

Eficiencia de sistemas híbridos de tratamiento de aguas residuales en contextos de baja institucionalidad en la Amazonía peruana

Efficiency of hybrid wastewater treatment systems in low institutional capacity contexts in the peruvian Amazon

Orlando Santillán Mendoza ^a 

✉ osantillanme@ucvvirtual.edu.pe

^a Universidad César Vallejo. Lima, Perú

Resumen

Palabras clave:

Capacidad institucional;
Fitorremediación;
Saneamiento ambiental;
Sistemas socio-ecológicos;
Tratamiento de aguas residuales

Keywords:

Institutional capacity;
Phytoremediation;
Environmental sanitation;
socio-ecological systems;
Wastewater treatment

Cómo citar:

Santillán
Mendoza O. Eficiencia de
sistemas híbridos de
tratamiento de aguas
residuales en contextos de
baja institucionalidad en la
Amazonía peruana. ALFA
Revista de Investigación
en Ciencias Agronómicas y
Veterinarias.
2026;10(29):01-13
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i29.477>

Contexto: La gestión de aguas residuales en la Amazonía peruana se ve limitada por la fragilidad institucional, afectando la eficiencia de los sistemas de tratamiento y la calidad ambiental de los cuerpos de agua. **Objetivo:** Evaluar cómo la capacidad institucional modera la eficiencia de los sistemas híbridos de tratamiento (STH), que combinan fitorremediación con *Eichhornia crassipes* y biodigestión anaeróbica, en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la cuenca del río Mayo, San Martín. **Metodología:** Se empleó un diseño cuasi-experimental con emparejamiento por puntaje de propensión (PSM) y diferencias de diferencias (DiD), complementado con modelación de ecuaciones estructurales. Se analizaron 42 PTAR con STH, evaluando la eficiencia de remoción de carga orgánica y la calidad del efluente. **Resultados:** El STH mejora la calidad del efluente ($\beta = 0,42$; $p < 0,01$) únicamente a través de la mediación completa de la eficiencia de remoción de carga orgánica. En municipios con alta capacidad institucional, el impacto fue robusto ($\beta = 0,78$), mientras que en contextos de baja capacidad el efecto se invirtió ($\beta = -0,12$). Se identificó un umbral crítico de gestión institucional de 3,85 mediante el método Johnson-Neyman. **Conclusiones:** La tecnología híbrida por sí sola no garantiza eficiencia ni calidad del efluente; se requiere un nivel mínimo de institucionalidad para que los STH operen de manera efectiva, subrayando la importancia de fortalecer la capacidad institucional para lograr un manejo sostenible de aguas residuales.

Abstract

Context: wastewater management in the Peruvian Amazon is constrained by institutional fragility, undermining treatment efficiency and the environmental quality of water bodies. **Objective:** to evaluate how institutional capacity moderates the efficiency of hybrid treatment systems (HTS)—combining *Eichhornia crassipes* phytoremediation and anaerobic biodigestion—within wastewater treatment plants (WWTPs) in the Mayo River basin, San Martín. **Methods:** a quasi-experimental design was employed using Propensity Score Matching (PSM) and Difference-in-Differences (DiD), supplemented by structural equation modeling. The study analyzed 42 WWTPs equipped with HTS, assessing organic load removal efficiency and effluent quality. **Results:** HTS improves effluent quality ($\beta=0.42$, $p<.01$) solely through the full mediation of organic load removal efficiency. In municipalities with high institutional capacity, the impact was robust ($\beta=0.78$), whereas in low-capacity contexts, the effect was inverted ($\beta=-0.12$). A critical institutional management threshold of 3.85 was identified using the Johnson-Neyman method. **Conclusion:** hybrid technology alone does not guarantee efficiency or effluent quality; a minimum level of institutional capacity is required for HTS to operate effectively. This



underscores the necessity of strengthening institutional frameworks for sustainable wastewater management.

Introducción

La gestión sostenible de los recursos hídricos en economías emergentes constituye uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, particularmente en regiones tropicales donde la expansión urbana desordenada supera con creces la capacidad de provisión de servicios de saneamiento ⁽¹⁾. En la Amazonía peruana, esta tensión adquiere matices específicos: la riqueza hídrica contrasta con la deteriorada calidad del agua destinada al consumo humano y a la preservación de ecosistemas acuáticos. Las soluciones basadas en la naturaleza, como los sistemas de fitorremediación, han emergido como alternativas tecnológicas prometedoras por su bajo costo operativo y su adaptabilidad a condiciones climáticas tropicales; no obstante, su implementación efectiva depende de marcos institucionales que frecuentemente resultan deficitarios en jurisdicciones amazónicas ⁽²⁾.

En este contexto, los sistemas híbridos de tratamiento (STH) que combinan fitorremediación con biodigestión anaeróbica han mostrado resultados alentadores en la literatura especializada. La eficacia de consorcios microalgales-bacterianos autóctonos para el tratamiento de aguas residuales domésticas se evaluó en la Amazonía ecuatoriana ⁽¹⁾, alcanzando reducciones significativas de demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y sólidos suspendidos totales (SST). De manera complementaria, la evaluación del potencial bioremediador de la cianobacteria no axénica *Synechococcus* sp. en aguas residuales municipales de la Amazonía peruana ⁽²⁾, encontró que los sistemas naturales pueden alcanzar eficiencias comparables a tecnologías convencionales cuando las condiciones operativas se mantienen estables. Estos resultados sugieren que la sinergia entre componentes biológicos diversos, microalgas, bacterias y macrófitas acuáticas, puede potenciar significativamente la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos ⁽³⁾.

Sin embargo, la evidencia disponible sobre la eficiencia de los STH presenta limitaciones sustantivas. En primer lugar, la mayor parte de los estudios se circunscriben a escalas de laboratorio o plantas piloto controladas, donde las variables operativas se manipulan de manera experimental y los resultados difícilmente son generalizables a contextos operativos reales ⁽⁴⁾. En segundo lugar, la literatura tiende a analizar los componentes tecnológicos de manera aislada, fitorremediación o biodigestión por separado, sin considerar las interacciones sistémicas que emergen cuando ambas tecnologías operan de forma conjunta en condiciones de campo. Asimismo, la investigación sobre gobernanza del agua frecuentemente ignora los efectos de los cambios institucionales sobre el desempeño de las infraestructuras ⁽⁴⁾, una omisión particularmente problemática en regiones donde las capacidades de gestión municipal varían drásticamente entre jurisdicciones vecinas.

