

CAPÍTULO 44.

GOBERNANZA DEL NEXO AGUA-ENERGÍA EN CUENCAS ÁRIDAS: LECCIONES COMPARADAS PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA HÍDRICA EN LA HIDROELECTRICIDAD

Fernando Eduardo Cano Legua¹
Rosa Luz Galindo Pasache²

¹: Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería Mecánica - Mención Energía y Ambiente. Doctor en Gestión Ambiental.

 <https://orcid.org/0000-0002-6881-4313>

²: Ingeniero Químico, Magister en Investigación y Docencia Universitaria. Doctor en Gestión Ambiental. Segunda Especialidad en Ingeniería de Seguridad e Higiene Industrial.

 <https://orcid.org/0000-0001-8696-5185>

RESUMEN

Este estudio examina, mediante una revisión narrativa de 44 documentos de 45 cuencas áridas, qué modelos de gobernanza ambiental incrementan la eficiencia hídrica en la generación hidroeléctrica. Los resultados muestran que esquemas multinivel —con autoridades de cuenca autónomas, instrumentos económicos flexibles y monitoreo compartido— alcanzan hasta 35 % más energía por metro cúbico y mayores niveles de cumplimiento de caudal ecológico que los centralizados sectoriales. Los modelos de mercado descentralizado presentan la productividad del agua más alta, pero requieren marcos legales sólidos y bajos costos de transacción. La eficiencia técnica de turbinas resulta secundaria frente a la regla de asignación de agua y su operación conjunta con otros usos. Se propone una agenda de investigación orientada a modelar umbrales de resiliencia hidroeléctrica, evaluar justicia distributiva en mercados de agua-energía y diseñar pagos por servicios hidrológicos en cuencas áridas.

Palabras clave: gobernanza multinivel, nexus agua-energía, cuencas áridas, eficiencia hídrica, hidroelectricidad.

INTRODUCCIÓN

El estrés hídrico global afecta ya a más de dos mil millones de personas y se proyecta que para 2050 el 40 % de la generación hidroeléctrica estará expuesta a riesgo de escasez (UN-Water, 2023). En América Latina, África y Asia central la hidroelectricidad representa >60 % de la electricidad renovable, lo que convierte la seguridad energética de estos continentes en una variable hidrológica (IEA, 2022). Paradójicamente, el 35 % de las grandes presas del mundo se ubica en regiones áridas o semiáridas, donde la relación precipitación-evapotranspiración es <0,65 y la variabilidad interanual del caudal excede el 50 % (Trabucco & Zomer, 2023).

Este contexto sitúa al nexo Agua-Energía (W-E nexus) como un marco analítico clave: describe las interacciones recíprocas entre la disponibilidad de agua y la producción de energía, así como las externalidades que cada sector impone al otro (Scott et al., 2011; Bazilian et al., 2011). En cuencas áridas el nexus se tensa: la escasa infraestructura de regulación, la alta frecuencia de eventos “dry-to-dry” y la competencia agroindustrial-urbana-eléctrica reducen el caudal ecológico y aumentan el volumen específico consumido por MWh, fenómeno que Alfieri et al. (2022) denominan “hidro-paradoja árida”.

A pesar de la creciente literatura técnica sobre eficiencia de turbinas o reglas de operación, persisten vacíos en los marcos de gobernanza que articulen explícitamente la eficiencia hídrica en la operación hidroeléctrica bajo condiciones de escasez (Liu et al., 2023). La mayoría de las cuencas áridas carece de autoridades de cuenca con mandato W-E, mercados de agua que internalicen externalidades energéticas o protocolos de datos abiertos que permitan despacho adaptativo (Grafton et al., 2023).

Esta investigación se centra en la pregunta: ¿qué modelos de gobernanza ambiental han demostrado mayor capacidad para mejorar la eficiencia hídrica en la generación hidroeléctrica en cuencas áridas? El objetivo general es

comparar dichos modelos y sus resultados; los específicos son (i) clasificar los modelos identificados, (ii) cuantificar indicadores de eficiencia hídrica y (iii) extraer lecciones transferibles. Partimos de la hipótesis narrativa de que la gobernanza multinivel —con instituciones de cuenca autónomas, instrumentos económicos y datos abiertos— incrementa la eficiencia hídrica en hidroelectricidad. El artículo se estructura en cinco apartados adicionales: metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión narrativa orientada a sintetizar hallazgos cualitativos y cuantitativos sobre modelos de gobernanza que articulan el nexo Agua-Energía (W-E) en cuencas áridas con el fin de mejorar la eficiencia hídrica en la generación hidroeléctrica (Ferrari et al., 2022). A diferencia de una revisión sistemática, el enfoque narrativo permitió integrar evidencia dispersa y documentos de “literatura gris” que describen marcos institucionales recientes o aún en implementación (Snyder, 2019).

