Research, Society and Development, v. 14, n. 4, e5114448645, 2025
(CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v14i4.48645

Islas flotantes como fitorremediación de aguas residuales domésticas de la laguna de oxidación de Manabí - Bolívar

Floating islands as phytoremediation for domestic wastewater from the oxidation lagoon in Manabí - Bolívar

Ilhas flutuantes como fitorremediação de águas residuais domésticas da lagoa de oxidação de Manabí - Bolívar

Recibido: 06/04/2025 | Revisado: 15/04/2025 | Aceptado: 16/04/2025 | Publicado: 19/04/2025

Angélica Fallain
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7240-7741
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Ingeniería Ambiental, Ecuador
E-mail: maria.fallain@espam.edu.ec
Mercedes Delgado
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5936-1503
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Ingeniería Ambiental, Ecuador
E-mail: mercedes.delgado@espam.edu.ec
Carlos Banchón
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0388-1988
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Ingeniería Ambiental, Ecuador
E-mail: carlos.banchon@espam.edu.ec

Resumen
El objetivo principal de la presente investigación fue evaluar la eficiencia de remoción de sólidos en aguas residuales del cantón Bolívar mediante islas flotantes con tres especies de plantas: *Dracaena trifasciata*, *Dracaena sanderiana* y *Philodendron cutting*. Para analizar el potencial de cada especie, se realizaron tratamientos de fitorremediación con un tiempo de retención hidráulica de 96 horas. El análisis fisicoquímico de las muestras incluyó pH, turbidez, conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD). Los resultados revelaron que la fitorremediación logró la mayor eficiencia en la remoción de turbidez, con porcentajes de hasta un 99%. En contraste, con Dracaena trifasciata se alcanzó una remoción del 75%. Estos hallazgos destacan el potencial de las islas flotantes como una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas, variando según la especie utilizada.
Palabras clave: Fitorremediación; Contaminación por nutrientes; Aguas residuales domésticas; Plántulas; Islas flotantes.

Abstract
The main objective of this research was to evaluate the removal efficiency of solids in domestic wastewater from the Bolívar canton using floating islands with three plant species: *Dracaena trifasciata*, *Dracaena sanderiana*, and *Philodendron cutting*. To analyze the potential of each species, phytoremediation treatments were carried out with a hydraulic retention time of 96 hours. The physicochemical analysis of the samples included pH, turbidity, electrical conductivity (EC), and total dissolved solids (TDS). The results revealed that phytoremediation achieved the highest efficiency in turbidity removal, with percentages reaching up to 99%. In contrast, *Dracaena trifasciata* achieved a removal rate of 75%. These findings highlight the potential of floating islands as an effective and sustainable solution for the treatment of domestic wastewater, varying according to the species used.
Keywords: Phytoremediation; Nutrient pollution; Domestic sewage; Seedlings; Floating islands.

Resumo
O principal objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência de remoção de sólidos em águas residuais domésticas do cantão Bolívar por meio de ilhas flutuantes com três espécies de plantas: Dracaena trifasciata, Dracaena sanderiana e estacas de Philodendron. Para analisar o potencial de cada espécie, foram realizados tratamentos de fitorremediação com um tempo de retenção hidráulica de 96 horas. A análise físico-química das amostras incluiu pH, turbidez, condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD). Os resultados revelaram que a fitorremediação alcançou a maior eficiência na remoção de turbidez, com percentuais de até 99%. Em contraste, com a Dracaena trifasciata foi alcançada uma remoção de 75%. Esses achados destacam o potencial das ilhas flutuantes como uma solução eficaz e sustentável para o tratamento de águas residuais domésticas, variando de acordo com a espécie utilizada.
Palavras-chave: Fitorremediação; Contaminação por nutrientes; Águas residuais domésticas; Plántulas; Ilhas flutuantes.

1. Introducción

A nivel mundial, aproximadamente 1.000 millones de toneladas de aguas residuales domésticas sin tratar se vierten en aguas subterráneas, ríos, lagos y océanos (Abril *et al*., 2021; Osorio *et al*., 2021; Espinoza *et al*., 2022; Banco Mundial [BIRF], 2020). Entre el 30 y 40% de las descargas sin tratamiento representan una grave amenaza en la biodiversidad causando la extinción de animales, la destrucción de ecosistemas y contaminación de la cadena alimentaria (Ávila y Argueta, 2024; Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], (2016). La gestión inadecuada de las aguas residuales domésticas representa un riesgo significativo para la salud pública, afectando a aproximadamente 1,5 millones de personas a nivel global debido al vertido de efluentes sin tratamiento adecuado. Este problema se atribuye a la presencia de patógenos, bacterias y virus, según lo reportado por diversos estudios (Carrero, 2021; Rowan, 2018; Organización Mundial de la Salud [OMS], 2023; Mora *et al.*, 2020; Gonzales & Chiroles, 2010).

Como aporte para resolver esta problemática ambiental, las islas flotantes, integradas por diversas especies vegetales, aplican principios de remediación mediante combinación óptima de plantas. En este sentido, el presente estudio aporta con el desarrollo de nuevas tecnologías asociadas a las islas flotantes, con el objetivo de establecer una base de referencia para futuras innovaciones en este campo (Hui *et al*., 2021; Wang *et al*., 2024). Las islas flotantes constituyen una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, destacándose por su costo-beneficio, sostenibilidad y adaptabilidad (Comisión Europea [UE], 2020). Un elemento fundamental en el tratamiento convencional de aguas residuales es la aireación, que facilita la descomposición eficiente de la materia orgánica por microorganismos aeróbicos mediante sistemas como difusores de burbujas o aireadores mecánicos (Torres & Lozano, 2017). Sin embargo, las islas flotantes eliminan la necesidad de aireación artificial, ya que las plantas presentes en estas estructuras aportan oxígeno de manera natural, marcando una diferencia con los sistemas tradicionales (Hernández *et al.*, 2022). En este contexto, la fitorremediación, una técnica ecológica basada en el uso de plantas para remover, estabilizar o transformar contaminantes en suelos, agua o aire, promueve la recuperación ambiental (Zitácuaro *et al.*, 2022). Su eficacia depende de la retención hidráulica, definida como el tiempo promedio que un fluido permanece en un humedal o reactor, calculado a partir del volumen del sistema y el caudal de entrada (Quintero, 2021).