Adicionalmente, resulta necesario considerar que la implementación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales en contextos amazónicos enfrenta barreras que trascienden la dimensión puramente técnica. Al respecto, se demostró que la gobernanza constituye un determinante clave de los resultados de desarrollo sostenible asociados a infraestructura en África ⁽⁵⁾, un resultado cuya extrapolación a la Amazonía resulta pertinente dadas las similitudes en cuanto a limitaciones presupuestarias, escasez de capital humano calificado y debilidad de los marcos regulatorios. En esta misma línea, las infraestructuras verdes pueden no generar los beneficios ambientales esperados cuando las instituciones locales carecen de la capacidad técnica y financiera para operarlas y mantenerlas adecuadamente ⁽⁶⁾. La convergencia de estos factores sugiere que la capacidad institucional podría operar como un moderador crítico de la relación entre tecnología de tratamiento y calidad del agua resultante.

El concepto de capacidad institucional, entendido como la aptitud de las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales para formular, implementar y sostener políticas públicas efectivas, ha sido ampliamente

estudiado en el ámbito de los recursos hídricos. La propuesta de un marco de evaluación de la sostenibilidad en sistemas socio-ecológicos de cuencas que integra dimensiones institucionales, ecológicas y socioeconómicas, encuentra que la capacidad de gobernanza determina en gran medida la resiliencia del sistema frente a perturbaciones ⁽³⁾. Un análisis sobre los mecanismos de acoplamiento y coordinación entre recursos hídricos, medio ambiente y sistemas socioeconómicos, concluye que la calidad institucional modera la efectividad de las intervenciones tecnológicas en el sector agua ⁽⁷⁾. Estos aportes teóricos proporcionan un fundamento sólido para hipotetizar que la eficiencia de los STH no depende exclusivamente de sus características técnicas, sino también del contexto institucional en el cual se insertan.

Pese a la relevancia teórica de esta perspectiva, la evidencia empírica que examina específicamente la interacción entre capacidad institucional y desempeño de sistemas de tratamiento de aguas residuales permanece escasa. La mayor parte de los estudios disponibles adoptan enfoques descriptivos o correlacionales que impiden establecer inferencias causales sobre el efecto de las intervenciones tecnológicas ⁽⁸⁾. La necesidad de construir sistemas de tratamiento de aguas residuales resilientes frente a pandemias fue subrayado por otros autores ⁽⁸⁾, destacando que la robustez de estas infraestructuras depende no solo de su diseño técnico sino de la capacidad institucional para mantenerlas operativas ante perturbaciones imprevistas. En la Amazonía peruana, donde las PTAR operan frecuentemente sin supervisión técnica continua y con presupuestos de operación insuficientes, esta brecha investigativa resulta particularmente acuciante.

Desde la perspectiva tecnológica, la fitorremediación mediante macrófitas acuáticas del género *Eichhornia*, conocidas comúnmente como lechuga de agua, ha demostrado ser eficaz en la remoción de materia orgánica, nutrientes y metales pesados presentes en aguas residuales municipales e industriales ⁽⁹⁾. En relación a ello, se han propuesto métricas de diseño estandarizadas e integración normativa para sistemas de fitorremediación en la gestión de contaminantes del agua, reconociendo que la estandarización tecnológica debe complementarse con marcos institucionales apropiados ⁽⁹⁾. Por su parte, la biodigestión anaeróbica contribuye a la reducción de carga orgánica y a la producción de biogás como subproducto energético, lo que confiere a los sistemas híbridos una ventaja adicional en términos de sostenibilidad ambiental y viabilidad económica ⁽¹⁰⁾. La integración de ambas tecnologías en un diseño sistémico optimizado podría generar sinergias que potencien la eficiencia global del tratamiento.

La cuenca del río Mayo, ubicada en el departamento de San Martín en la Amazonía peruana, constituye un escenario paradigmático para examinar estas cuestiones. Con una población aproximada de 800 000 habitantes distribuidos en 14 provincias y 77 distritos, la cuenca presenta una heterogeneidad marcada en cuanto a capacidades institucionales municipales ⁽¹¹⁾. A su vez, la propuesta de un marco para comprender la gobernanza del agua basado en sistemas socio-ecológicos que integra la perspectiva de los actores involucrados, es un enfoque particularmente relevante para la cuenca del Mayo donde coexisten comunidades nativas, centros poblados rurales y capitales provinciales con niveles dispares de desarrollo institucional ⁽¹¹⁾. Las aguas residuales domésticas generadas en esta cuenca se vierten predominantemente sin tratamiento al río Mayo y sus afluentes, afectando tanto la salud pública como la integridad de los ecosistemas acuáticos que sustentan las actividades pesqueras y agrícolas de la región.

Estudios previos realizados en la cuenca del Mayo han documentado las condiciones de contaminación del recurso hídrico y han propuesto soluciones tecnológicas de diversa índole, pero sin evaluar sistemáticamente los factores institucionales que condicionan su éxito o fracaso. En este sentido, un análisis del impacto de la dependencia de recursos naturales sobre el desarrollo de tecnologías verdes, encontró que la gobernanza digital puede mitigar los efectos negativos de dicha dependencia, un resultado que sugiere que las intervenciones institucionales pueden modular la relación entre contexto y tecnología ⁽¹²⁾. En el caso específico de la Amazonía peruana, las evaluaciones existentes se han centrado primordialmente en parámetros fisicoquímicos del agua sin incorporar variables institucionales como predictores del desempeño

de las PTAR, lo que constituye una brecha significativa tanto teórica como metodológica en la literatura disponible.

La relevancia de esta investigación se justifica adicionalmente por la ausencia de estudios cuasi-experimentales que permitan establecer relaciones causales entre los diferentes componentes de los STH y la calidad del agua tratada. Una revisión sistemática sobre la capacidad de gestión de establecimientos de salud en países de ingresos bajos y medianos, encontró que las capacidades institucionales constituyen un determinante transversal del desempeño organizacional, un resultado cuya extrapolación al sector de saneamiento resulta razonable dado que ambos comparten características estructurales similares: dependencia de personal técnico, necesidad de mantenimiento continuo de infraestructura y requerimiento de financiamiento sostenido ⁽¹³⁾. La carencia de evidencia causal en el ámbito del tratamiento de aguas residuales limita la capacidad de los formuladores de políticas para diseñar intervenciones informadas por datos empíricos sólidos.