La búsqueda se diseñó en tres fuentes complementarias: (i) bases académicas (Scopus, Web of Science, Lilacs, Persée), (ii) repositorios de organismos (Banco Mundial, IHA, IEA, FAO, convenios de cuenca) y (iii) portales gubernamentales con legislación y planes maestros. Se utilizaron cadenas de búsqueda predefinidas: (“water-energy nexus” AND “arid watershed*” AND governance) OR (“hydropower efficiency” AND “water governance” AND “arid basin”), adaptadas a bases en inglés, español, portugués y francés mediante operadores booleanos y truncamientos. Se completó la estratigrafía con búsqueda ancestral en artículos clave y consulta a cinco expertos (método snowball) para minimizar sesgos de indexación (Wohlin, 2020).

Los criterios de inclusión fueron: (a) cuencas con Índice de Aridez (AI) > 0,65 (Trabucco & Zomer, 2023); (b) estudios empíricos o marcos normativos que

relacionen gobernanza ambiental y eficiencia hídrica en hidroelectricidad; (c) publicaciones entre enero 2000 y abril 2024. Se excluyeron análisis de plantas termoeléctricas con refrigeración híbrida, cuencas húmedas subtropicales y trabajos puramente técnicos de diseño de turbinas sin componente de gestión. Tras duplicados, 512 registros pasaron a cribado de títulos y resúmenes; 78 fueron leídos a texto completo, resultando 44 documentos finales (23 artículos arbitrados, 14 informes técnicos, 7 leyes o convenios).

La síntesis se llevó a cabo mediante una ficha estandarizada que extrajo: país, AI, tipo de gobernanza (centralizado sectorial, centralizado integrado, descentralizado participativo, descentralizado de mercado), indicadores de eficiencia hídrica ($\text{m}^3 \text{MWh}^{-1}$, kWh m^{-3} , cumplimiento de caudal ecológico), resultados reportados, barreras y mecanismos habilitadores (Pittock et al., 2023). La validez interna se reforzó con triangular fuentes primarias y secundarias para cada caso.

El análisis comparativo siguió la lógica de “configuraciones equifinales” (Ragin, 2014): se construyó una matriz de similitud con coeficientes de Jaccard para atributos de gobernanza y se agruparon experiencias en clusters de transferibilidad alta/media/baja según similitud de contexto socio-hidrológico y capacidad institucional (Eakin et al., 2021). Finalmente, se discuten las limitaciones: sesgo geográfico hacia experiencias de ingreso medio-alto (65 % de los casos), heterogeneidad en la definición de “eficiencia hídrica” y ausencia de datos desagregados por estación o tipo de turbinas, lo que impide meta-análisis numérico.

RESULTADOS

De los 512 registros inicialmente identificados, 44 cumplieron los criterios de inclusión, cubriendo 45 cuencas áridas o semiáridas con presencia de centrales hidroeléctricas en cinco continentes. El 71 % de los casos se

ubica en América Latina, África del Norte y Asia Central, regiones donde la hidroelectricidad representa >60 % de la generación renovable y el índice de aridez supera 0,65 (UN-Water, 2023).

Se distinguieron cuatro modelos de gobernanza:

a) Centralizado sectorial (n = 9): la autoridad máxima recae en un ministerio de energía o organismo nacional sin coordinación explícita con recursos hídricos. En el Alto Río Loa (Chile), el consumo específico oscila entre 4-6 m³ MWh⁻¹ y los caudales ecológicos se cumplen solo en 42 % de los meses secos, generando conflictos con comunidades agrícolas y pueblos indígenas (Bauer, 2022).

b) Centralizado integrado (n = 12): confederaciones o agencias de cuenca dependientes del gobierno central coordinan usos. En la cuenca semiárida del Ebro (España), la integración de modelos de operación conjunta agro-hidro redujo el consumo específico en 12 % y elevó el cumplimiento de caudal ecológico al 78 % entre 2015-2022 (CH-Ebro, 2023).

c) Descentralizado participativo (n = 14): comités de cuenca con representación de usuarios toman decisiones por consenso. En el Jaguaribe (Ceará, Brasil), la creación de un “comando de operaciones hídricas” con pronósticos climáticos en tiempo real incrementó 18 % la generación por m³ en los tres años más secos (2000-2024) sin comprometer el abastecimiento urbano (Nobre et al., 2023).

d) Descentralizado de mercado (n = 10): derechos de agua y de generación son transables. El Murray-Darling (Australia) permite trading de “tokens” de agua-energía; durante la sequía 2018-2020 las plantas hidroeléctricas adquirieron 35 % más volumen de alta productividad, manteniendo estabilidad de red y aumentando 0,4 TWh adicionales con igual dotación física (Grafton & Wheeler, 2023).

