



# Plantas macrófitas (*Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*) como depurador de metales pesados en aguas residuales domésticas

Macrophytic plants (*Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*) as a scrubber of heavy metals in domestic waste water

Lozano-Chung, Andi <sup>1,2\*</sup>

Lozano-Carranza, Carlos Mauricio <sup>2</sup>

Colichon-Carranza, Rodrigo David <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ecología, Universidad Nacional de San Martín, Perú

<sup>2</sup>Lozano Consultores S.A.C, Perú

<sup>3</sup>TUSAN Ingenieros Consultores S.A.C, Perú

**Recibido:** 12 Abr. 2024 | **Aceptado:** 03 Jul. 20234 | **Publicado:** 10 Jul. 2024

**Autor de correspondencia\*:** alozanchu@unsm.edu.pe

**Como citar este artículo:** Lozano-Chung, A., Lozano-Carranza, C. M. & Colichon-Carranza, R. D. (2024). Plantas macrófitas (*Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*) como depurador de metales pesados en aguas residuales domésticas. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 3(2), e688. <https://doi.org/10.51252/reacae.v3i2.e688>

## RESUMEN

La contaminación por metales pesados en cuerpos de agua es un problema crítico, agravado por el crecimiento urbano y el déficit en saneamiento básico, resultando en vertimientos inadecuados de aguas residuales. Este estudio evaluó la eficiencia de las plantas macrófitas *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* para depurar metales pesados en aguas residuales domésticas del río Shilcayo, en el distrito de La Banda de Shilcayo, Perú. Se utilizó una muestra de 120 L de agua residual y 72 plantas durante un período de 6 meses. Se implementaron tres tratamientos de 5, 10 y 15 días, más una muestra testigo. Los resultados mostraron que el tratamiento de 15 días fue el más efectivo, alcanzando una remoción de arsénico del 96,33% con *Pistia stratiotes* y 96% con *Eichhornia crassipes*. Ambos tratamientos cumplieron con los estándares del ECA-agua para la categoría de conservación de ambientes acuáticos. Se concluye que el tratamiento de 15 días con *Eichhornia crassipes* fue el más eficiente en la remoción de plomo y cadmio, alcanzando niveles seguros según las normativas.

**Palabras clave:** depuración; arsénico; plomo; contaminación ambiental; conservación acuática

## ABSTRACT

Heavy metal contamination in water bodies is a critical issue, exacerbated by urban growth and deficits in basic sanitation, leading to improper discharge of wastewater. This study evaluated the efficiency of the macrophyte plants *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* in removing heavy metals from domestic wastewater in the Shilcayo River, located in the district of La Banda de Shilcayo, Peru. A sample of 120 L of wastewater and 72 plants was used over a 6-month period. Three treatments of 5, 10, and 15 days were implemented, along with a control sample. The results showed that the 15-day treatment was the most effective, achieving 96.33% arsenic removal with *Pistia stratiotes* and 96% with *Eichhornia crassipes*. Both treatments met the ECA-water standards for the conservation of aquatic environments. It was concluded that the 15-day treatment with *Eichhornia crassipes* was the most efficient in removing lead and cadmium, achieving safe levels according to regulations.

**Keywords:** purification; arsenic; lead; environmental contamination; aquatic conservation



## 1. INTRODUCCIÓN

El acelerado proceso de urbanización en las zonas periurbanas de las ciudades emergentes ha traído consigo un conjunto de desafíos, especialmente en lo que respecta al acceso a servicios básicos como el agua y el saneamiento (Ding et al., 2023; Savelli et al., 2023). En la región de San Martín, Perú, el río Shilcayo se ha convertido en una fuente esencial para satisfacer la creciente demanda de agua en la ciudad de Tarapoto, captando un caudal de 120 L/s desde la parte alta del Área de Conservación Regional Cerro Escalera. Sin embargo, el crecimiento poblacional y urbano ha exacerbado los problemas de contaminación, especialmente por las descargas de aguas residuales sin tratamiento que deterioran la calidad del agua y amenazan la salud de las comunidades locales, tal como refieren Liu et al. (2023) y Zeng et al. (2023).