Por otro lado, la importancia de medir y comparar capacidades institucionales de manera estandarizada para facilitar la evaluación comparativa entre jurisdicciones ⁽¹⁴⁾, es un principio que resulta aplicable al análisis de las PTAR de la cuenca del Mayo donde las diferencias intermunicipales en capacidad de gestión pueden ser cuantificadas mediante índices compuestos. En esta línea, resulta imperativo desarrollar metodologías que integren simultáneamente la evaluación técnica del desempeño de las plantas de tratamiento con la medición de las capacidades institucionales que condicionan su operación, una integración que ha sido escasamente explorada en la literatura sobre saneamiento en países en desarrollo. El presente estudio pretende contribuir a llenar esta brecha mediante un enfoque metodológico mixto que combina técnicas cuasi-experimentales con modelación estadística avanzada.

En síntesis, la revisión de la literatura permite identificar tres vacíos fundamentales: (a) la escasez de evaluaciones causales de sistemas híbridos de tratamiento en contextos amazónicos reales; (b) la ausencia de estudios que examinen el efecto moderador de la capacidad institucional sobre la relación entre tecnología de tratamiento y calidad del agua; y (c) la limitada disponibilidad de datos primarios sobre el desempeño operativo de las PTAR en la cuenca del río Mayo. Estos vacíos configuran una oportunidad de investigación relevante tanto desde la perspectiva académica como desde la práctica de la política pública, dado que la generación de evidencia sobre los determinantes institucionales de la eficiencia de los sistemas de tratamiento puede orientar la asignación de recursos y el diseño de estrategias de fortalecimiento institucional focalizadas territorialmente ⁽¹⁵⁾.

A partir de las consideraciones expuestas, el presente estudio se plantea las siguientes preguntas de investigación: ¿En qué medida el Sistema Híbrido de Tratamiento (STH) mejora la calidad del efluente en las PTAR de la cuenca del río Mayo? ¿Cuál es el papel mediador de la eficiencia de remoción de carga orgánica en la relación entre STH y calidad del efluente? ¿Hasta qué punto la capacidad institucional municipal modera la efectividad del STH en diferentes contextos de gestión?

En consonancia con las preguntas formuladas, el objetivo de la investigación es evaluar en qué medida la capacidad institucional modera la eficiencia de los sistemas híbridos de tratamiento (STH), que combinan fitorremediación con *Eichhornia crassipes* y biodigestión anaeróbica, en 42 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la cuenca del río Mayo, San Martín.

Materiales y métodos

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo con diseño cuasi-experimental de tipo longitudinal retrospectivo. Se implementó una estrategia de diferencias de diferencias (DiD) combinada con emparejamiento por puntaje de propensión (PSM) para aproximar las condiciones de un experimento

aleatorio. El DiD permitió estimar el efecto causal del STH comparando los cambios pre-post tratamiento entre PTAR que implementaron el sistema híbrido (grupo tratamiento) y aquellas que mantuvieron sistemas convencionales (grupo control). El PSM se aplicó para reducir el sesgo de selección asegurando la habilidad de covariables observables entre grupos mediante un algoritmo de vecino más cercano con radio de calibración de 0.05. Adicionalmente, se empleó variables instrumentales (IV) para atender la potencial endogeneidad entre intensidad del STH y calidad del efluente, utilizando la disponibilidad de área inundable como instrumento excluyente.

La población estuvo conformada por las 58 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) registradas en la cuenca del río Mayo, departamento de San Martín, Perú. Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión descritos más adelante, la muestra final comprendió 42 PTAR, de las cuales 22 correspondieron al grupo tratamiento (PTAR con STH implementado) y 20 al grupo control (PTAR con sistemas convencionales de lagunas de estabilización). Un análisis de potencia estadística a priori, realizado con G*Power 3.1 para modelos de regresión jerárquica con hasta 6 predictores, tamaño del efecto medio ($f^2 = 0.15$), $\alpha = 0.05$ y potencia = 0.90, indicó un tamaño muestral mínimo de 38 observaciones; la muestra obtenida ($N = 42$) superó este umbral garantizando potencia estadística adecuada para detectar efectos moderados y de interacción.

Se incluyeron PTAR con al menos 12 meses de operación continua, disponibilidad de datos de monitoreo fisicoquímico bimensual durante el período 2021-2023, y que contaran con registros operativos verificables. Se excluyeron PTAR con reformas estructurales mayores durante el período de estudio, aquellas con datos incompletos en más del 20 % de los períodos de monitoreo, y plantas que hubieran experimentado eventos extraordinarios (inundaciones, derrames químicos) que pudieran sesgar los resultados.

Las variables del estudio fueron operacionalizadas según se detalla en la Tabla 1. La variable independiente (STH) se midió mediante un índice compuesto que integra la cobertura porcentual de *Eichhornia crassipes* en los humedales artificiales y el volumen efectivo del biodigestor anaeróbico. La variable dependiente (Calidad del Efluente) se construyó como un índice Z-score ponderado mediante Analytic Hierarchy Process (AHP) que incluye DBO5, DQO, SST, coliformes fecales y pH. La variable mediadora (Eficiencia de Remoción) se calculó como el porcentaje de reducción de DQO entre la entrada y la salida del sistema. La variable moderadora (Capacidad Institucional) fue medida mediante un índice compuesto de tres dimensiones: recursos humanos calificados, presupuesto operativo anual y cumplimiento normativo, evaluadas en escala Likert de 1 a 7 puntos aplicada a los responsables operativos de cada PTAR. La fiabilidad del instrumento de capacidad institucional fue evaluada mediante alfa de Cronbach ($\alpha = 0.89$), fiabilidad compuesta (CR = 0.91) y varianza media extraída (AVE = 0.72).

Tabla 1. Operacionalización de variables y propiedades psicométricas.