Entre las especies empleadas, el bambú de la suerte (*Dracaena sanderiana*), común en regiones tropicales y subtropicales, se distingue por su rápido crecimiento, alta producción de biomasa, facilidad de cultivo y cosecha, así como por su eficiencia económica y tolerancia a metales pesados, lo que lo hace ideal para la fitorremediación (Liang *et al*., 2022). Por su parte, la lengua de suegra (*Dracaena trifasciata*) destaca como purificadora de aire, eliminando hasta un 40% de compuestos orgánicos volátiles y alcanzando un 90% de eficacia en la remediación de suelos (Siebra *et al*., 2022; Aguirre *et al.*, 2023). El *Philodendron cutting* ‘Burle Marx’, caracterizado por sus hojas largas en forma de corazón y color verde brillante, requiere bajo mantenimiento y prospera en ambientes cálidos y húmedos con luz indirecta; sin embargo, no se han documentado antecedentes de su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

Dadas las múltiples ventajas ecológicas de la fitorremediación, como su bajo impacto ambiental, sostenibilidad y capacidad para integrarse en sistemas naturales, el presente estudio plantea la hipótesis de que las plantas utilizadas en islas flotantes reducen sólidos totales y disueltos, así como disminuyen la turbidez, contribuyendo significativamente a optimizar el tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de las lagunas de oxidación del cantón Bolívar. Este enfoque se sustenta en la capacidad comprobada de ciertas especies vegetales para absorber compuestos nitrogenados y fosforados, facilitar la sedimentación de partículas y mejorar la calidad del agua mediante procesos biológicos y físicos. Además, la fitorremediación ofrece una alternativa rentable frente a métodos convencionales que dependen de infraestructura costosa o consumo energético elevado, lo que la hace particularmente viable en contextos rurales como el del cantón Bolívar. En este sentido, el objetivo principal del presente estudio fue evaluar la eficiencia de remoción de sólidos en aguas residuales domésticas mediante el uso de islas flotantes diseñadas con tres especies de plantas seleccionadas por su tolerancia a

condiciones adversas y su potencial fitorremediador, analizando su impacto en la mejora de los parámetros fisicoquímicos del efluente.

2. Metodología

El presente estudio es de naturaleza cualitativo y cuantitativo (Pereira et al., 2018) utilizando estadísticas simples con valores de frecuencia absoluta y relativa (Shitsuka et al., 2014) y con criterios estadísticos (Vieira, 2021). Se recolectaron muestras compuestas de aguas residuales domésticas desde la descarga de una laguna de oxidación ubicada en la parroquia Calceta, provincia de Manabí, Ecuador, durante el período comprendido entre agosto y diciembre de 2024 (Figura 1). Esta laguna, diseñada para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, opera con un caudal de ingreso promedio de 173 L/s y un tiempo de retención hidráulica estimado en 15 días, lo que permite la degradación de la materia orgánica mediante procesos biológicos aeróbicos y anaeróbicos. Una vez tratadas, el efluente es descargado a un cuerpo de agua superficial receptor, cuya calidad depende directamente de la eficiencia del sistema de tratamiento. El punto de muestreo, situado en las coordenadas UTM, de la zona 17M, con referencias 9907024 m S y 591742 m E fue seleccionado estratégicamente en la salida de la laguna para evaluar las características físico-químicas y microbiológicas del efluente tratado, permitiendo así determinar su conformidad con los estándares ambientales locales y su impacto potencial en el ecosistema acuático receptor.

Figura 1 - Punto de muestreo de la laguna de oxidación (Parroquia Calceta, Cantón Bolívar, Prov. Manabí-Ecuador).

Fuente: Autores.

2.1 Caracterización

Se caracterizaron parámetros físico-químicos del efluente residual antes y después de los tratamientos aplicados. Para la determinación de sólidos totales (ST), se empleó el método gravimétrico descrito en la norma SM 2540. La turbidez se analizó mediante el método nefelométrico (SM 2130 B), mientras que el pH se midió por el método potenciométrico (SM 4500-H^+). La conductividad eléctrica (CE) se evaluó conforme al método SM2510, y los sólidos totales disueltos (STD) se determinaron utilizando el método SM 2540C (American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation [APHA, AWWA y WEF], 2022). Las muestras de agua residual se recolectaron siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma 2176 (Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN], 2013). Su transporte se realizó conforme a él (Instituto Ecuatoriano de normalización [INEN], 2013) en su norma 2169, que establece las técnicas y precauciones generales que se deben tomar para conservar y transportar todo tipo de muestras de agua. Se utilizó la siguiente

