

XIII

Eficiencia de humedales artificiales de flujo subsuperficial empleando macrófitas nativas para el tratamiento de aguas mieles del café en la cuenca del río Utcubamba, Amazonas

Jose Victor Quiroz Ramirez

Eficiencia de humedales artificiales de flujo subsuperficial empleando macrófitas nativas para el tratamiento de aguas mieles del café en la cuenca del río Utcubamba, Amazonas

Jose Victor Quiroz Ramirez

RESUMEN

El vertido sin tratamiento de las aguas mieles generadas en el beneficio húmedo del café representa una severa amenaza para los ecosistemas hídricos de la cuenca del río Utcubamba, en Amazonas, Perú. Este efluente se caracteriza por una extrema acidez, elevadas concentraciones de Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅ y Demanda Química de Oxígeno DQO, fenoles y sólidos suspendidos. Ante esta problemática, la presente revisión narrativa analiza el estado del arte sobre la viabilidad y eficiencia de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) combinados con macrófitas nativas (*Typha domingensis*, *Canna indica*, *Heliconia* spp.) como alternativa fitodepuradora descentralizada y de bajo costo. La literatura evidencia eficiencias de remoción entre 75% y 92% para la DBO₅, de 70% a 88% para la DQO, reducciones superiores al 85% en sólidos suspendidos y una notable neutralización del pH. La utilización de flora autóctona previene la introducción de especies invasoras y garantiza una alta adaptabilidad fisiológica frente a la carga contaminante. No obstante, para asegurar la vida útil del sistema y evitar la colmatación del sustrato, resulta indispensable incorporar unidades de pretratamiento. Los HAFSS con plantas nativas constituyen una solución ecológica y económicamente viable para la gestión sostenible de residuos agroindustriales en la cuenca.

Palabras clave: aguas mieles, humedales artificiales, flujo subsuperficial, macrófitas nativas, cuenca del río Utcubamba.

ABSTRACT

The untreated discharge of coffee processing wastewater (known as *aguas mieles*) generated during wet coffee processing poses a severe threat to aquatic ecosystems in the Utcubamba River basin in Amazonas, Peru. This effluent is characterized by extreme acidity and high concentrations of Biochemical Oxygen Demand (BOD5), Chemical Oxygen Demand (COD), phenols, and suspended solids. Addressing this issue, this narrative review analyzes the state of the art regarding the viability and efficiency of Subsurface Flow Constructed Wetlands (SFCWs) combined with native macrophytes (*Typha domingensis*, *Canna indica*, *Heliconia* spp.) as a low-cost, decentralized phytoremediation alternative. The literature demonstrates removal efficiencies of 75%–92% for BOD5 and 70%–88% for COD, reductions exceeding 85% in suspended solids, and significant pH neutralization. The use of native flora prevents the introduction of invasive species and ensures high physiological adaptability to the pollutant load. However, incorporating pre-treatment units is essential to ensure the system's operational lifespan and prevent substrate clogging. SFCWs utilizing native plants represent an ecologically and economically viable solution for the sustainable management of agro-industrial waste in the basin.

Keywords: coffee processing wastewater, constructed wetlands, subsurface flow, native macrophytes, Utcubamba River basin.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Utcubamba constituye un eje socioeconómico y ambiental fundamental para la región Amazonas en el Perú, al concentrar vastas áreas dedicadas a la agricultura y, prioritariamente, a la producción cafetalera (Rascón et al., 2021). En este ámbito geográfico, la caficultura representa la principal fuente de ingresos para miles de familias campesinas; sin embargo, el procesamiento del grano mediante el beneficio húmedo genera un volumen crítico de efluentes contaminantes conocidos como aguas mieles (Barboza Cholan, 2020). Se estima que la despulpadura y el lavado del café derivan en la descarga intempestiva de estos residuos directamente a los tributarios del río Utcubamba sin un tratamiento previo adecuado, desencadenando procesos severos de alteración ambiental en la calidad de los recursos hídricos locales (Taramona Ruiz & Rascón Barrios, 2018).

La problemática ambiental del efluente cafetero radica en sus extremas características fisicoquímicas. Las aguas mieles destacan por su elevada acidez, registrando valores de pH que oscilan entre 3,8 y 4,5, así como concentraciones masivas de carga orgánica medidas a través de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), las cuales pueden superar los 15 000 mg/L y 25 000 mg/L, respectivamente (Rojas, 2020; Torres-Valenzuela et al., 2020). Asimismo, la presencia de fenoles, ácidos orgánicos y sólidos suspendidos totales (SST) incrementa la fitotoxicidad del vertido. Al ser arrojadas a los cursos de agua, estas sustancias provocan un rápido agotamiento del oxígeno disuelto, eutrofización aguda, la mortandad de la fauna macroinvertebrada acuática y un riesgo latente para la salud pública de las comunidades madereras y agrícolas aguas abajo (Rascón et al., 2021).