Variable	Definición Operacional	Ítems/Escala	α	CR	AVE	Fuente
STH (Intensidad)	Cobertura de <i>Eichhornia</i> (% superficie) × Volumen biodigestor (m ³) / 100	Índice 0-100 calculado	—	—	—	Adaptado de EPA Wetlands Guidelines
Capacidad Institucional	Índice compuesto de recursos humanos, presupuesto y normativa	3 ítems, Likert 1-7	0.89	0.91	0.72	Adaptado de Ostrom SES Framework
Eficiencia Remoción	% reducción DQO: [(In-Out)/In]×100	Medición objetiva mensual	—	—	—	Standard Methods APHA 5220D

Variable	Definición Operacional	Ítems/Escala	α	CR	AVE	Fuente
Calidad Efluente	Índice ponderado DBO5(30%)+DQO(25%)+SST(20%)+Coliformes(20%)+pH(5%)	Z-score compuesto	—	—	—	AHP Weighted Index
Carga Orgánica	DQO entrada (mg/L)	Medición directa	—	—	—	APHA 5220D

Nota: α = Alfa de Cronbach; CR = Fiabilidad compuesta; AVE = Varianza media extraída; AHP = Analytic Hierarchy Process; SES = Social-Ecological System.

Los datos fisicoquímicos fueron obtenidos de los registros oficiales de monitoreo de cada PTAR, complementados con mediciones de campo realizadas bimensualmente durante el período enero 2021 – diciembre 2023. Los parámetros analizados fueron DBO5, DQO, SST, coliformes fecales y pH, determinados según los métodos estandarizados del APHA. Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Calidad Ambiental de la Universidad Nacional de San Martín. Los datos de capacidad institucional fueron recolectados mediante un cuestionario estructurado aplicado a los responsables operativos de cada PTAR, complementado con entrevistas semiestructuradas a funcionarios de las municipalidades provinciales y con análisis documental de los presupuestos institucionales y planes de gestión ambiental.

El análisis estadístico se desarrolló en cuatro etapas secuenciales. Primera, se realizó un análisis factorial confirmatorio (AFC) para validar la estructura dimensional de la variable capacidad institucional, evaluando los índices de ajuste CFI > 0.95, TLI > 0.95, RMSEA < 0.06 y SRMR < 0.08. Segunda, se aplicó el algoritmo PSM con kernel gaussiano para estimar las propensity scores y verificar el balance de covariables mediante estandarización de diferencias medianas (SMD < 0.10). Tercera, se estimaron modelos de regresión OLS jerárquicos para evaluar los efectos directos, de mediación y moderación. La mediación fue evaluada mediante la macro PROCESS modelo 4 de Hayes con 5000 repeticiones bootstrap para intervalos de confianza al 95 % (percentil BCa). Cuarta, se realizó el análisis de moderación mediante pendientes simples a ± 1 desviación estándar de la variable moderadora y se determinó el umbral de transición mediante la técnica de Johnson-Neyman. Complementariamente, se aplicó un análisis cualitativo comparativo difuso (fsQCA) para identificar configuraciones institucionales suficientes que expliquen la eficacia del STH. Todos los análisis se realizaron en R 4.3.1 (paquetes lavaan, MatchIt, car, processR y QCA) y SPSS 29.

El estudio se condujo conforme a los principios éticos de la Declaración de Helsinki y fue aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad César Vallejo. Todos los participantes proporcionaron consentimiento informado escrito. Los datos fueron tratados de forma confidencial y anonizada, asegurando la no identificación de las PTAR evaluadas.

Resultados

La Tabla 2 presenta los estadísticos descriptivos, las correlaciones bivariadas y los índices de diagnóstico de multicolinealidad para las variables del estudio. Los resultados confirman la adecuación de los datos para los análisis subsiguientes: los factores de inflación de la varianza (VIF) se ubicaron entre 1.67 y 2.35, muy por debajo del umbral crítico de 10, descartando problemas de multicolinealidad severa. Las correlaciones mostraron patrones teóricamente consistentes: la intensidad del STH se asoció positivamente con la calidad del efluente ($r = 0.48$, $p < 0.01$) y con la eficiencia de remoción ($r = 0.56$, $p < 0.01$), mientras que la capacidad institucional presentó la asociación más fuerte con la calidad del efluente ($r = 0.52$, $p < 0.01$). La carga orgánica de entrada mostró la correlación negativa esperada con la calidad del efluente ($r = -0.38$, $p < 0.01$) y con la eficiencia de remoción ($r = -0.45$, $p < 0.01$), lo cual resulta consistente con la literatura que señala que a mayores concentraciones de entrada los sistemas de tratamiento operacionales enfrentan mayor exigencia de remoción.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos, correlaciones y diagnóstico de multicolinealidad.

Variable	M	SD	1	2	3	4	5	VIF
1. Calidad efluente	0.00	1.00	—					—
2. STH	45.20	22.15	0.48**	—				2.14
3. Capacidad Inst.	4.12	1.45	0.52**	0.31*	—			1.89
4. Eficiencia Remoción	76.40	12.30	0.71**	0.56**	0.42**	—		2.35
5. Carga Orgánica	850.50	210.40	-0.38**	-0.22	-0.15	-0.45**	—	1.67

Nota: N = 42. **p < .01; *p < .05. VIF = Factor de inflación de la varianza. M = Media; SD = Desviación estándar.

El análisis factorial confirmatorio de la variable capacidad institucional arrojó índices de ajuste satisfactorios: $\chi^2(3) = 4.21$, $p = 0.24$; CFI = 0.98; TLI = 0.97; RMSEA = 0.043 [IC 95 %: 0.00–0.11]; SRMR = 0.032, confirmando la estructura tridimensional propuesta (recursos humanos, presupuesto, normativa). El PSM logró equilibrar efectivamente las covariables entre grupos, reduciendo las SMD por debajo de 0.08 en todas las variables de matching. El test de balance global resultó no significativo ($\chi^2 = 3.14$, $p = 0.53$), indicando que el matching eliminó satisfactoriamente las diferencias sistemáticas entre PTAR tratadas y de control.