La calidad del agua es un aspecto crítico que influye directamente en la salud pública y en la sostenibilidad del medio ambiente (Syeed et al., 2023; van Vliet et al., 2023). Las descargas de aguas residuales, sin el adecuado tratamiento, alteran las características físicas, químicas y microbiológicas de los cuerpos de agua receptores, como es el caso del río Shilcayo. Estas alteraciones no solo deterioran la calidad ambiental del río, sino que también representan un riesgo para las personas que dependen de él, ya sea para consumo directo o para otras actividades cotidianas (Al-Hazmi et al., 2023; Mishra et al., 2023). Medina & López (2015) señalan que la problemática de las aguas residuales es un factor determinante en la propagación de enfermedades y el deterioro del medio ambiente, resaltando la necesidad de implementar soluciones efectivas.

A nivel global, la gestión de las aguas residuales sigue siendo un problema constante, especialmente en regiones en desarrollo (Lin et al., 2023). El uso irregular de contaminantes industriales, actividades agropecuarias y la minería, han introducido metales pesados y otros elementos tóxicos en los cuerpos de agua, lo que agrava la situación ambiental (du Plessis et al., 2023; Manisha et al., 2023). Londoño Franco et al. (2016) destacan que la contaminación por metales pesados, como el plomo, cadmio y mercurio, ha alcanzado niveles alarmantes, afectando tanto al medio ambiente como a la salud humana. Estos contaminantes, al infiltrarse en los alimentos y el agua, perturban la cadena alimentaria y presentan serios riesgos para la salud pública.

El aumento continuo en la demanda de agua a nivel mundial, impulsado por el crecimiento poblacional y el desarrollo socioeconómico, plantea desafíos adicionales en la gestión de los recursos hídricos (Scanlon et al., 2023). La UNESCO, (2024) proyecta que la demanda de agua aumentará entre un 20% y un 30% para el año 2050, evidenciando la presión sobre los recursos hídricos existentes y destacando la necesidad de mejorar las prácticas de gestión y tratamiento del agua. En este contexto, la implementación de tecnologías sostenibles para la depuración de aguas residuales se vuelve cada vez más urgente.

Los humedales artificiales, que utilizan plantas macrófitas como *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*, se presentan como una solución para la remoción de metales pesados de las aguas residuales (Gusti Wibowo et al., 2023). Estas plantas tienen la capacidad de absorber y acumular contaminantes, contribuyendo así a la purificación del agua (Rasool et al., 2023). Por lo tanto, la efectividad de estas plantas en la depuración de aguas residuales podría ofrecer una solución viable y sostenible para mejorar la calidad del agua en ríos como el Shilcayo, reduciendo los riesgos ambientales y de salud (Carreño Sayago et al., 2024).

Este estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia de *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* en la depuración de metales pesados en las aguas residuales domésticas del río Shilcayo. A través de la determinación de las concentraciones iniciales de metales pesados, la evaluación de la eficiencia de remoción mediante estas plantas macrófitas y la comparación entre ambas especies, se busca aportar conocimiento para la gestión sostenible del agua. La hipótesis de investigación plantea que estas plantas

son eficaces en la reducción de metales pesados, lo que podría tener un impacto positivo en la calidad ambiental del río y en la salud de las poblaciones circundantes.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Diseño de la investigación

Se realizó una investigación aplicada, cuyo propósito fue abordar el problema de contaminación que afecta al río Shilcayo en el sector Chontamuyo, provocado por las descargas de aguas residuales y otras actividades antrópicas. La finalidad de este estudio fue optimizar los escenarios ambientales en la zona y mejorar las condiciones ambientales y de vida de los habitantes de este sector. El nivel de la investigación fue explicativo, ya que se enfocó en explicar las causas de la contaminación del río Shilcayo y en identificar las condiciones o circunstancias bajo las cuales se presenta esta problemática ambiental en esta parte de la ciudad.