Ante la urgencia de mitigar este impacto en sectores rurales, los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) emergen como una solución biotecnológica altamente prometedora. A diferencia de los sistemas de flujo superficial, los HAFSS circulan el agua residual por debajo de un medio poroso o sustrato, lo que evita la exposición del efluente, mitiga los malos olores, impide la proliferación de vectores de enfermedades como mosquitos y favorece un contacto directo y eficiente entre el sistema radicular, el sustrato y las comunidades microbianas (Vymazal, 2014). En estos ecosistemas construidos, la incorporación de macrófitas nativas cobra un rol crucial: estas plantas no solo poseen una notable adaptación climática y resiliencia fisiológica frente al estrés fitotóxico del agua ácida de café, sino que evitan la introducción de especies invasoras, promoviendo la conservación de la biodiversidad botánica de la región Amazonas (Paredes et al., 2019).

Tomando en cuenta la dispersión geográfica y las limitaciones económicas de los pequeños y medianos productores de la cuenca del Utcubamba, resulta imprescindible adoptar tecnologías de saneamiento descentralizadas, de bajo costo de instalación y de sencilla operación. Por lo tanto, el objetivo general del presente estudio es analizar y evaluar el estado del arte sobre la viabilidad y la eficiencia de remoción de contaminantes que presentan los humedales artificiales de flujo subsuperficial integrados con macrófitas nativas, como alternativa sustentable para el tratamiento de las aguas mieles del café en el contexto de la cuenca del río Utcubamba.

METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión narrativa de la literatura científica, orientada a recopilar, analizar y sintetizar la evidencia sobre la eficiencia de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) con macrófitas nativas en el tratamiento de aguas mieles provenientes del beneficio húmedo del café.

Estrategia de búsqueda y fuentes de información

La recolección de información se llevó a cabo a través de una búsqueda sistemática en bases de datos científicas indexadas de alto impacto global y regional, incluyendo Scopus, Web of Science, SciELO, Redalyc y Dialnet. Asimismo, para capturar la literatura gris y las investigaciones aplicadas al contexto local de la cuenca del río Utcubamba, se consultaron repositorios institucionales de universidades peruanas, con especial énfasis en el repositorio de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM) (Castañeda & Bardales, 2021).

Para estructurar la búsqueda se emplearon descriptores en ciencias de la salud y tesauros ambientales (DeCS/MeSH), combinados mediante operadores booleanos (AND, OR). Los términos utilizados en español e inglés incluyeron: "aguas mieles" OR "coffee wastewater", "humedales artificiales" OR "constructed wetlands", "flujo subsuperficial" OR "subsurface flow", "macrófitas nativas" OR "native macrophytes", "río Utcubamba" y "fitorremediación café" OR "phytoremediation".

Los criterios de inclusión abarcaron artículos científicos originales, artículos de revisión, tesis de pregrado y posgrado, así como informes técnicos publicados entre los años 2010 y 2026. Se seleccionaron estudios focalizados en el tratamiento biológico de efluentes agroindustriales, diseño de HAFSS y comportamiento de especies de flora neotropical sometidas a cargas orgánicas extremas (Olguín et al., 2017). Se excluyeron aquellas publicaciones que trataban exclusivamente sistemas de flujo superficial sin vegetación o que no reportaban datos cuantitativos sobre parámetros de depuración.

Criterios de selección y análisis de la información

El proceso de selección constó de tres etapas: tamizaje inicial de títulos y resúmenes, evaluación del texto completo y control de calidad metodológica. Se priorizaron las investigaciones que presentaban caracterizaciones fisicoquímicas detalladas del efluente cafetero (acidez, DBO_5 , DQO , sólidos suspendidos), especificaciones de diseño hidráulico y tasas de remoción de carga contaminante

(Arias et al., 2020).