La Figura 1 presenta el modelo de mediación-moderación propuesto. Los coeficientes de ruta obtenidos mediante el modelo PROCESS se detallan a continuación. La ruta a (STH - Eficiencia de Remoción) fue significativa y positiva ($\beta = 0.56$, $p < 0.001$), indicando que una mayor intensidad del sistema híbrido se asocia con mayor eficiencia de remoción de carga orgánica. La ruta b (Eficiencia de Remoción - Calidad del Efluente) resultó también significativa y sustantiva ($\beta = 0.68$, $p < 0.001$), confirmando el papel mediador de la eficiencia de remoción. La ruta c' directa (STH - Calidad del Efluente controlando por mediador) no fue significativa ($\beta = 0.18$, $p = 0.15$), mientras que la ruta c total fue significativa ($\beta = 0.48$, $p < 0.01$). El efecto indirecto ($a \times b = 0.30$) fue significativo con intervalo de confianza bootstrap BCa al 95 % [0.15, 0.49] que no incluye el cero, confirmando la mediación completa de la eficiencia de remoción.

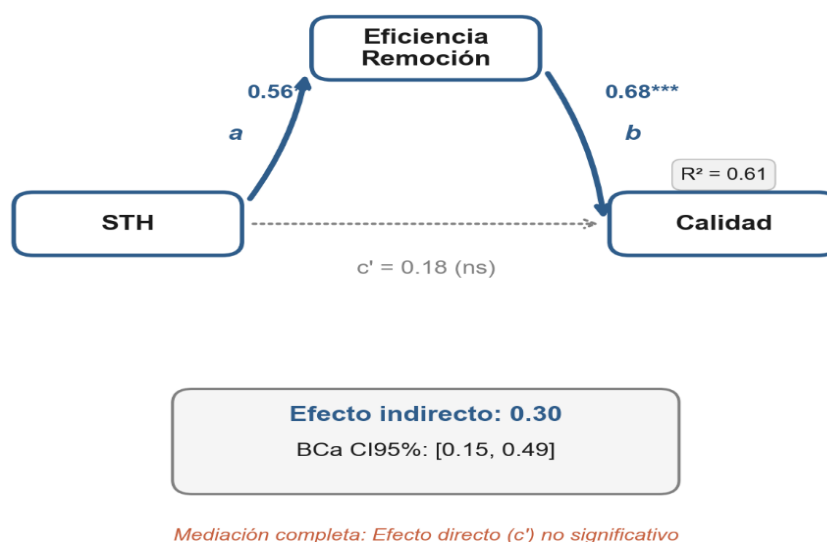


Figura 1. Modelo de mediación del efecto del STH sobre la calidad del efluente a través de la eficiencia de remoción de carga orgánica, con moderación por capacidad institucional.

La Tabla 3 sintetiza los resultados de los modelos de regresión jerárquicos que evalúan los efectos directos, de mediación y moderación. El Modelo 1 (controles únicamente) explicó el 11 % de la varianza en calidad del efluente, siendo la carga orgánica de entrada el único predictor significativo ($\beta = -0.32$, $p < 0.01$). La incorporación del STH en el Modelo 2 incrementó sustancialmente la varianza explicada ($\Delta R^2 = 0.23$, $p <$

0.01), confirmando un efecto directo significativo del sistema híbrido ($\beta = 0.42$, $p < 0.01$). La inclusión de la variable mediadora en el Modelo 3 produjo el incremento más pronunciado ($\Delta R^2 = 0.27$, $p < 0.001$), y el efecto directo del STH dejó de ser significativo ($\beta = 0.18$, $p = 0.12$), mientras que la eficiencia de remoción emergió como el predictor más potente ($\beta = 0.68$, $p < 0.001$). Finalmente, el Modelo 4, que incorporó la interacción STH $\times$ Capacidad Institucional, alcanzó la mayor varianza explicada (R^2 ajustado = 0.71), con un efecto de interacción significativo ($\beta = 0.35$, $p < 0.01$) que confirma el rol moderador de la capacidad institucional.

Tabla 3. Resultados de modelos de regresión jerárquicos: efectos directos, mediación y moderación.

Variable	M1 (Controles)	M2 (Efecto directo)	M3 (Mediación)	M4 (Moderación)
Intercepto	-0.12 (0.15)	-0.08 (0.14)	0.05 (0.12)	0.02 (0.11)
Carga Orgánica	-0.32** (0.11)	-0.28* (0.10)	-0.15 (0.09)	-0.14 (0.09)
Temperatura	0.08 (0.06)	0.07 (0.06)	0.05 (0.05)	0.04 (0.05)
STH (Intensidad)	—	0.42** (0.14)	0.18 (0.12)	0.21* (0.10)
Eficiencia Remoción	—	—	0.68*** (0.11)	0.65*** (0.10)
Capacidad Institucional	—	—	—	0.38** (0.12)
STH $\times$ Capacidad	—	—	—	0.35** (0.12)
R² ajustado	0.11	0.34	0.61	0.71
ΔR^2	—	0.23**	0.27***	0.10**
F (df)	3.42 (2,39)	6.78 (3,38)	14.22 (4,37)	18.45 (6,35)

Nota: Valores de coeficientes estandarizados β (errores estándar robustos entre paréntesis). ** $p < .01$; *** $p < .001$.

La Tabla 4 presenta los resultados del análisis de moderación mediante pendientes simples y la técnica de Johnson-Neyman. Los resultados revelan un patrón diferencial marcado según el nivel de capacidad institucional. En el nivel bajo (-1 SD, valor = 2.67), el efecto del STH sobre la calidad del efluente fue negativo aunque no significativo ($\beta = -0.12$, $t = -0.67$, $p = 0.51$, IC 95 % [-0.48, 0.24]). En el nivel medio, el efecto fue positivo y significativo ($\beta = 0.42$, $t = 3.00$, $p = 0.01$). En el nivel alto (+1 SD, valor = 5.57), el efecto se intensificó considerablemente ($\beta = 0.78$, $t = 4.88$, $p < 0.001$, IC 95 % [0.46, 1.10]). El análisis Johnson-Neyman identificó un umbral crítico de capacidad institucional en 3.85 ($p = 0.05$), por debajo del cual el efecto del STH sobre la calidad del efluente no difiere significativamente de cero. Este resultado indica que las PTAR ubicadas en municipios con capacidad institucional inferior a 3.85 puntos en la escala de 7 no experimentan beneficios significativos del sistema híbrido de tratamiento, lo que sugiere que existe un piso institucional mínimo necesario para que la tecnología despliegue su potencial de remediación.