### 2.2. Unidad de análisis

La población estudiada corresponde a las aguas residuales que se vierten directamente en el cuerpo receptor del río Shilcayo, con un caudal total de 34,38 L/s. La muestra se compuso de 120 L de agua del río Shilcayo, los cuales fueron distribuidos en 6 estanques de vidrio con una capacidad de 20 L cada uno. Además, se utilizaron 72 plantas macrófitas, acondicionando 12 plantas en cada estanque. La metodología aplicada siguió el protocolo nacional de monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales establecido por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016). Este protocolo permite decidir sobre los puntos y temporadas de muestreo, por lo que los resultados obtenidos son válidos para esos puntos y temporadas específicos.

### 2.3. Procedimiento experimental

Se consideraron dos fases en la muestra: una fase previa al tratamiento (T0) y una fase posterior al tratamiento (T1, T2 y T3). En esta metodología, uno de los grupos actúa como experimental, mientras que el otro funciona como control. El grupo experimental es influenciado por la variable independiente, mientras que el grupo de control no lo es. En otras palabras, al grupo de metales se le realizó un análisis inicial (pretratamiento, T0) antes de la experimentación. Posteriormente, se aplicó el estímulo (introducción de macrófitas en los estanques experimentales) y, finalmente, se llevó a cabo una prueba posterior al tratamiento para analizar y evaluar los resultados obtenidos.

Para evaluar la eficiencia de los diferentes tratamientos, se aplicó una fórmula que establece una relación entre el grupo control (T0) y los grupos experimentales (T1, T2 y T3), la cual se detalla a continuación:

$$\%_{Remoción} = \left( \frac{Pre\ tratamiento\ (T0) - Postratamiento\ (T1, T2\ y\ T3)}{Pre\ tratamiento\ (T0)} \right) \times 100$$

Donde:

T0 = Pre tratamiento (T0)

T1 = Post tratamiento (T1, T2 y T3)

Basándose en la fórmula matemática para determinar el porcentaje de remoción de cada macrófita en función del tiempo de tratamiento (5, 10 y 15 días), se calcularon todos los resultados obtenidos durante la experimentación. Para ello, fue fundamental disponer de los datos de nuestra muestra inicial o control (T0) y los resultados de cada tratamiento en relación al tiempo y al tipo de macrófita evaluada.

## 2.4. Análisis estadístico

Se empleó un método de ensayo proporcionado por un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL). La técnica estadística utilizada fue el ANOVA, que permitió evaluar la hipótesis con un nivel de significancia del 5% y un nivel de confianza del 95%. Además, se procesaron, analizaron, interpretaron y compararon los resultados emitidos por el laboratorio con la normativa ambiental nacional, específicamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, Categoría 4: conservación del ambiente acuático, E2: ríos de la selva (D. S. N° 004-2017-MINAM, ECA-agua) (Tabla 1). Estos estándares fueron previamente caracterizados y utilizados en los tres tratamientos (T1, T2 y T3).

**Tabla 1.**

*Concentración de metales según ECA-agua (cuerpo receptor)*

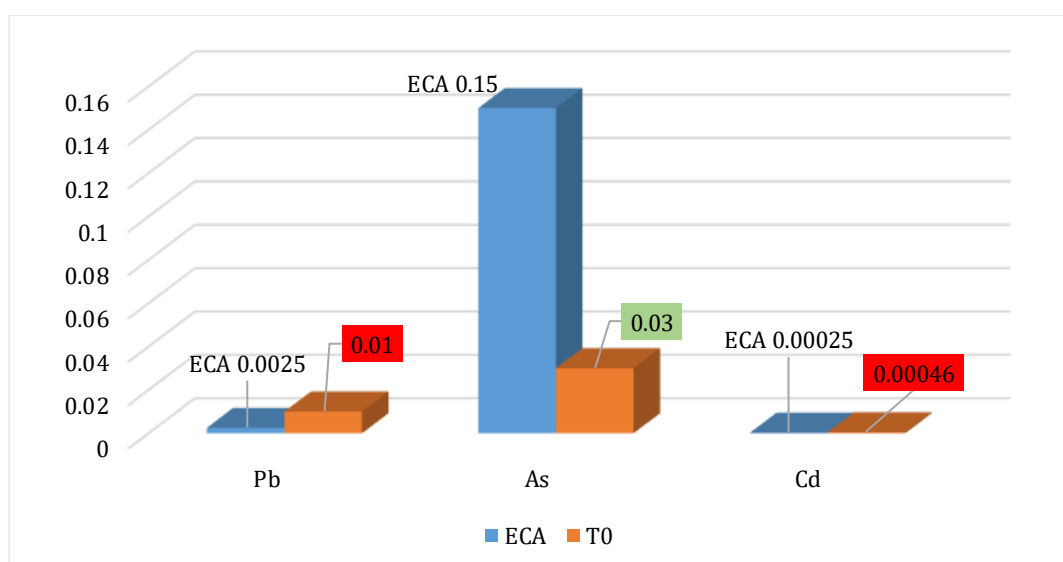
Parámetros	Unidad de medida	Estándares de calidad ambiental
Arsénico (As)	mg/L	0,15
Plomo (Pb)	mg/L	0,0025
Cadmio (Cd)	mg/L	0,00025