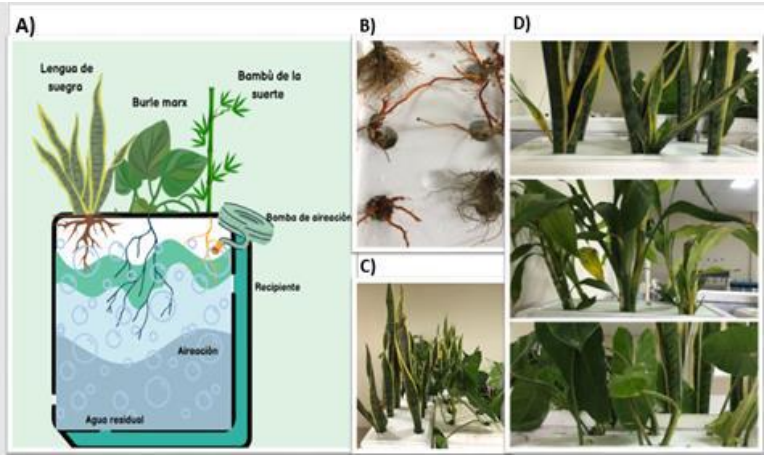
Ecuación (1) para determinar la eficiencia de remoción (%E) de contaminantes antes (Co) y después (Cf) de los tratamientos para evaluar el desempeño de los procesos de depuración (Betancurt *et al*., 2022):

$$\%E = \left(\frac{Co - Cf}{Co}\right) * 100 \qquad (1)$$

2.2 Fitorremediación con islas flotantes

Las islas flotantes, diseñadas para sostener plantas acuáticas y microorganismos como herramienta de fitorremediación en cuerpos de agua residual, se construyeron siguiendo modelos propuestos por Hernández *et al*. (2024) y Lu *et al.* (2015), como se ilustra en la Figura 2. La estructura base, de dimensiones 55 × 36 cm, se elaboró con espuma flex, un material ligero y resistente que aporta flotabilidad. Esta estructura incorpora perforaciones en su tapa para alojar las plantas, permitiendo que las raíces queden en contacto directo con el agua residual contenida en contenedores de espuma flex de 20 litros, sellados tras su llenado (Figura 2).

Figura 2 - Disposición de la 'Isla flotante'. Donde, (A) Isla con tres especies vegetales y sistema de oxigenación; (B) Vista aérea de una tapa de la unidad, mostrando las raíces en contacto con agua residual; (C) Vista lateral de la distribución de las plantas; (D) Vista frontal de las islas flotantes.



Fuente: Autores.

Para la vegetación, se seleccionaron tres especies con capacidad fitorremediadora, recolectadas en Bahía de Caráquez, Ecuador, una región de bosque seco tropical, según la clasificación de Holdridge, con un clima tropical influenciado por las variaciones del Océano Pacífico y el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (Aveiga *et al*., 2022). Las especies seleccionadas fueron *Dracaena trifasciata* (lengua de suegra), *Dracaena sanderiana* (bambú de la suerte) y *Philodendron cutting* 'Burle Marx' (Figura 3). Además, se oxigenó el agua durante 96 horas mediante una bomba sumergible de 0,10 hp, promoviendo la aireación del medio.

Figura 3 - Tipos de plantas utilizados en las islas flotantes. Donde, (A) *Dracaena trifasciata*, (B) *Dracaena sanderiana* y (C) *Philodendron cutting.*

Fuente: Autores.

El diseño experimental empleado fue un diseño factorial completamente aleatorizado (DFCA) 2 × 3, con dos factores, seis tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento (Tabla 1). Los factores evaluados fueron: (1) tipo de planta, con tres niveles (*Dracaena trifasciata* [lengua de suegra], *Dracaena sanderiana* [bambú de la suerte] y *Philodendron cutting* 'Burle Marx'), y (2) modo de aireación, con dos niveles (con aireación y sin aireación). Este diseño permitió analizar los efectos principales de ambos factores y sus interacciones sobre las variables de estudio, garantizando la aleatorización para minimizar sesgos experimentales. La presente investigación de campo y de laboratorio fue de carácter cuantitativo (Pereira *et al*., 2018) utilizando estadística descriptiva utilizando frecuencias absolutas y frecuencias porcentuales relativas (Shitsuka *et al*., 2014) y utilizando análisis estadístico (Vieira, 2021).

Tabla 1 - Diseño factorial.

Trat.	**A (Tipo de planta)**	**B (Aireación)**
T1	A1 (*D. trifasciata*)	B1 (Con aireación)
T2	A1 (*D. trifasciata*)	B2 (Sin aireación)
T3	A2 (*D. sanderiana*)	B1 (Con aireación)
T4	A2 (*D. sanderiana*)	B2 (Sin aireación)
T5	A3 (*P. cutting*)	B1 (Con aireación)
T6	A3 (*P. cutting*)	B2 (Sin aireación)