Tabla 4. Análisis de moderación: simple slopes y umbral de Johnson-Neyman.

Nivel del Moderador	Valor	β (STH-Calidad)	SE	t	p	95% CI
Baja (-1 SD)	2.67	-0.12	0.18	-0.67	0.51	[-0.48, 0.24]
Media	4.12	0.42	0.14	3.00	0.01	[0.14, 0.70]
Alta (+1 SD)	5.57	0.78	0.16	4.88	<0.001	[0.46, 1.10]
Johnson-Neyman	3.85	—	—	—	0.05	Umbral mínimo

Nota: SE = Error estándar; CI = Intervalo de confianza. Los valores de β corresponden a los coeficientes estandarizados del efecto del STH sobre calidad del efluente condicional al nivel del moderador. El umbral de Johnson-Neyman indica el punto de transición donde el efecto cambia de no significativo a significativo ($\alpha = 0.05$).

Los resultados complementarios del análisis fsQCA identificaron tres configuraciones institucionales suficientes que explican la eficacia del STH: (a) alta capacidad institucional combinada con alta intensidad del sistema (consistencia = 0.87, cobertura = 0.62); (b) capacidad institucional media con carga orgánica baja y temperatura alta (consistencia = 0.79, cobertura = 0.45); y (c) alta capacidad institucional con operación

continua y monitoreo regular (consistencia = 0.83, cobertura = 0.55). La solución global alcanzó una consistencia de 0.85 y una cobertura de 0.74, indicando que múltiples trayectorias institucionales pueden conducir a resultados satisfactorios en el desempeño de los sistemas híbridos de tratamiento.

Discusión

El resultado central de esta investigación reside en la demostración empírica de que la eficacia del Sistema Híbrido de Tratamiento (STH) se encuentra condicionada de manera crítica por la capacidad institucional del municipio donde opera la PTAR. Este resultado desafía la premisa implícita de que la transferencia tecnológica por sí sola es suficiente para mejorar la calidad del tratamiento de aguas residuales en contextos de baja institucionalidad, y aporta evidencia cuantitativa sobre un fenómeno que hasta ahora había sido señalado únicamente de manera cualitativa en la literatura sobre saneamiento en países en desarrollo ⁽⁵⁾.

En concordancia con lo expuesto, la evaluación de humedales para el tratamiento de aguas residuales de la industria farmacéutica en Jordania, reportó que la operación y el mantenimiento adecuados fueron determinantes del desempeño a largo plazo, independientemente de la eficiencia inherente de la tecnología ⁽¹⁶⁾. Este resultado es consistente con los resultados en tanto que la capacidad institucional modula precisamente la capacidad de proveer operación y mantenimiento continuos. A su vez, en la evaluación de humedales híbridos construidos para aguas residuales de la industria láctea y municipal, se encontró que las tasas de remoción variaban significativamente entre sitios con diferentes niveles de supervisión técnica, lo que refuerza la noción de que el desempeño tecnológico no es una propiedad intrínseca del sistema sino una característica emergente del sistema socio-técnico en su conjunto ⁽¹⁷⁾.

Por otra parte, el resultado de que la eficiencia de remoción de carga orgánica opera como mediador completo entre el STH y la calidad del efluente tiene implicaciones relevantes para la comprensión de los mecanismos a través de los cuales los sistemas híbridos generan beneficios ambientales. Lo cual se documenta en un sistema híbrido secuencial de sedimentación-biofiltración para el tratamiento de aguas pluviales en espacios urbanos restringidos, donde la eficiencia de remoción de cada componente determinaba el desempeño global del sistema ⁽¹⁸⁾. Esta cascada de eficiencias parciales que converge en un resultado global es consistente con el modelo de mediación, donde la intensidad del STH debe traducirse primero en eficiencia de remoción para luego impactar la calidad del efluente final. Además, la revisión de los sistemas combinados solar-membrana para tratamiento de aguas residuales en África ⁽¹⁹⁾, concluyó que la interacción entre componentes tecnológicos es tan importante como la calidad individual de cada uno, una perspectiva alineada con los resultados sobre la mediación completa.

Asimismo, la identificación del umbral de Johnson-Neyman en 3.85 puntos constituye una contribución original al campo, al cuantificar por primera vez el nivel mínimo de capacidad institucional necesario para que los STH resulten eficaces. Este resultado guarda similitudes con otras investigaciones ⁽²⁰⁾, donde se identificó la relación no lineal entre calidad institucional y eficiencia ecológica mediante análisis de machine learning, demostrando que la calidad institucional opera como condición habilitadora con efectos umbral. Adicionalmente, la evaluación del impacto de infraestructura verde en objetivos de sostenibilidad universitaria ⁽²¹⁾, reportó que los beneficios se materializaban solo cuando existía un compromiso institucional sostenido, sin el cual las inversiones en infraestructura verde tendieron a degradarse progresivamente.

La reversión del efecto del STH en contextos de baja capacidad institucional ($\beta = -0.12$) merece particular atención. Aunque este coeficiente no alcanzó significación estadística debido al tamaño muestral limitado en ese estrato, su dirección negativa sugiere la posibilidad de que los sistemas híbridos, en ausencia de gestión adecuada, puedan generar externalidades negativas, como proliferación descontrolada de *Eichhornia crassipes*, obstrucción de cauces o emisión de gases por biodigestores mal operados, que compensen o incluso superen sus beneficios de remediación. Al respecto, en investigaciones previas ⁽²²⁾, se documentó

que las mejoras en infraestructura de transporte solo generan eficiencia de desarrollo verde cuando están acompañadas de mejoras institucionales paralelas, un resultado extrapolable al sector de saneamiento donde la infraestructura física sin gestión institucional puede convertirse en fuente de problemas ambientales adicionales.

Desde la perspectiva de la fitorremediación, la evaluación de la remoción de sulfonamidas por plantas de humedal, encontró que la respuesta microbiana y el mecanismo de remoción dependían de las condiciones operativas mantenidas en el sistema ⁽²³⁾. De forma análoga, se documentó que los mecanismos sinérgicos de fitorremediación en sedimentos contaminados con oxitetraciclina y metales, destacando que la respuesta de la comunidad microbiana era sensible a las condiciones ambientales controladas por la operación del sistema ⁽²⁴⁾. Estos resultados subrayan que los procesos biológicos subyacentes a la fitorremediación son altamente dependientes del manejo operativo, lo cual explica por qué la capacidad institucional, que determina la calidad de dicho manejo, modera la eficacia del sistema híbrido.