Fuente: D. S. N° 004-2017-MINAM

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Concentraciones iniciales de metales pesados

Las concentraciones iniciales de metales en el cuerpo receptor del río Shilcayo se determinaron en el muestreo previo al tratamiento (T0), que sirvió como muestra testigo. Estos datos fueron utilizados para evaluar los niveles de los elementos antes de aplicar los tres tratamientos realizados en esta investigación. Las concentraciones iniciales encontradas fueron 0,010 mg/L de Pb, 0,00046 mg/L de Cd y 0,030 mg/L de As. De estos, solo el As cumple con los límites establecidos en la normativa peruana, mientras que el Pb y Cd superan ligeramente los valores permitidos según el D. S. N° 004-2017-MINAM (Figura 1).



**Figura 1.** Concentración inicial (T0) de Pb, Cd y As respecto al ECA

Resultados similares fueron reportados por Mena Ayala (2021), quien encontró concentraciones iniciales (T0) de Pb de 0,0007 mg/kg y de Cd de 0,0020 mg/kg, indicando la presencia de estos metales en las aguas residuales de la localidad de Nueva Esperanza, región Amazonas. Por su lado, Rojas & Suyón (2020) reportaron concentraciones de As en las aguas consumidas en el CC.PP. de Santa Cruz del Médano, donde las mediciones previas al tratamiento (T0) revelaron una concentración de 0,047 mg/L. Esta situación

representa una problemática ambiental para la comunidad, ya que la contaminación por elementos metálicos en cuerpos de agua suele deberse a actividades antrópicas, como la acumulación de residuos sólidos que producen lixiviados, actividades industriales y el uso de fertilizantes químicos en la agricultura.

### 3.2. Eficiencia de remoción de metales pesados utilizando plantas macrófitas

La tabla 2 evidencia los resultados de la eficiencia de remoción de metales pesados (Pb, As y Cd) en el río Shilcayo utilizando dos especies de macrófitas: *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*. Los datos están organizados en tres tratamientos (T1, T2, T3) y comparan las concentraciones de metales antes y después del tratamiento (pre y post tratamiento). Además, se muestra la eficiencia de remoción para cada metal y macrófita, junto con los ECA de referencia para la categoría 4, que corresponde a la conservación del ambiente acuático.