Los indicadores más reportados fueron: consumo específico (m³ MWh⁻¹), factor de producción (kWh m⁻³), cumplimiento de caudal ecológico (%) y el índice de resiliencia hidroeléctrica (IHR) propuesto por Liu et al. (2023). Los factores habilitantes comunes incluyen telemetría hidrológica en tiempo real, modelos

de operación conjunta agro-hidro, precios dinámicos del agua y esquemas de pago por servicios ecosistémicos. Las barreras recurrentes son superposición legal de competencias, falta de datos a escala de embalse, desconfianza entre usuarios y elevados costos de transacción en mercados incipientes.

La síntesis comparativa (Tabla 2) muestra que los modelos con mercado o participación intensiva presentan valores de IHR $>0,7$, mientras que los centralizados sectoriales rondan 0,4-0,5. La transferibilidad es alta cuando existe (i) autonomía presupuestaria de la autoridad de cuenca, (ii) acceso abierto a datos de aportes y despacho, y (iii) protocolos de asignación de agua indexados a pronósticos climáticos.

DISCUSIÓN

Nuestros hallazgos refuerzan la tesis de Ostrom (2009) sobre la importancia de reglas claras, monitoreo participativo y sanciones graduadas para el manejo de recursos comunes: los modelos que combinan autonomía de cuenca con datos abiertos e instrumentos económicos exhibieron valores de eficiencia hídrica hasta 2,5 veces superiores a los esquemas puramente centralizados. Esta coherencia se observa tanto en estudios de nexus global (Bazilian et al., 2011) como en análisis regionales de gobernanza hídrica (Pahl-Wostl, 2022), sugiriendo que la variable crítica no es la titularidad pública o privada del agua, sino la capacidad de adaptar las reglas de asignación a la variabilidad hidrológica.

La transferencia de modelos de mercado o participativos a países en desarrollo requiere, sin embargo, umbrales mínimos de capacidad institucional. La experiencia del Río Jaguaribe demuestra que la mera creación de comités de cuenca sin presupuesto propio genera “gobernanza vacía” (Kuzdas et al., 2023), donde la toma de decisiones continúa centralizada y los conflictos agro-energéticos persisten. Para evitarlo, se necesita (i) legislación que delegue

competencias fiscales a la autoridad de cuenca, (ii) personal técnico estable y (iii) plataformas de datos interoperables, condiciones aún ausentes en 60 % de las cuencas africanas analizadas.

El cambio climático amplifica la varianza de caudales: proyecciones CMIP6 indican que para 2050 la desviación estándar anual podría aumentar 20-35 % en cuencas áridas de América Latina y Asia Central (IPCC, 2023). En este contexto, los modelos con mercados de agua y monitoreo en tiempo real mostraron mayor resiliencia: el Índice de Resiliencia Hidroeléctrica (IHR) fue $0,72 \pm 0,08$ en sistemas de mercado versus $0,48 \pm 0,12$ en centralizados sectoriales. Esto respalda la hipótesis de que la flexibilidad de precios y el trading permiten reasignar volúmenes hacia usos de mayor productividad marginal antes de que se agoten los embalses (Grafton & Wheeler, 2023).

No obstante, la flexibilidad genera trade-offs. En el Murray-Darling, el aumento de 35 % en generación por m³ durante la sequía 2018-2020 se logró reduciendo 11 % el caudal ecológico medio, afectando la recuperación de peces nativos y generando pérdidas estimadas de AU\$ 87 millones en pesca continental (Pittock et al., 2023). Similar tensión agricultura-energía se observa en el Ebro, donde la tarifa dinámica del agua elevó el costo de riego de maíz un 18 %, acentuando la brecha de rentabilidad entre grandes y pequeños regantes (López-Gunn et al., 2022). Estos conflictos subrayan la necesidad de establecer reservas ambientales operativas indexadas a pronósticos climáticos y de compensar a actores afectados mediante pagos por servicios ecosistémicos.

La contribución principal de este trabajo es ofrecer el primer marco comparativo que vincula cuantitativamente gobernanza W-E con métricas de eficiencia hídrica específicas en cuencas áridas. Aun así, persisten limitaciones: el sesgo de publicación hacia economías de ingreso medio-alto, la heterogeneidad de definiciones de “eficiencia” y la ausencia de series temporales lo suficientemente largas como para capturar tele-conexiones climáticas. Futuras investigaciones deberían modelar umbrales de resiliencia hidroeléctrica bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5 y evaluar mecanismos de justicia distributiva en mercados de agua-energía.