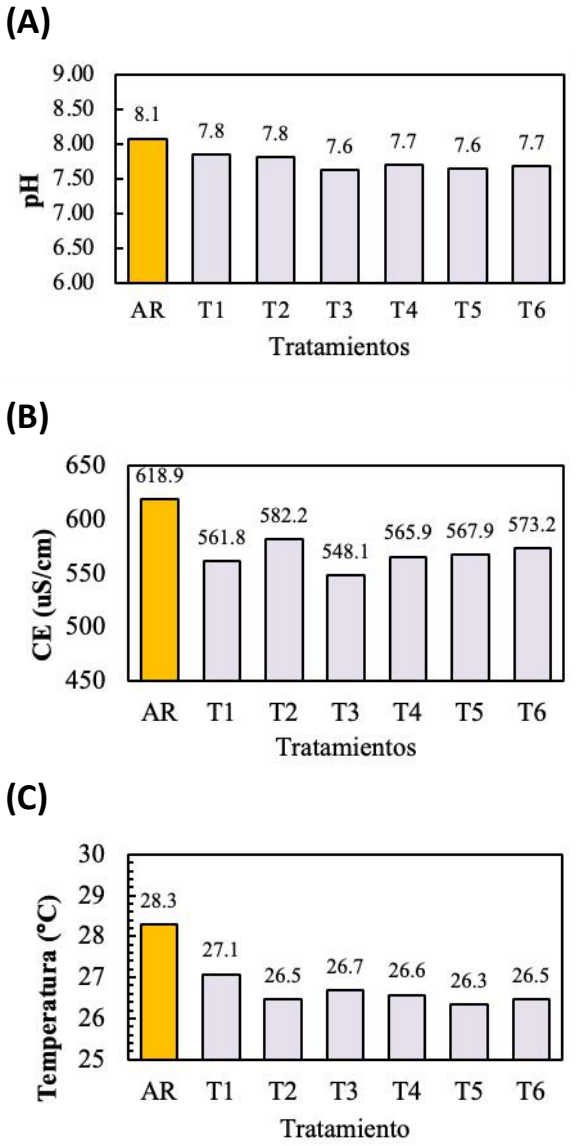
Fuente: Elaboración propia

3. Resultados y Discusión

3.1 Caracterización de los Parámetros fisicoquímicos antes y después

En la Figura 4 se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos antes y después de los tratamientos. Según estos resultados, el agua residual al inicio del monitoreo registró los valores más altos en todas las variables, lo que indica una reducción en las concentraciones de los parámetros evaluados.

Figura 4 - Medición de (A) pH, (B) EC y (C) temperatura antes (AR) y después de la fitorremediación (T1-T6).



Fuente: Autores.

El agua residual presentó un pH de 8,1 al momento de la toma de muestra. Tras la aplicación de los tratamientos, los valores de pH medidos a las 96 horas oscilaron entre 7,6 y 7,8, evidenciando una disminución respecto al valor inicial. El tratamiento T3 (Bambú + aireación) registró el pH más bajo (7,6), mientras que los tratamientos T1 (Lengua de suegra + aireación) y T2 (Lengua de suegra + sin aireación) presentaron el valor más alto (7,8). De acuerdo con la normativa ambiental (Texto unificado de legislaciòn secundaria del medio ambiente [TULSMA], 2015), que establece un rango permisible de pH entre 6 y 9, tanto el agua residual inicial como las muestras tratadas se mantuvieron dentro de los límites establecidos, lo que sugiere que los procesos implementados no generaron condiciones de acidez o alcalinidad extremas en el efluente tratado.

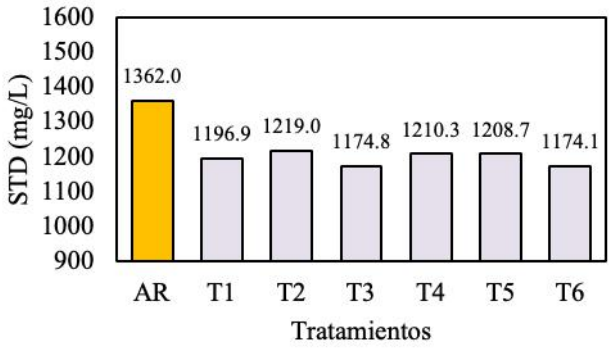
La CE del agua residual inicial registró un valor de 618,9 µS/cm. Tras la aplicación de los tratamientos, el valor más bajo de CE se obtuvo en el tratamiento T3 (Bambú + aireación) con una reducción del 11,4%, mientras que el valor más alto alcanzado fue de 582,2 µS/cm con una reducción del 5,9% para T2 (Lengua de suegra + sin aireación). En términos generales, todos los tratamientos evaluados redujeron la CE en comparación con el agua residual sin tratar. Cabe destacar que la CE no se encuentra establecida como un parámetro con un límite máximo permisible sujeto a regulación según la normativa ambiental vigente.

En relación con la temperatura, el agua residual presentó un valor promedio de 28,3 °C durante un período de 96 horas. Al finalizar las 96 horas de tratamiento, la temperatura más baja registrada dentro de las islas flotantes fue de 26,3 °C, correspondiente al tratamiento T5 (Burle Marx + aireación). Esto representó una reducción del 7,0 % en la temperatura con respecto al valor inicial. Los resultados indican que los tratamientos contribuyeron a la disminución del pH, la CE y la temperatura, en comparación con el control.

En relación con los STD (Figura 5), los tratamientos con lengua de suegra mostraron una reducción significativa: T1 (con aireación) registró 1196,9 mg/L, equivalente a una disminución del 12%, mientras que T2 (sin aireación) alcanzó 1209,0 mg/L, con una reducción del 11% respecto al valor inicial. El tratamiento T3 (Bambú con aireación) exhibió 1174,8 mg/L, reflejando una reducción del 13,7%, la más alta observada. En contraste, T4 (Bambú sin aireación) presentó 1210,3 mg/L, con una disminución del 11%.

Para Burle marx, T5 (con aireación) registró 1208,7 mg/L, lo que supone una reducción del 11,2%, mientras que T6 (sin aireación) alcanzó 1174,1 mg/L, equivalente a una disminución del 13,7%, igualando la eficacia de T3. Los resultados evidencian una reducción de los STD, destacando los tratamientos T3 (bambú con aireación) y T6 (Burle marx sin aireación) por alcanzar la mayor disminución (13,7%) respecto al valor inicial.

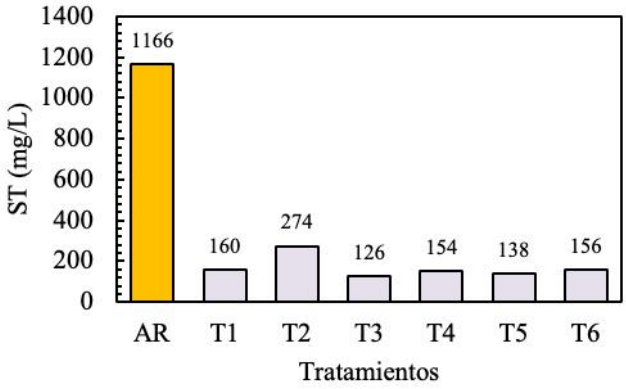
Figura 5 - STD del agua residual (AR) y tratamientos T1-T6.



Fuente: Autores.

