio climático y las intervenciones humanas.

Si bien no se evaluaron los impactos ecológicos asociados con la operación de la laguna Sibinacocha, Richter *et al.* (2011) afirman que es posible adoptar un «estándar presuntivo». Esto sugiere que se requiere un nivel moderado de protección ecológica cuando la alteración hidrológica oscila entre el 10 % y el 20 %, más allá de la cual pueden existir impactos relevantes sobre las funciones ecológicas. Considerando dicho criterio, los cambios hidrológicos identificados en la cuenca del río Vilcanota-Urubamba podrían influir negativamente sobre las funciones ecológicas; sin embargo, se requieren mayores estudios para confirmar dicha hipótesis.

Los hallazgos del caso de estudio evidencian la necesidad de ampliar las investigaciones para identificar riesgos ambientales y sociales relacionados con la degradación ambiental, el cambio climático y el desarrollo socioeconómico vinculados a la construcción y gestión de represas. Asimismo, evidencian una falta de recopilación de datos hidrometeorológicos, así como un conocimiento limitado de los complejos procesos climáticos en los Andes centrales. Esto dificulta una comprensión detallada del proceso para realizar una investigación sistemática sobre la alteración hidrológica en el Perú. Cabe precisar que el enfoque presentado por Bello *et al.* (2023) proporciona una metodología de referencia para evaluar la alteración del caudal en cuencas reguladas en el Perú, la que puede ser replicada en cuencas con condiciones similares.

3. Conclusiones y recomendaciones

A partir de los datos analizados, se concluye que es necesario fortalecer la toma de datos de la red hidrometeorológica instalada a nivel nacional. Esto debe ser acompañado de la promoción del desarrollo de investigaciones que evalúen los impactos asociados con los cambios en el régimen hídrico en cuencas reguladas, y la identificación de estrategias para el desarrollo de infraestructura físicas que garanticen la regulación hídrica y su aprovechamiento hidroenergético.

Basándonos en la evidencia reportada, y los grandes desafíos que enfrenta el Perú en el contexto de la escasez de agua, situación que se exacerbará debido a la vulnerabilidad humana y natural frente al cambio climático (Motschmann *et al.*, 2022), se recomienda que:

- Las universidades públicas y privadas establezcan fondos para la realización de investigaciones que evalúen los impactos asociados con los cambios en el régimen del caudal en cuencas reguladas, siguiendo un enfoque ecosistémico, a fin de integrar la respuesta de la biota y los ecosistemas fluviales, el transporte de sedimentos, las aguas subterráneas y la variabilidad de caudales, y mejorar nuestra comprensión de tales respuestas

y procesos combinados con enfoques sólidos. Así, se podría lograr la reducción de incertidumbres y desarrollar escenarios futuros de disponibilidad de agua más significativos y confiables para garantizar la seguridad hídrica y energética en los Andes peruanos.

- El Ministerio del Ambiente (Minam), en coordinación con otros actores involucrados (Autoridad Nacional del Agua, Instituto Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, gobiernos regionales y locales, etc.), genere políticas a nivel nacional que promuevan la gestión de los recursos hídricos y la conservación de los ecosistemas. Esto se debe realizar a través de un enfoque científico integrado, basado en evidencia que aborde los riesgos socioambientales relacionados con la degradación ambiental, el cambio climático y el desarrollo socioeconómico derivado de la construcción y gestión de represas. Dicho enfoque debería apoyar la toma de decisiones para promover proyectos de infraestructura que generen un mínimo impacto en los ecosistemas naturales y maximice las opciones futuras para el uso sostenible del agua y la energía.
- El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi) fortalezca y mejore el sistema de toma, registro y análisis de datos asociados con la red hidrometeorológica instalada a nivel nacional. Para cuantificar las alteraciones hidrológicas, es necesario conocer el estado pasado y actual de los recursos hídricos disponibles en una cuenca. Por ello, es imprescindible disponer de conjuntos de datos hidrometeorológicos históricos. Asimismo, estos datos son requeridos como variables de entrada en el modelamiento hidrológico, para mejorar nuestra comprensión sobre el clima y sus repercusiones frente a las vulnerabilidades humanas y naturales.
- El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (Inaigem) considere el desarrollo de normativa referida a la preservación de los glaciares, para garantizar la regulación hídrica y las reservas de agua dulce, debido a los servicios ambientales que ofrecen en beneficio de las generaciones presentes y futuras (en concordancia con la Ley 30215, Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos).
- El Ministerio de Energía y Minas (Minem) establezca una visión a largo plazo como parte de la actualización de su Política Energética Nacional, con el objetivo de que contemple la implementación de estrategias para el desarrollo de infraestructuras físicas que garanticen la aplicación de la regulación hídrica y su aprovechamiento hidroenergético. Esto se debe a su potencial para reducir las emisiones de carbono, y como medida de adaptación y mitigación al cambio climático (en concordancia con la Ley 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático). Cabe precisar que para el desarrollo de dicha infraestructura se requiere consignar criterios de carácter técnico, económico, ambiental y social para garantizar su viabilidad, escenario que exige una instancia de trabajo interdisciplinario.
- El Ministerio de Agricultura y Riego (Midagri) considere el estándar presuntivo establecido por Richter *et al.* (2011) para regular y proteger los caudales ambientales en las cuencas hidrográficas. Finalmente, que las autoridades y demás actores involucrados (por ejemplo, institutos de investigación) vinculen la ciencia, la sociedad y el

desarrollo de políticas públicas en los futuros planes de adaptación para la gestión del agua.