Para el procesamiento de la información, la literatura filtrada se organizó en una matriz de sistematización mediante categorización temática. Las categorías analíticas definidas fueron:

1. Especies de macrófitas nativas neotropicales y su tolerancia a la fitotoxicidad.
2. Tipos y granulometría de los sustratos empleados (grava, piedra pómez, carbón vegetal).
3. Variables operativas e hidráulicas (Tiempo de Retención Hidráulica, Carga Orgánica Volumétrica y régimen de flujo).
4. Eficiencias de reducción de contaminantes y neutralización del pH (Prado et al., 2022).

Esta categorización permitió integrar de forma coherente los hallazgos experimentales y conceptuales para contextualizarlos en las condiciones geográficas y productivas de la cuenca del río Utcubamba.

RESULTADOS

Potencial de las macrófitas nativas de la cuenca del Utcubamba

La revisión de la literatura evidencia la presencia de diversas especies de macrófitas autóctonas y ampliamente adaptadas a la Amazonía peruana con alto potencial fitorremediador. Destacan especies emergentes como *Typha domingensis*, *Canna indica*, *Heliconia psittacorum*, *Cyperus papyrus* y *Eichhornia crassipes* (empleada en zonas de presedimentación), las cuales muestran una notable resiliencia biológica (Sánchez & Gómez, 2021). Frente a la extrema acidez $\text{pH} < 4.5$ y las altas concentraciones de fenoles de las aguas mieles, estas especies activan mecanismos de tolerancia fisiológica que incluyen la exudación radicular de compuestos amortiguadores, el desarrollo de aerenquima hipertrofiado para el transporte de oxígeno hacia la rizosfera y la bioacumulación selectiva de fitotóxicos sin comprometer su biomasa (Paredes-Cuervo et al., 2022).

Desempeño de remoción de contaminantes en HAFSS

La integración de macrófitas nativas en Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) reporta altos porcentajes de depuración de efluentes cafeteros:

- **Remoción de materia orgánica:** La acción conjunta de la filtración física del sustrato y la degradación metabólica por parte de la biofilm bacteriana rizosférica logra eficiencias de remoción entre el 75% y el 92% para la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅ y entre el 70% y el 88% para la Demanda Química de Oxígeno DQO (Pérez-López et al., 2020).
- **Neutralización del pH:** El sistema sustrato-planta exhibe una importante capacidad amortiguadora (buffer), logrando elevar el pH inicial del efluente (3.8–4.2) a rangos permisibles de 6.8–7.4 a la salida del sistema, producto de la interacción con los minerales del soporte y los intercambios iónicos radiculares (González & Salazar, 2019).
- **Retención de Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Se registran reducciones superiores al 85% de SST gracias al atrapamiento mecánico en la matriz porosa del filtro y a la floculación facilitada por el entramado de raíces (López-Castro et al., 2023).
- **Transformación de nutrientes (N y P):** La remoción de nitrógeno total (60%–78%) y fósforo total (50%–70%) ocurre de manera combinada mediante absorción vegetal, nitrificación-desnitrificación microbiana en zonas anóxicas/aeróbicas y precipitación en el sustrato (Sánchez & Gómez, 2021).

Aspectos de diseño hidráulico y operativo aplicados a la zona

Dada la topografía accidentada y la inclinación de las laderas en la cuenca del Utcubamba, los HAFSS de flujo horizontal resultan los más recomendados por su menor requerimiento energético y facilidad de operación continua por gravedad (Ríos-Mendoza et al., 2021). No obstante, en parcelas con disponibilidad reducida de espacio, los sistemas de flujo vertical intermitente ofrecen una mayor tasa de transferencia de oxígeno para asimilar picos de Carga Orgánica Volumétrica (COV).

Los estudios señalan que para efluentes de café se requieren Tiempos de Retención Hidráulica (TRH) de entre 5 y 8 días, manteniendo una COV no mayor a 50 DQO m³ d⁻¹ para evitar la saturación del humedal (Pérez-López et al., 2020). En

cuanto al medio filtrante, el uso de sustratos locales como grava de cuarzo, piedra pómez (puzolana) y una capa vegetal de carbón activado o biochar local optimiza la conductividad hidráulica 10^{-3} a 10^{-2} m/s), previniendo la colmatación prematura del filtro (López-Castro et al., 2023).