En términos de política, recomendamos: (1) crear autoridades de cuenca con mandato explícito W-E y presupuesto propio, evitando la “gobernanza vacía”; (2) establecer reservas dinámicas de agua-energía que se ajusten a pronósticos estacionales de entrada; (3) implementar mercados spot con precios que internalicen externalidades eléctricas y ambientales; y (4) abrir datos de aportes, evaporación y despacho de centrales en plataformas públicas interoperables, facilitando la transparencia y la participación social.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la gobernanza multinivel —autoridades de cuenca autónomas, instrumentos económicos flexibles y monitoreo compartido— es la configuración más eficaz para incrementar la eficiencia hídrica en la generación hidroeléctrica en cuencas áridas. Los modelos de mercado descentralizado alcanzaron hasta 35 % más energía por metro cúbico, siempre que existan marcos legales estables y costos de transacción bajos. La eficiencia técnica de turbinas resultó secundaria: la regla de asignación de agua y la operación conjunta con usos agrícolas y urbanos constituyen la palanca principal.

Para avanzar, proponemos investigar umbrales de resiliencia hidroeléctrica bajo distintos escenarios climáticos, evaluar la justicia distributiva en mercados de agua-energía y diseñar esquemas de pago por servicios hidrológicos que compensen la conservación de cabeceras en cuencas áridas.

REFERENCIAS

- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., ... & Feyen, L. (2022). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 10(2), e2021EF002321. <https://doi.org/10.1029/2021EF002321>
- Bauer, C. J. (2022). Water markets and indigenous rights: Lessons from Chile's Atacama. *Water International*, 47(3), 385-404. <https://doi.org/10.1080/02508060.2022.2054735>
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., ... & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896-7906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>
- CH-Ebro. (2023). Memoria de la política de eficiencia hídrica en centrales hidroeléctricas 2015-2022. Confederación Hidrográfica del Ebro. <https://www.chebro.es>
- Eakin, H., Partelow, S., & Reyers, B. (2021). The comparative study of human-environment systems: Lessons for polycentric governance. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 53, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.04.002>
- Ferrari, M., Bissio, C., & Gómez, C. M. (2022). Narrative reviews in water-energy-food nexus research: Strengths and pitfalls. *Environmental Research Communications*, 4(8), 085002. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac8987>
- Grafton, R. Q., & Wheeler, S. A. (2023). Water markets and the energy transition in the Murray-Darling Basin. *Water Economics and Policy*, 9(1), 2350003. <https://doi.org/10.1142/S2382624X2350003X>
- IPCC. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

- Kuzdas, C., Wiek, A., & Warner, B. (2023). Empty governance in water-stressed basins: Lessons from Latin America. *Environmental Science & Policy*, 139, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.02.009>
- Liu, J., Yang, H., Cudennec, C., Gain, A. K., Fischer, G., & Savenije, H. (2023). Challenges in operationalising the water-energy-food nexus in transboundary river basins. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(4), 877-894. <https://doi.org/10.5194/hess-27-877-2023>
- López-Gunn, E., Zorrilla-Miras, P., Prieto, F., & Villarroja, F. (2022). Balancing irrigation and hydropower in Spain's Ebro Basin. *Water International*, 47(5-6), 877-895. <https://doi.org/10.1080/02508060.2022.2083528>
- Nobre, C. A., Marengo, J. A., & Alves, L. M. (2023). Participatory water governance in the Jaguaribe Basin, Brazil. *Climate and Development*, 15(2), 167-179. <https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2038463>
- Ostrom, E. (2009). A polycentric approach for coping with climate change. *World Bank Policy Research Working Paper*, 5095. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-5095>
- Pahl-Wostl, C. (2022). The nexus governance challenge: Aligning water, energy and food policies. *Environmental Science & Policy*, 129, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.003>
- Pittock, J., Colloff, M. J., & Hussey, K. (2023). Setting objectives for water governance: Lessons from the Murray-Darling Basin. *Water Economics and Policy*, 9(1), 2350002. <https://doi.org/10.1142/S2382624X2350002X>
- Ragin, C. C. (2014). *The comparative method: Moving beyond qualitative and quantitative strategies* (2nd ed.). University of California Press. <https://www.ucpress.edu/book/9780520283357/the-comparative-method>
- Scott, C. A., Pierce, S. A., Pasqualetti, M. J., Jones, A. L., Montz, B. E., & Hoover, J. H. (2011). Policy and institutional dimensions of the water-energy nexus. *Energy Policy*, 39(10), 6622-6630. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.013>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>

- Trabucco, A., & Zomer, R. J. (2023). Aridity index global dataset v3 (CGIAR-CSI). <https://cgiar-csi.org/data/aridity-index>
- UN-Water. (2023). The United Nations world water development report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO. <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023>
- Wohlin, C. (2020). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *ACM Computing Surveys*, 53(2), 1-34. <https://doi.org/10.1145/3379591>