En cuanto a los ST, el tratamiento T1 redujo su concentración de 1166 mg/L a 160 mg/L, logrando una disminución del 86% respecto al valor inicial. En T2 (sin aireación), la reducción fue del 76%. El tratamiento T3 alcanzó una disminución del 89%, el valor más alto observado, mientras que T4 registró un 86,7%. Para Burle marx, T5 redujo los ST en un 88,1%, y T6 en un 86,6%. Estos resultados demuestran la alta eficacia de los tratamientos en la remoción de ST, destacando T3 como el más efectivo, probablemente potenciado por la aireación.

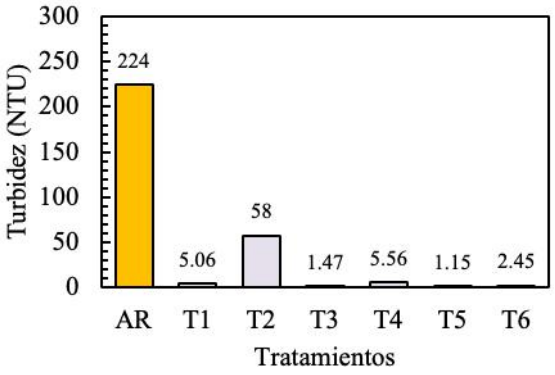
Figura 6 - ST del agua residual (AR) y tratamientos T1-T6.



Fuente: Autores.

Respecto a la turbidez, los tratamientos T3 (Bambú con aireación) y T5 (Burle marx con aireación) lograron las mayores remociones, alcanzando 99,3% y 99,4%, respectivamente, lo que sugiere que la aireación potencia significativamente la capacidad de estas especies. Asimismo, T6 (Burle marx sin aireación) registró una remoción del 98,9%, indicando una alta eficiencia incluso en ausencia de oxigenación suplementaria. En contraste, lengua de suegra sin aireación mostró la menor remoción (74,1%), aunque sigue evidenciando el potencial fitorremediador de las especies evaluadas. Comparativamente, el agua residual sin intervención vegetal, bajo condiciones anaerobias, solo redujo la turbidez entre un 30% y 40%, destacando la contribución crítica de las plantas en este proceso, probablemente mediada por la actividad radicular y la adsorción de partículas en suspensión.

Figura 7 - Resultados de Turbidez.



Fuente: Autores.

Es notable que el agua residual presentó inicialmente una alta turbidez (224 NTU), un color negro intenso y un fuerte olor fecal característico. Sin embargo, tras aplicar los tratamientos, se observó una transformación significativa en sus propiedades organolépticas: el color cambió de negro a marrón y el olor fecal se redujo notablemente hasta prácticamente imperceptible en la mayoría de los tratamientos, salvo en T2 (lengua de suegra sin aireación), donde no se detectaron cambios visuales evidentes.

A las 96 horas de tratamiento, el agua alcanzó una claridad progresiva, adquiriendo una apariencia transparente, lo que indica una mejora sustancial en su calidad, probablemente asociada a la remoción de materia orgánica y partículas en suspensión por las especies vegetales empleadas.

Los resultados del análisis estadístico para evaluar diferencias entre tratamientos y el testigo se presentan en la Tabla 2. debido a un tamaño muestral inferior a 30 datos por tratamiento, se emplearon métodos no paramétricos, cuya idoneidad se confirmó con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Luzuriaga et al., 2023). Esta prueba, que mide la discrepancia entre la distribución observada y la esperada bajo normalidad, arrojó valores de $p < 0,05$ para todos los parámetros (Tabla 2), evidenciando una distribución no normal y justificando el uso de estadística no paramétrica (Flores y Flores, 2021).

Posteriormente, la prueba de Kruskal-Wallis reveló diferencias significativas en STD ($p = 0,00767$), CE ($p = 0,0344$), turbidez ($p = 0,002769$) y ST ($p = 0,002769$), mientras que pH ($p = 0,1652$) y temperatura ($p = 0,2878$) no mostraron variaciones estadísticamente relevantes. Los presentes hallazgos indican que los tratamientos con plantas y regímenes de aireación impactaron significativamente STD, CE, turbidez y ST, sin alterar sustancialmente pH ni temperatura.

Tabla 2 - Prueba de Kruskal-Wallis para los parámetros físico-químicos del tratamiento de agua.

Parámetro	**Estadísticos**			
	SW p-valor	**Chi-cuadrado**	**Gl**	**KW p-valor**
pH	0.003086	9.1524	6	0.1652 NS
STD	0.0004607	17.481	6	0.00767 *
CE	0.0008762	13.603	6	0.0344 *
Turbidez	0.0000008	20	6	0.002769 *
ST	0.0000003	20	6	0.002769 *
Temperatura	0.0000034	7.3725	6	0.2878 NS

Fuente: Elaboración propia

Los resultados presentados en la Tabla 3, que describen los rasgos funcionales de las plantas tras 96 horas de tratamiento, revelan diferencias marcadas en la supervivencia y el desempeño fisiológico. *D. trifasciata* (P1, "lengua de suegra") y *D. sanderiana* (P2, "bambú") exhibieron un 100% de supervivencia, mientras que *Philodendron* Burle Marx (P3) registró un 0%, lo que concuerda con tasas de supervivencia variables (0-100%) reportadas en plantas expuestas a contaminantes (Zia *et al*., 2021). Debido a la acumulación de sustancias nocivas, estas especies requieren manejo como residuos especiales en rellenos sanitarios, según González *et al*. (2015).