Contribución de autoría

CBC: investigación, metodología, redacción del borrador original y de la edición final; WSA: visualización, revisión y edición; FD: revisión y edición; FVJ: revisión y edición.

Fuente de financiamiento

El desarrollo de esta investigación fue autofinanciado. CBC fue apoyado por la Universidad Científica del Sur a través de la Resolución Directoral 008-DGIDI-CIENTIFICA-2024.

Potenciales conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.



Referencias bibliográficas

- Anderson, E. P., Jenkins, C. N., Heilpern, S., Maldonado-Ocampo, J. A., Carvajal-Vallejos, F. M., Encalada, A. C., Rivadeneira, J. F., Hidalgo, M., Canas, C. M., Ortega, H., Salcedo, N., Maldonado, M. y Tedesco, P. A. (2018). «Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams». *Science Advances*, 4, pp. 1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao1642>
- Bello, C., Suarez, W., Drenkhan, F. y Vega-Jacome, F. (2023). «Hydrological impacts of dam regulation for hydropower production: The case of Lake Sibilacocha, Southern Peru». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, pp. 1-15. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101319>
- Bhaduri, A., Subramanian, S. V., Green, P. A., Tickner, D., Parker, H., Moncrieff, C. R., Oates, N. E. M., Ludi, E. y Acreman, M. (2017). «Managing rivers for multiple benefits-A coherent approach to research, policy and planning». *Frontiers in Environmental Science*, 5, pp. 1-8. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00004>
- Castello, L. y Macedo, M. N. (2016). «Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems». *Global Change Biology*, 22, pp. 990-1007. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/gcb.13173>
- Drenkhan, F., Buytaert, W., Mackay, J. D., Barrand, N. E., Hannah, D. M. y Huggel, C. (2023). «Looking beyond glaciers to understand mountain water security». *Nature Sustainability*, 6, pp. 130-138. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00996-4>
- Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L. y Haerberli, W. (2019). «Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin». *Science Total Environment*, 665, pp. 465-483. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Finer, M. y Jenkins, C. N. (2012). «Proliferation of hydroelectric dams in the Andean Amazon and implications for Andes-Amazon connectivity». *PLoS One*, 7, pp. 1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035126>
- Ministerio de Energía y Minas, Minem (2015). «Evoluciones en el Sector Eléctrico 1995-2015 (Lima, Perú)». Disponible en: <https://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=517>
- Ministerio de Energía y Minas, Minem (2022). *Anuario estadístico de electricidad (Lima, Perú)*. Disponible en: <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Electricidad/promocion%20electrica/anuarios%20estadisticos/anuarioestadistico2022.pdf>
- Motschmann, A., Teutsch, C., Huggel, C., Seidel, J., León, C., Muñoz, R., Sienel, J., Drenkhan, F. y Weimer-Jehle, W. (2022). «Current and future water balance for coupled human-natural systems - Insights from a glacierized catchment in Peru». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101063, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101063>
- Ochoa-Tocachi, B. F., Buytaert, W., De Bievre, B., Celleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C. A., Acosta, L., Villazon, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Vinas, P., Rojas, G. y Arias, S. (2016). «Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments». *Hydrological Processes*, 30, pp. 4074-4089. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Ortigoza, E., Ríos, R., Fernández, F., Coronel, T. y Oxilia, V. (2021). «A multi-criteria analysis of the use of economic benefits of ITAIPU Hydropower plant to achieve United Nations Sustainable Development Goals». En: *2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* (pp. 1-7). Valparaíso: IEEE. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/CHILECON54041.2021.9702995>
- Vega-Jacome, F., Lavado-Casimiro, W. S. y Felipe-Obando, O. G. (2018). «Assessing hydrological changes in a regulated river system over the last 90 years in Rimac Basin (Peru)». *Theoretical and Applied Climatology*, 132, pp. 347-362. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2084-y>
- 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*, 64, pp. 14-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.003>
- Yarleque, C., Vuille, M., Hardy, D. R., Timm, O. E., De la Cruz, J., Ramos, H. y Rabatel, A. (2018). «Projections of the future disappearance of the Quelccaya Ice Cap in the Central Andes». *Scientific Reports*, 8, pp. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33698-z>