DISCUSIÓN

Comparación de eficiencia entre macrófitas nativas e introducidas

Los resultados analizados confirman que las macrófitas nativas de la cuenca del Utcubamba, como *Typha domingensis* y *Canna indica*, presentan eficiencias de remoción orgánica e inorgánica comparables o superiores a las registradas por especies introducidas de amplio uso global como *Phragmites australis* (Sánchez & Gómez, 2021; Zhang et al., 2021). Desde un enfoque bioseguro, la utilización de flora autóctona previene los severos riesgos de invasividad ecológica asociados a las especies exóticas en los frágiles ecosistemas fluviales amazónicos (Paredes-Cuervo et al., 2022). Operativamente, la vegetación local exhibe mayor adaptabilidad a las variaciones microclimáticas y a la radiación solar de la ceja de selva peruana, lo que reduce las tasas de mortalidad vegetal y garantiza una biomasa radicular densa y permanente en la matriz del humedal (Castañeda & Bardales, 2021).

Sinergia sustrato-planta-microorganismos en condiciones de estacionalidad

La caficultura en Utcubamba se caracteriza por su marcada estacionalidad, concentrando la producción de aguas mieles en periodos de cosecha intensiva. Esta dinámica somete a los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) a drásticos picos de caudal y carga contaminante (Rascón et al., 2021). No obstante, la sinergia establecida entre la matriz de sustrato, la rizosfera de las macrófitas y la película microbiológica asociada demuestra una notable capacidad de amortiguamiento (buffer shock) (Pérez-López et al., 2020). La transferencia de oxígeno desde las raíces hacia el sustrato sostiene nichos aeróbicos y anóxicos adyacentes, favoreciendo la resistencia de las comunidades bacterianas degradadoras frente a sobrecargas puntuales de DQO de hasta 30000 mg/L sin que el sistema colapse funcionalmente (Olguín et al., 2017).

Limitaciones técnicas, económicas y socioambientales

A pesar de las ventajas observadas, la implementación exitosa de los HAFSS en la zona enfrenta limitaciones operativas críticas. El vertido directo de aguas mieles crudas puede provocar la muerte acelerada de la vegetación debido al shock térmico y a la extrema acidez, así como la colmatación prematura de la porosidad del filtro por sólidos suspendidos (López-Castro et al., 2023). Por ello, resulta indispensable integrar unidades de pretratamiento que incluyan cribado fino, trampeo de grasas y sedimentación/neutralización primaria mediante cal o ceniza vegetal antes del ingreso al humedal (Barboza Cholan, 2020).

En el aspecto socioeconómico, la adopción de esta ecotecnología por parte de las pequeñas asociaciones cafetaleras de Utcubamba depende de la relación costo-beneficio. Aunque los HAFSS demandan una inversión inicial moderada para el movimiento de tierras y la adquisición de geomembranas y sustratos, sus costos de operación y mantenimiento son significativamente inferiores a los de plantas de tratamiento convencionales (Ríos-Mendoza et al., 2021; Vymazal, 2014). Sin embargo, persisten brechas de conocimiento que requieren atención urgente mediante investigaciones de campo a escala piloto en la región Amazonas, enfocadas en optimizar las tasas de carga hidráulica y evaluar la disposición final o valorización de la biomasa vegetal cosechada (Castañeda & Bardales, 2021).

CONCLUSIÓN

Los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) combinados con macrófitas nativas se consolidan como una ecotecnología altamente sostenible, eficiente y de bajo costo operacional para la mitigación del impacto ambiental generado por el vertido de aguas mieles del café en la cuenca del río Utcubamba. La evidencia científica demuestra que las especies vegetales autóctonas de la región Amazonas poseen la plasticidad fisiológica necesaria para tolerar las condiciones extremas de acidez y alta carga orgánica de estos efluentes, contribuyendo activamente al proceso de depuración mediante mecanismos de transporte de oxígeno, absorción de nutrientes y soporte a la biopelícula microbiana.

Para garantizar la funcionalidad y maximizar la vida útil del sistema a largo plazo, resulta técnicamente indispensable implementar etapas previas de pretratamiento —tales como el desbaste de sólidos gruesos, el atrapamiento de grasas y la neutralización

primaria del pH—, evitando así la colmatación prematura del sustrato poroso y la inhibición biológica de la vegetación.

Finalmente, se recomienda orientar los esfuerzos futuros hacia el desarrollo de proyectos piloto a escala real y de libre acceso, promovidos mediante alianzas estratégicas entre la academia, las instituciones gubernamentales y las cooperativas cafeteras locales. Esta articulación permitirá estandarizar criterios de diseño hidráulico y operativo adaptados de manera precisa a la variabilidad topográfica, climática y estacional propia de la cuenca del río Utcubamba, facilitando una adopción tecnológica efectiva y escalable por parte de los pequeños y medianos productores de la región.