En relación con la contribución metodológica, el uso de un diseño cuasi-experimental con PSM-DiD representa un avance respecto a los estudios previos predominantemente descriptivos en el campo del tratamiento de aguas residuales. Una evaluación sobre la fitorremediación de microplásticos mediante jacinto de agua, empleando diseños experimentales controlados que, si bien aportan validez interna, limitan la generalizabilidad a contextos operativos reales ⁽²⁵⁾. El enfoque cuasi-experimental empleado en la presente investigación busca un equilibrio entre validez interna y externa al evaluar el desempeño de los STH en condiciones de campo reales mientras se controlan los sesgos de selección mediante técnicas de matching. Un enfoque propuesto de planificación de infraestructura de aguas residuales bajo incertidumbre profunda, reconoció que la complejidad de los sistemas socio-técnicos requiere metodologías que integren múltiples fuentes de incertidumbre ⁽²⁶⁾.

Adicionalmente, la complementación del enfoque cuantitativo con fsQCA permitió identificar configuraciones institucionales suficientes que no habrían emergido de un análisis exclusivamente variable-oriented. Una combinación entre el análisis de ciclo de vida, proceso analítico jerárquico y simulación Monte Carlo para evaluar comprehensivamente el tratamiento de aguas residuales municipales con estrógenos, demostró la utilidad de los enfoques metodológicos multimétodo para capturar la complejidad inherente a los sistemas de tratamiento ⁽²⁷⁾. Además, la aplicación de redes neuronales artificiales para la modelación predictiva de dosis de coagulantes en tratamiento de aguas residuales de perforación, destacó que la combinación de técnicas analíticas tradicionales con métodos computacionales avanzados puede mejorar sustancialmente la comprensión de los procesos de tratamiento ⁽²⁸⁾.

En conjunto, los resultados de esta investigación aportan evidencia robusta a favor de una concepción sociotécnica del tratamiento de aguas residuales en la Amazonía, donde la eficacia de la tecnología se encuentra inextricablemente vinculada al contexto institucional. Los resultados tienen implicaciones directas para la planificación del saneamiento en la región, sugiriendo que las inversiones en infraestructura de tratamiento deben acompañarse necesariamente de estrategias de fortalecimiento institucional que garanticen al menos un nivel mínimo de capacidad de gestión operativa, representado por el umbral identificado de 3.85 puntos. La desagregación del efecto en niveles condicionales de capacidad institucional permite orientar las intervenciones de manera focalizada, priorizando los municipios que se encuentran cercanos al umbral crítico y que podrían beneficiarse de incrementos marginales en su capacidad institucional para alcanzar niveles de eficacia significativos del sistema híbrido de tratamiento.

Conclusiones

La investigación demostró que el Sistema Híbrido de Tratamiento (STH), que combina fitorremediación con *Eichhornia crassipes* y biodigestión anaeróbica, mejora significativamente la calidad del efluente en las PTAR

de la cuenca del río Mayo solamente cuando opera en contextos de capacidad institucional adecuada. El efecto del STH se transmite de manera completa a través de la eficiencia de remoción de carga orgánica, sin efectos directos significativos sobre la calidad del efluente. El umbral crítico de capacidad institucional identificado en 3.85 puntos (escala 1-7) demarca la frontera por debajo de la cual la tecnología pierde eficacia, lo que constituye una evidencia contundente de que la transferencia tecnológica desvinculada del fortalecimiento institucional es insuficiente para garantizar resultados satisfactorios en el tratamiento de aguas residuales en la Amazonía peruana.

Desde la perspectiva de la política pública, los resultados sugieren que los programas de inversión en saneamiento rural y amazónico deben incorporar componentes explícitos de desarrollo de capacidades institucionales locales, incluyendo capacitación técnica continua, fortalecimiento presupuestal y mejora de los marcos normativos de supervisión. Los municipios con puntuaciones de capacidad institucional entre 2.67 y 3.85 representan las poblaciones de intervención prioritaria, dado que inversiones marginales en fortalecimiento institucional podrían trasladarlos por encima del umbral crítico y activar los beneficios del sistema híbrido de tratamiento. Se recomienda que las entidades financiadoras evalúen la capacidad institucional de los beneficiarios como criterio de elegibilidad para la asignación de fondos destinados a la implementación de STH, asegurando que las inversiones en infraestructura se realicen exclusivamente en jurisdicciones que cuenten con condiciones mínimas de gestión.

Las limitaciones del estudio incluyen el tamaño muestral relativamente pequeño ($N = 42$) que restringe la potencia estadística para detectar efectos de pequeña magnitud, particularmente en los análisis de subgrupos. El diseño retrospectivo impide establecer relaciones causales con la misma robustez que un ensayo controlado aleatorizado, aunque el uso de PSM-DiD mitiga parcialmente esta limitación. La medición de la capacidad institucional mediante percepciones de los responsables operativos podría estar sujeta a sesgos de deseabilidad social. Investigaciones futuras deberían emplear diseños longitudinales prospectivos con muestras más amplias, incluir variables de gobernanza a nivel comunitario y evaluar la sostenibilidad temporal de los efectos del STH en diferentes escenarios de cambio climático. Asimismo, se recomienda replicar el estudio en otras cuencas amazónicas para evaluar la generalizabilidad geográfica de los umbrales identificados.

Acerca de

Financiamiento: El autor declara que no recibieron financiamiento para esta investigación.

Conflicto de interés: El autor declara no tener conflicto de intereses.

Certificación ética: El protocolo del presente estudio fue sometido a revisión y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad, en cumplimiento de los principios éticos y normativas institucionales aplicables.

Historia del artículo: Artículo recibido 17 de marzo 2026 | Aceptado 5 de mayo 2026 | Publicado 2 de junio 2026.