El crecimiento radicular post-tratamiento con aguas residuales mostró incrementos de 10% en P1, 50% en P2 y 80% en P3, sugiriendo que, a pesar de la nula supervivencia de P3, su sistema radicular respondió al estímulo de nutrientes antes de colapsar. Este crecimiento se atribuye a la adsorción de nutrientes disueltos, un proceso que favorece la purificación del agua al reducir los STD en un 13,7% con *Philodendron* (Singh *et al*., 2017; Kurniawati *et al*., 2023). La mejora en rasgos funcionales como área foliar, altura y biomasa en P2 y P3 indica una remoción eficiente de contaminantes mediante la actividad radicular, un hallazgo novedoso frente a la literatura existente.

Tabla 3 - Rasgos funcionales de las tres especies de plantas en función de los tratamientos de fitorremediación.

Parámetro	**Tipos de plantas**		
	P1	P2	P3
Porcentaje de sobrevivencia	100 %	100 %	0 %
Incremento de longitud de raíces	10 %	50 %	80 %
Incremento de altura de plantas	0 %	0 %	0 %

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros físico-químicos del agua tratada muestran una reducción significativa ($p < 0,05$) en sólidos totales, suspendidos, disueltos y turbidez, en línea con Mendoza et al. (2018). El pH se mantuvo estable entre 7,6 y 7,8, sin diferencias significativas entre tratamientos (Kruskal-Wallis, $p > 0,05$), lo que sugiere un efecto tampón relacionado con la adsorción de sales, corroborado por la disminución de STD (Barco y Borin, 2020). Sin embargo, Baustista *et al*. (2023) reportan que *Dracaena sanderiana* puede inducir alcalinización, un efecto no observado aquí, posiblemente debido a condiciones específicas del sustrato.

En tratamientos con *Dracaena sanderiana*, se detectó acumulación de microorganismos anaerobios y aerobios que facilitan la transformación de nitrógeno (N) y fósforo (P) mediante nitrificación, desnitrificación y adsorción (Yao et al., 2011; Faulwetter *et al*., 2011). Los tratamientos T1 (Dracaena trifasciata + aireación) y T2 (sin aireación) mantuvieron un pH de 7,8 y una CE entre 561,8 y 582,2 µS/cm, mientras que T3 y T4 (*D. sanderiana*) alcanzaron reducciones de turbidez de 99,3% y 97,5%, respectivamente. Estos valores superan las eficiencias de 89-99,7% reportadas por Nast et al. (2022) en estudios con bambú ornamental, destacando su potencial en aguas residuales domésticas. En comparación, el tratamiento con *Pistia stratiotes* y luz LED mostró un pH de 7-9 y CE de 730-1375 µS/cm, influido por mayor actividad microbiológica (Kilian *et al*., 2020).

La idoneidad de *Dracaena* para la fitorremediación radica en sus características: no comestibles, tropicales, perennes, con raíces fibrosas, alta tasa de crecimiento y adaptabilidad a condiciones de luz variables (Saiyood *et al*., 2010). Estos resultados subrayan su eficacia en la remoción de contaminantes y la estabilización de parámetros físico-químicos, aportando evidencia original sobre su aplicación en sistemas de tratamiento sostenible.

4. Conclusiones

El presente estudio demuestra que la fitorremediación con islas flotantes es una estrategia sostenible para tratar aguas residuales domésticas en las lagunas de oxidación del cantón Bolívar, mejorando significativamente la calidad del agua mediante la reducción de ST, STD y turbidez. El tratamiento con bambú destacó en la remoción de ST, mientras que el de *Philodendron* Burle marx sobresalió en disminuir la turbidez, evidenciando la influencia de la especie vegetal en la eficiencia del proceso. Además, la estabilización de parámetros como pH, CE y temperatura subraya el potencial de esta técnica para optimizar efluentes en contextos rurales de bajo costo. La inclusión de *Dracaena trifasciata* (lengua de suegra), no reportada previamente, aporta originalidad al presente estudio. Futuras investigaciones podrían explorar combinaciones de especies y su desempeño a largo plazo, consolidando esta solución ecológica para comunidades con acceso limitado a tecnologías convencionales.

Referencias

Abril, R., Armas, P., Chamorro, W., Toscano, V., & Sucoshañay, D. (2021). Calidad de agua del río Puyo y afluentes, Pastaza, Ecuador. Tecnología y ciencias del agua, 12(3), 379-417. https://doi.org/ 10.24850/j-tyca-2021-03-10

Argota Pérez, G., & Lannacone, J. (2020). Sistema De Tratamiento Mineral Pasivo Ante El Costo Ambiental Sostenible Estimado En La Laguna De Oxidación Angostura Limón, Ica, Perú, 17(1). https://doi.org/10.31381/biotempo.v17i1.2998

Aguirre, E., Lizárraga, L., Coronel, C., Tavizon, J., & Vázquez, G. (2023). Evaluación de una paleta vegetal apta para el tratamiento de aguas grises ligeras en soluciones basadas en la naturaleza. Ingeniería del agua, 27 (3),183–196. https://doi.org/10.4995/ia.2023.19554

Alaboudi K., Berhan A., & Graham B. (2018). Fitorremediación de suelos contaminados con Pb y Cd mediante el uso de la planta de girasol (Helianthus annuus). Ciencias Agrícolas, 63(1), 123–27. https://doi. org/10.1016/j.aoas.2018.05.007

Alcántara, N. (2023). Las plantas: Tecnología para solucionar el gran problema de contaminación por arsénico. Revista de divulgación científica Ibio, 5(1). http://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/118

American Public Health Association, American Water Works Association, y Water Environment Federation. (2022). Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (24ª ed.). APHA Press. https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.082

American Public Health Association, American Water Works Association, y Water Environment Federation. (2022). Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (24ª ed.). APHA Press. https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.082

Argüelles, V., Burgos, R., & Palacios, R. (2021). Etapas del método estadístico. Ciencia Huasteca Boletín Científico De La Escuela Superior De Huejutla, 9(17), 35-36. https://doi.org/10.29057/esh.v9i17.6703