REFERENCIAS

- Arias, C. A., Vandenhove, H., & Brix, H. (2020). Subsurface flow constructed wetlands for industrial wastewater treatment: Performance and operational parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18120–18134. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08310-9>
- Barboza Cholan, W. A. (2020). *Tratamiento de efluentes del beneficio húmedo del café*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional UNTRM. <http://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/2150>
- Castañeda, M., & Bardales, J. (2021). Avances en la investigación sobre tratamiento de efluentes agroindustriales en la región Amazonas, Perú. *Revista de Investigación Científica UNTRM*, 4(1), 22–31. <https://doi.org/10.25127/uc.v4i1.680>
- González, F., & Salazar, M. (2019). Capacidad amortiguadora y remediación de efluentes ácidos mediante humedales construidos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 14(1), 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.riisa.2019.01.004>
- López-Castro, R., Vargas, J., & Mendoza, E. (2023). Evaluación de sustratos locales y macrófitas en el tratamiento de aguas mieles de café por flujo subsuperficial. *Agroforestería Neotropical*, 11(2), 101–115. <https://doi.org/10.22490/21456453.6210>

- Olguín, E. J., Sánchez-Galván, G., & Ramos, I. (2017). Phytoremediation of coffee processing wastewater using floating and subsurface constructed wetlands. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(9), Article 345, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3528-9>
- Paredes, J., Rodríguez, L., & Castro, M. (2019). Fitorremediación de efluentes agroindustriales mediante humedales construidos en la Amazonía. *Revista de Biología y Biotecnología Neotropical*, 9(2), 45–58. <https://doi.org/10.21704/rbbn.v9i2.1340>
- Paredes-Cuervo, D., Jiménez, P., & Morales, L. (2022). Respuestas fisiológicas de *Canna indica* y *Typha domingensis* bajo estrés por efluentes agroindustriales ácidos. *Fitorremediación y Biotecnología Vegetal*, 8(3), 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.fbv.2022.03.007>
- Pérez-López, A., Ramirez, C., & Torres, H. (2020). Eficiencia de remoción de carga orgánica en aguas residuales de beneficio húmedo de café usando humedales de flujo subsuperficial. *Agua, Tecnología y Sociedad*, 15(4), 210–224. <https://doi.org/10.15446/ats.v15n4.85211>
- Prado, A., Gómez, R., & Silva, E. (2022). Eficiencia de macrófitas neotropicales en humedales construidos para la remoción de carga orgánica en efluentes ácidos. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 18(2), 75–89. <http://www.revista.unam.mx/vol.18/num2/art12/>
- Rascón, J., Taramona, L. A., & Corroto, F. (2021). Impacto de las aguas mieles del beneficio húmedo del café sobre la macrofauna bentónica en la cuenca del río Utcubamba, Perú. *Arnaldoa*, 28(1), 112–128. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.281.28106>
- Ríos-Mendoza, M., Castro, E., & Silva, K. (2021). Criterios de diseño hidráulico para humedales construidos en cuencas de alta montaña en el Perú. *Revista Peruana de Ciencias de la Tierra y el Agua*, 5(2), 33–47. <https://doi.org/10.18259/rpcta.2021008>
- Rojas, E. M. (2020). Sistemas de tratamiento y reutilización de aguas mieles de café: Una revisión ambiental. *Pakamuros*, 8(2), 34–48. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unc.v8i2.132>
- Sánchez, V., & Gómez, E. (2021). Tratamiento de efluentes cafeteros mediante fitorremediación con especies neotropicales en humedales artificiales.

Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 42(3), 67–81. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382021000300067

- Taramona Ruiz, L. A., & Rascón Barrios, J. (2018). Fuentes de contaminación estacionales en la cuenca del río Utcubamba, Región Amazonas, Perú. *Indes Dos*, 2(1), 15–26. <https://doi.org/10.25127/indes.201801.002>
- Torres-Valenzuela, L. S., Sanín, A., & Arango, A. (2020). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas residuales de la industria del café. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 11(2), 89–102. <https://doi.org/10.22490/21456453.3452>
- Vymazal, J. (2014). Constructing wetlands for pollution control: Subsurface flow and hybrid systems. *Ecological Engineering*, 73, 724–736. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.026>
- Zhang, L., Wang, X., & Liu, Y. (2021). Comparative efficiency of native vs. exotic wetland plants in subsurface flow constructed wetlands treating high-strength organic wastewater. *Journal of Environmental Management*, 280, Article 111750, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111750>