**Tabla 2.**

*Eficiencia de remoción de Pb, As y Cd utilizando E. crassipes y P. stratiotes*

Tratamiento	Metal	Macrófita	Pre tratamiento	Post tratamiento	Eficiencia (%)	ECA (Cat 4)
T1	Pb	<i>E. crassipes</i>	0,010 mg/L	0,004 mg/L	60	0,0025 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,010 mg/L	0,005 mg/L	50	0,0025 mg/L
	As	<i>E. crassipes</i>	0,030 mg/L	0,025 mg/L	16,7	0,15 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,030 mg/L	0,026 mg/L	13,3	0,15 mg/L
	Cd	<i>E. crassipes</i>	0,00046 mg/L	0,00030 mg/L	34,78	0,00025 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,00046 mg/L	0,00040 mg/L	13,04	0,00025 mg/L
T2	Pb	<i>E. crassipes</i>	0,010 mg/L	0,006 mg/L	40	0,0025 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,010 mg/L	0,007 mg/L	30	0,0025 mg/L
	As	<i>E. crassipes</i>	0,030 mg/L	0,0035 mg/L	88,33	0,15 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,030 mg/L	0,0024 mg/L	92	0,15 mg/L
	Cd	<i>E. crassipes</i>	0,00046 mg/L	0,00027 mg/L	41,3	0,00025 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,00046 mg/L	0,00029 mg/L	36,96	0,00025 mg/L
T3	Pb	<i>E. crassipes</i>	0,010 mg/L	0,002 mg/L	80	0,0025 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,010 mg/L	0,004 mg/L	60	0,0025 mg/L
	As	<i>E. crassipes</i>	0,030 mg/L	0,0012 mg/L	96	0,15 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,030 mg/L	0,0011 mg/L	96,33	0,15 mg/L
	Cd	<i>E. crassipes</i>	0,030 mg/L	0,0012 mg/L	96	0,15 mg/L
		<i>P. stratiotes</i>	0,030 mg/L	0,0011 mg/L	96,33	0,15 mg/L

En el tratamiento T1, se observan las eficiencias más bajas en la remoción de los metales, con porcentajes que varían entre el 13,04% y el 60% dependiendo del metal y la macrófita utilizada. *Eichhornia crassipes* mostró una mayor eficiencia en la remoción de Pb (60%) y Cd (34,78%), mientras que *Pistia stratiotes* tuvo menor eficacia, especialmente en la remoción de As (13,3%).

El tratamiento T3 fue el más efectivo, con eficiencias de remoción que alcanzaron hasta el 96,33% para Pb y As utilizando ambas macrófitas. Estos resultados sugieren que un mayor tiempo de tratamiento o una mayor exposición a las macrófitas puede mejorar significativamente la capacidad de remoción de metales pesados en cuerpos de agua contaminados. Sin embargo, incluso en los casos de mayor eficiencia, las concentraciones de algunos metales como el Pb y Cd post tratamiento sigue excediendo los valores establecidos por la normativa ECA.

De manera similar, Ayme Estacio & Ramos Pongo (2020) encontraron una notable eficiencia en la remoción de Pb utilizando *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes*, alcanzando un 99,89% de eliminación. Los resultados situaron las concentraciones de plomo por debajo de los límites establecidos por la normativa ambiental, sugiriendo que el agua residual tratada con estas macrófitas es óptima y adecuada para su uso en el riego agrícola, como fue el caso en la localidad de Cashuacro.

Mena Ayala (2021), por su parte, evaluó la eficiencia de remoción de metales pesados utilizando diversas macrófitas y concluyó que *Eichhornia crassipes* es especialmente efectiva, con una capacidad de remoción del 84,36% para el Pb y del 78,48% para el Cd. Este estudio refuerza la recomendación del uso de *Eichhornia crassipes* como una solución natural para depurar elementos metálicos en aguas residuales, evidenciando su potencial en la mitigación de la contaminación hídrica.

### 3.3. Análisis de varianza

Dado que el valor crítico de F es mayor que el valor F calculado, no se encontraron diferencias significativas entre las especies de macrófitas utilizadas. Sin embargo, sí se observaron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, destacándose el tratamiento T3 como el más eficiente para la remoción de As (Tabla 3).

**Tabla 3.**

*Análisis de varianza de eficiencia de remoción de metales pesados utilizando plantas macrófitas*

Metal	Origen de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Pb	Especies	2,67E-06	1	2,67E-06	16	0,057190958	18,51282051
	Tratamientos	1,23E-05	2	6,17E-06	37	0,026315789	19
	Error	3,33E-07	2	1,67E-07			
	Total	1,53E-05	5				
As	Especies	6,67E-09	1	6,67E-09	0,012	0,922501574	18,51282051
	Tratamientos	0,000736443	2	0,000368222	667,471	0,001495951	18
	Error	1,10E-06	2	5,52E-07			
	Total	1,53E-05	5				
Cd	Especies	7,35E-09	1	7,35E-09	7,737	0,10859964	18,51282051
	Tratamientos	5,43E-09	2	2,72E-09	2,859	0,25909091	19
	Error	1,10E-06	2	5,52E-07			
	Total	1,53E-05	5				

Además, aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas en la remoción de Pb, As y Cd según las macrófitas estudiadas, el tratamiento T3 mostró una mayor eficiencia en la remoción de Cd utilizando *Eichhornia crassipes*, mientras que el tratamiento T2 fue más eficaz con *Pistia stratiotes*. Esto indica que, a pesar de la ausencia de diferencias significativas entre las macrófitas, sí existen diferencias significativas al 95% en la remoción de Pb y As según los tratamientos realizados.