Argota Pérez, G., & Lannacone, J. (2020). Sistema De Tratamiento Mineral Pasivo Ante El Costo Ambiental Sostenible Estimado En La Laguna De Oxidación Angostura Limón, Ica, Perú, 17(1). https://doi.org/10.31381/biotempo.v17i1.2998

Ávila, A., & Argueta, D. (2024). El cambio climático y los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Ciencia Latina, 8(1). https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.10420

Aveiga, A., Pinargote C., Peñarrieta F., Teca J., & Alcántara F. 2022. Adsorption of Mercury and Zinc in Agricultural Soils by Sphagneticola trilobata. Journal of Ecological Engineering, 23(3), 23035. https://doi.org/10.12911/22998993/146115

American Public Health Association, American Water Works Association, y Water Environment Federation. (2022). Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (24ª ed.). APHA Press.https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.082

Aveiga, A., Pinargote C., Peñarrieta F., Teca J., & Alcántara F. 2022. Adsorption of Mercury and Zinc in Agricultural Soils by Sphagneticola trilobata. Journal of Ecological Engineering, 23(3), 23035. https://doi.org/10.12911/22998993/146115

Banco Mundial [BIRF]. (2020). El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, Banco Mundial. World Bank. https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank

Barco, A., & Borin, M. (2020). Treatment performances of floating wetlands: A decade of studies in North Italy. Ecological Engineering, 158, 106016. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106016

Bautista, M., Rodríguez, A., Castañeda, E., González, R., & Escalante, J. (2023). Tratamiento de aguas grises para viviendas de interés social popular. Boletín científico de ciencias básicas e ingenierías, 11(3), 151-156. https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11509

Betancurt, H., Lapo, B., & Ayala, J. (2022). Evaluación de la obtención de carbón activado a partir de lodos de depuradoras de aguas residuales de la comunidad de Valencia. Facultad de ingeniería, 43(43), 137-158. https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n43.5959

Bermúdez, A., Ramos, M., & Rojas, T. (2018). Contaminación odorífera: Causas, efectos y posibles soluciones a una contaminación invisible. Innovación y ciencia, 25(1). https://innovacionyciencia.com/revista/95

Bustos, A., Caicedo, D., & Cantor, F. (2008). ANDEVA para Diseño Completamente al Azar (DCA). Revista Facultad de Ciencias Básicas,4(1)1-2. https://doi.org/10.18359/rfcb.2240

Cañete, C. (2019). Importancia del control y monitoreo de la calidad del agua del río Paraguay para el desarrollo y defensa nacional. Scielo, 10(1). https://doi.org/10.18004/rcfacen.2019.10.1.17

Castillo, N., Naranjo, C., & Rosero, J. (2023). Política pública ambiental enfocada en el crecimiento económico sostenible en Ecuador.Dialnet,7(12). https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9227645

Cazorla, R., Zambrano, O., López, C., & Ríos, A. (2021). Tratamiento biológico de aguas residuales como un proyecto de emprendimiento comunitario del Tejar Balvanera. Dominio De Las Ciencias, 7(4), 1724–1743. https://doi.org/10.23857/dc.v7i4.2197

Comisión económica para América Latina y el Caribe CEPAL. (2016). Daño y pérdida de la biodiversidad. https://www.cepal.org/es/temas/biodiversidad/perdida-biodiversidad

Comisión Europea (2020). Las islas flotantes para vivir y trabajar. Cordis. https://doi.org/10.3030/774253

Conde, T., & Domínguez Reyes, J. (2021). Evaluación de la eficiencia coagulante-floculante de la cáscara de cacao (CCN-51) y yuca (Manihot esculenta) en agua superficial: Río Tenguel. http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/57968

Cusiche, L., & Miranda, G. (2020). Contaminación por aguas residuales e indicadores de la calidad en la nacional Lago Junín Perú. Scielo, 10(6). https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1870

Casimiro, E., Chung, B., & Cárdenas, D. (2023). Monitoreo de aguas residuales y evaluación del cumplimiento de Valores Máximos Admisibles (VMA) en colectores primarios del área de drenaje de una planta de tratamiento. Yotantsipanko, 2(1), 19-36. https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v3i1.27

Dewtisari, W. F., & Bungan, N. T. (2024). Reseña química y etnofarmacología de Dracaena tarifas. vol.16(Nº2). https://doi.org/10.13057/nusbiosci/n160203

Espinoza, k., Pozo, W., Macas, V., & Sánchez, J. (2022). Situación actual del Río Jubones en el Ecuador, un análisis de los metales traza, calidad y parámetros fisicoquímicos del agua. Revista Científica Arbitrada multidisciplinaria Pentaciencias, 4(2), 292-307. https://www.editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/106

Faulwetter, J. L., Burr, M. D., Cunningham, A. B., Stewart, F. M., Camper, A. K., & Stein, O. R. (2011). Floating treatment wetlands for domestic wastewater treatment. Water Science and Technology, 64(10), 2089–2095. https://doi.org/10.2166/wst.2011.576

Flores, K., & Flores, C. (2021). Pruebas Para Comprobar La Normalidad De Datos En Procesos Productivos: Andersondarling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk Y Kolmogórov-Smirnov. Societas, 23(2). http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/341/3412237018/index.html

Fonseca, K., Depablos, J., Espitia, E., Campaña, E., & Granell, E. (2020). Phytoremediation of arsenic-contaminated waters by artificial floating island: literature review. Facultad de Agronomía, 38(1), 199-215. https://doi.org/10.47280/revfacagron(luz).v38.n1.010

González, I., Maine, A., Cazenave, J., Sanchez, G., & Benavides, M. (2015). Respuestas fisiológicas y bioquímicas de Eichhornia crassipes expuestas a Cr. Environ. Sci. Pollut, 22, 3739–3747. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3558-4