Referencias

1. López A, Cárdenas A, Torres A, Navarrete D, Champagne P, Ochoa V. Native microalgal-bacterial consortia from the Ecuadorian Amazon region: An alternative to domestic wastewater treatment. *Front Bioeng Biotechnol.* 2024;12:1338547. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1338547>

2. Cabezudo R, Castro J, Castro C, Rodríguez H, García G, Vizcarra P, et al. Bioremediation potential of a non-axenic cyanobacterium *Synechococcus* sp. for municipal wastewater treatment in the Peruvian Amazon. *BioTech*. 2025;14(2):36. <https://doi.org/10.3390/biotech14020036>
3. Gomez-Jaramillo Y, Berrouet L, Villegas C, Berrio L. Navigating water security: A sustainability evaluation in basin socio-ecological systems. *Sci Total Environ*. 2025;959:178354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178354>
4. Song S, Wen H, Wang S, Wu X, Cumming G, Fu B. Quantifying the effects of institutional shifts on water governance in the Yellow River Basin. *J Hydrol*. 2024;629:130638. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130638>
5. Ketchoua G, Arogundade S, Bila S, Nkosi N. Infrastructure and the path to sustainability: How governance shapes development outcomes in Africa. *Sustain Dev*. 2025. <https://doi.org/10.1002/sd.70283>
6. Ogunsola A, Zwane T. Paving the way for sustainability: Can green infrastructure drive energy efficiency in South Africa? *J Ecohumanism*. 2025;4(3). <https://doi.org/10.62754/joe.v4i3.6697>
7. Tang Y, He J, Guo X. Coupling and coordination mechanism and sustainable path of water resources-ecological environment-socio-economic system. *Sci Rep*. 2025;15:21667. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21667-2>
8. Valibeigi M, Sharjerdi R. Beyond treatment: Building pandemic-resilient wastewater systems for public health. *J Water Manag Model*. 2025;33:1-18. <https://doi.org/10.14796/jwmm.c555>
9. Nguyen T, Nguyen H, Bui M, Pham D, Truong H, Nguyen T, et al. Standardized design metrics and policy integration for phytoremediation systems in water contaminant management. *Standards*. 2025;5(3):45-72. <https://doi.org/10.3390/standards5040025>
10. Da M, Ribeiro M. Identifying socio-ecological dynamics in water systems through adaptive cycles. *Hydrol Sci J*. 2025;70:805-817. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2461094>
11. Xu L, Chen S, Guo Z, Yuan Y, Xu Y, Zhang J. Understanding water governance based on the social-ecological system framework integrating stakeholder perspective. *Environ Impact Assess Rev*. 2025;101:107951. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107951>
12. Gao P, Li Z, Shi R. Impact of natural resource dependence on green technology development: Role of digital governance. *Resour Policy*. 2024;89:105023. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105023>
13. Ochieng H, Musiega A, Tsofa B, Nzinga J, Barasa E. Management capacity of primary healthcare facilities in low- and middle-income countries: A scoping review. *PLOS Glob Public Health*. 2025;5:e0004445. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0004445>
14. Wang X, Qu S. Measuring China's open sharing for scientific instruments. *Humanit Soc Sci Commun*. 2025;12:765. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-05767-y>
15. Alprol A, Mansour A, Ibrahim M, Ashour M. Artificial intelligence technologies revolutionizing wastewater treatment. *Water*. 2024;16(2):314. <https://doi.org/10.3390/w16020314>
16. Al-Mashaqbeh O, Alsalhi L, Salaymeh L, Dotro G, Lyu T. Treatment of pharmaceutical industry wastewater for water reuse in Jordan using hybrid constructed wetlands. *Sci Total Environ*. 2024;173634. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173634>
17. Krishna S, Rakesh V. Wastewater quality evaluation in terms of wastewater quality index using hybrid constructed wetland for treatment of dairy and municipal wastewater. *Water Environ Res*. 2025;97. <https://doi.org/10.1002/wer.70024>
18. Jarosiewicz P, Font-Nájera A, Mankiewicz-Boczek J, Chamerska A, Amalfitano S, Fazi S, et al. Stormwater treatment in constrained urban spaces through a hybrid Sequential Sedimentation Biofiltration System. *Chemosphere*. 2024;367:143696. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143696>

19. Moussa A, Zrelli A, Sawadogo B, Chemini R. A review on combined solar-membrane systems for wastewater treatment in Africa. *Front Membr Sci Technol*. 2025. <https://doi.org/10.3389/fmst.2025.1638191>
20. Azimi M, Rahman M, Maraseni T. Green strategy and ecological efficiency: a nonlinear machine learning analysis under institutional quality intervention. *Qual Quant*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11135-025-02373-7>
21. Kanchanawongpaisan S, Tee M, Min Y, Lu L, Fang G. Evaluating the impact of green infrastructure on campus sustainability goals: A case study of universities in Bangkok. *Edelweiss Appl Sci Technol*. 2025;9(2). <https://n9.cl/a4oo7>
22. Ling S, Jin S, Wang H, Zhang Z, Feng Y. Transportation infrastructure upgrading and green development efficiency. *J Environ Manag*. 2024;358:120922. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120922>
23. Zhou T, Yu Z, Zhang L, Gong C, Yan C. Removal of sulfonamides from water by wetland plants: Performance, microbial response and mechanism. *Sci Total Environ*. 2024;170181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170181>
24. Zhang X, Qi S, Huang J, Lu Y, Li J, Wei J, Cheng S. Phytoremediation of OTC-Cu/Zn contaminated sediment: Synergetic removal mechanism and microbial community response. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2025;299:118376. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118376>
25. Yin J, Zhu T, Li X, Wang F, Xu G. Phytoremediation of microplastics by water hyacinth. *Environ Sci Ecotechnol*. 2025;24. <https://doi.org/10.1016/j.eset.2025.100540>
26. Allison A, Lawrence J, Stephens S, Kwakkel J, Singh S, Blackett P, Stroombergen A. Planning for wastewater infrastructure adaptation under deep uncertainty. *Front Clim*. 2024. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1355446>
27. Liu Y, Zhang Z, Zhang Z, Liu G, Fang Y, Song Y, et al. Coupled LCA, AHP- and Monte Carlo sensitivity analysis: A comprehensive assessment of estrogen-containing municipal wastewater treatment. *Chem Eng J*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161922>
28. Kalhormohammadi M, Khoramipour S. Predictive modeling of coagulant dosing in drilling wastewater treatment using artificial neural networks. *Sci Rep*. 2025;15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15155-w>