Mena Ayala (2021), señala que *Eichhornia crassipes* presenta una acción de eliminación de Pb no significativa ( $p > 0,05$ ). Sin embargo, su eficiencia en la eliminación de Cd es significativa, alcanzando un 78%. De manera similar, Quispe Baldeón et al. (2017) encontraron que las concentraciones de Pb antes del tratamiento eran de 0,015 ppm y, después del tratamiento, descendieron a 0,001 ppm, lo que indica una eficiencia de remoción del 31% para *Eichhornia crassipes* en este metal, lo que confirma su capacidad de fitorremediación. Por otro lado, Rojas & Suyón (2020) reportaron que, en el T1, la concentración inicial de As era de 0,047 mg/L, la cual disminuyó a 0,031 mg/L durante la primera semana y a 0,019 mg/L en la segunda semana de tratamiento. Estos resultados demuestran que *Eichhornia crassipes* tiene una capacidad de remoción de As del 60%.

## CONCLUSIONES

La alta eficiencia de remoción de As observada en *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* durante el tratamiento T3, con tasas del 96,33% y 96% respectivamente en solo 15 días, sugiere que estas plantas macrófitas son efectivas para la fitorremediación de cuerpos de agua contaminados con metales pesados. Esto tiene importantes implicaciones prácticas, ya que su implementación podría ofrecer una solución



sostenible y de bajo costo para mitigar la contaminación en ríos y otros cuerpos de agua afectados por la actividad humana, mejorando así la calidad del agua y reduciendo los riesgos para la salud pública y el medio ambiente.

## FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron ningún patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

## CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Lozano-Chung, A. y Lozano-Carranza, C. M.

Curación de datos: Lozano-Carranza, C. M. y Colichon-Carranza, R. D.

Análisis formal: Lozano-Chung, A.

Investigación: Todos los autores

Metodología: Lozano-Chung, A. y Lozano-Carranza, C. M.

Validación: Lozano-Carranza, C. M. y Colichon-Carranza, R. D.

Redacción - borrador original: Todos los autores

Redacción - revisión y edición: Todos los autores

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Hazmi, H. E., Mohammadi, A., Hejna, A., Majtacz, J., Esmaili, A., Habibzadeh, S., Saeb, M. R., Badawi, M., Lima, E. C., & Mąkinia, J. (2023). Wastewater reuse in agriculture: Prospects and challenges. *Environmental Research*, 236, 116711. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116711>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*, Pub. L. No. R.J. 010-ANA, 92. Ministerio de Agricultura y Riego. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/209>
- Ayme Estacio, M. V., & Ramos Pongo, M. C. (2020). *Eichhornia crassipes, Lemna minor y Pistia stratiotes como sorbentes de plomo, cobre y zinc en el tratamiento de aguas residuales, 2020* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/62605>
- Carreño Sayago, U. F., Gómez-Caicedo, M. I., & Mercado Suárez, Á. L. (2024). Design of a sustainable system for wastewater treatment and generation of biofuels based on the biomass of the aquatic plant *Eichhornia Crassipes*. *Scientific Reports*, 14(1), 11068. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61239-4>
- Ding, T., Fang, L., Chen, J., Ji, J., & Fang, Z. (2023). Exploring the relationship between water-energy-food nexus sustainability and multiple ecosystem services at the urban agglomeration scale. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 184–200. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.028>
- du Plessis, M., Fourie, C., Stone, W., & Engelbrecht, A.-M. (2023). The impact of endocrine disrupting compounds and carcinogens in wastewater: Implications for breast cancer. *Biochimie*, 209, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2023.02.006>
- Gusti Wibowo, Y., Tyaz Nugraha, A., & Rohman, A. (2023). Phytoremediation of several wastewater sources using *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* in Indonesia. *Environmental*

- Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100781.  
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100781>
- Lin, J., Ye, W., Xie, M., Seo, D. H., Luo, J., Wan, Y., & Van der Bruggen, B. (2023). Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(11), 785–803.  
<https://doi.org/10.1038/s43017-023-00489-8>
- Liu, Y., Lu, F., Xian, C., & Ouyang, Z. (2023). Urban development and resource endowments shape natural resource utilization efficiency in Chinese cities. *Journal of Environmental Sciences*, 126, 806–816.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.03.025>
- Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G. (2016). Riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Manisha, M., Verma, K., Ramesh, N., Anirudha, T. P., Santrupt, R. M., Das, R., Mohan Kumar, M. S., Chanakya, H. N., & Rao, L. (2023). Socio-economic impact assessment of large-scale recycling of treated municipal wastewater for indirect groundwater recharge. *Science of The Total Environment*, 859, 160207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160207>
- Medina, F. E., & López, E. (2015). *Determinación de la eficiencia del humedal para el tratamiento de aguas residuales en el barranco del sector cruce de Uchuglla de la ciudad de Moyobamba* [Universidad Nacional de San Martín]. <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/232>
- Mena Ayala, A. (2021). Propiedades del *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua), *Schoenoplectus colifornicus* (Junco), y el *Phragmites australis* (Carricillo). *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(47), 101–108.  
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20656>
- Mishra, S., Kumar, R., & Kumar, M. (2023). Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- Environmental, health, and economic impacts. *Total Environment Research Themes*, 6, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100051>
- Quispe Baldeón, L., Arias Chavez, J. B., Martínez Suarez, C. F., & Cruz Huaranga, M. (2017). Eficiencia de la especie macrófita *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) para la remoción de parámetros físicoquímicos, metal pesado (Pb) y la evaluación de su crecimiento en función al tiempo y adopción al medio en una laguna experimental. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3(1), 79–93. <https://doi.org/10.17162/rictd.v1i1.899>
- Rasool, S., Ahmad, I., Jamal, A., Saeed, M. F., Zakir, A., Abbas, G., Seleiman, M. F., & Caballero-Calvo, A. (2023). Evaluation of Phytoremediation Potential of an Aquatic Macrophyte (*Eichhornia crassipes*) in Wastewater Treatment. *Sustainability*, 15(15), 11533. <https://doi.org/10.3390/su151511533>
- Rojas, L. P., & Suyón, E. P. (2020). *Eficiencia de fitorremediación con Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) para disminuir concentraciones de Arsénico en aguas del centro poblado Cruz del Médano – Morrope* [Universidad de Lambayeque].  
<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6500379?show=full>
- Savelli, E., Mazzoleni, M., Di Baldassarre, G., Cloke, H., & Rusca, M. (2023). Urban water crises driven by elites' unsustainable consumption. *Nature Sustainability*, 6(8), 929–940.  
<https://doi.org/10.1038/s41893-023-01100-0>
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S. R., Konikow, L. F., Long, D., Mekonnen, M., Schmied, H. M., Mukherjee, A.,



- MacDonald, A., Reedy, R. C., Shamsudduha, M., Simmons, C. T., ... Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87–101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>
- Syeed, M. M. M., Hossain, M. S., Karim, M. R., Uddin, M. F., Hasan, M., & Khan, R. H. (2023). Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 18, 100247. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100247>
- UNESCO. (2024). *Las crisis del agua amenazan la paz mundial (informe)*. <https://www.unesco.org/es/articles/las-crisis-del-agua-amenazan-la-paz-mundial-informe>
- van Vliet, M. T. H., Thorslund, J., Strokal, M., Hofstra, N., Flörke, M., Ehalt Macedo, H., Nkwasa, A., Tang, T., Kaushal, S. S., Kumar, R., van Griensven, A., Bouwman, L., & Mosley, L. M. (2023). Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(10), 687–702. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00472-3>
- Zeng, J., Cui, X., Chen, W., & Yao, X. (2023). Impact of urban expansion on the supply-demand balance of ecosystem services: An analysis of prefecture-level cities in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 99, 107003. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107003>