Hui,Y., Ying, Z., & Jiaqi Z. (2021). Tecnología de islas flotantes artificiales. Medio Ambiente Tierra. Ciencia. https://doi.org/10.1088/17551315/702/1/012044

Ho, L., Huynh, B., y Bui, T. (2021). Acumulación y distribución de plomo (Pb) en diferentes tejidos de plantas de bambú de la suerte (Dracaena sanderiana). 20(3). https://doi.org/10.52997/jad.7.03.2021

Hernández, L., Romo,C., Alvarado, A., Prieto, F., Camacho, C. & Acevedo, O,. (2024). Islas flotantes artificiales para la eliminación de nutrientes y mejora de la calidad de las aguas residuales urbanas. Water, (16)1443.https://doi.org/10.3390/w16101443

Hernández, A., Prieto, F., Prieto, J., Otazo, M., & Alvarado, A. (2022). Evaluación de macrófitas flotantes para el tratamiento de un agua residual sintética en humedales artificiales. Tendencias En energías Renovables y Sustentabilidad, 1(1), 125–129. https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.131

Ibarra, A., Fragoso, P., Villegos, F., & Rodríguez, D. (2021). Efecto del uso de aguas residuales urbanas sobre el rendimiento y la calidad microbiológica del pimentón (Capsicum annun L.) cultivado en hidroponía. Scielo, 32(6). http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000600093

Kilian, S., Bawiec, A. & Pawęska, K. (2020). Islas flotantes respaldadas por iluminación LED: ¿Una solución ecológica para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales municipales?. Water Air Soil Pollut 233-356. https://doi.org/10.1007/s11270-022-05821-4

Kurniawati, S., Ulfah, M., Nurwahyunani, A. & Hayat, MS (2023). Planta de bambú acuático (Equisetum hyemale) como agente fitorremediador de los desechos de la contaminación del agua. Biological Environment and Pollution , 3 (2), 76–82. https://doi.org/10.31763/bioenvipo.v3i2.687

Mendoza, Y., Pérez, I., & Galindo,. A. (2018) Evaluación de la contribución de las plantas acuáticas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en el tratamiento de aguas residuales municipales. Technol, 29, 205–214. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000200020

Nast, M., Colares, G., & Machado. (2022). Tratamiento de aguas residuales utilizando bambúes en humedales construidos: experiencias y perspectivas futuras. Environ Sci Pollut 29, 67641–67658. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22304-5

Norma Técnica Ecuatoriana: INEN 2 169: 98. calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras.

Norma Técnica Ecuatoriana: INEN 2 176: 98. calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo.
https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.012

Pereira A S et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [libro electrónico gratuito]. Santa María/RS. Ed. UAB/NTE/UFSM

Liang, Z., Kovács, G., Gyuricza, C., & Neményi, A. (2022). Uso potencial del bambú en la fitorremediación de metales pesados: una revisión. Acta agraria debreceniensis, 1, 91-97. https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/10311

López Torres, M., Espinosa Lloréns, C., Ortega Peña, N., & Hurtado Mola, I. (2022, Julio 15). Línea base del comportamiento de las descargas de aguas residuales en la empresa. 53(2), Ciencias Químicas. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2221-24422022000200157&script=sci_arttext&tlng=en

Luzuriaga, Espinoza, Haro, & Ortiz. (2023). Histograma y distribución normal: Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov aplicado en SPSS. Latinoamericana de las ciencias sociales y humanidades, 4(4), 596. https://doi.org/10.56712/latam.v4i4.1242

Lu, H.-L., Ku, C.-R., & Chang, Y.-H. (2015). Water quality improvement with artificial floating islands. Ec. Eng., 74, 371–375. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.11.013

Texto Unificado de Legislación secundaria del medio ambiente TULSMA, 2015. Anexo 1, tabla 9. Lìmites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Torres, A., & Lozano, E. (2017). Disminución de sólidos de aguas grises mediante un proceso de aireación. Revista Ra Ximhai , 13(3 Especial), 393–404. https://doi.org/10.35197/rx.13.03.2017.23.gt

Romellón, M., Cocoletzi, E., & López, G. (2023). Tratamiento de aguas residuales domésticas de una institución educativa por un sistema de humedales artificiales en serie. Universita Ciencia, 11(20), 147–162. https://doi.org/10.5281/zenodo.7843244

Saiyood, S., Vangnai, A. S., Thiravetyan, P., & Inthorn, D. (2010). Bisphenol A removal by the Dracaena plant and the role of plant-associating bacteria. Journal of Hazardous Materials, 178(1-3), 777–785. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.02.008

Shitsuka, R. et al. (2014). Matemática fundamental para la tecnología. 2ed. Editora Érica.

Singh, R., Birru, R. & Sibi, G. (2017) Eficiencias de eliminación de nutrientes de Chlorella vulgaris de aguas residuales urbanas para reducir la eutrofización. Journal of Environmental Protection , 8 , 1-11. doi: 10.4236/jep.2017.81001

Torres, K., Lara, R., & León, M. (2023). Evaluación del proceso de efluentes en refinería Esmeraldas a partir del tratamiento secundario frente al proceso de oxidación húmeda avanzada. Americana de estudios de ingeniería y tecnología, 3(1). https://doi.org/10.56183/iberotecs.v3i1.595

Yao, F., Sun, J., Tang, C., & Ni, W. (2011). Kinetics of ammonium, nitrate and phosphate uptake by candidate plants used in constructed wetlands. Procedia Environmental Sciences, 10, 1854-1861. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.290

Vieira, S. (2021). Introducción a la bioestadística. Ed.GEN/Guanabara Koogan.

Wang, Y., Peng, J., Bogireddy, C., Rattan, B. & Tan, M. (2023). Islas artificiales en el desarrollo moderno: construcción, aplicaciones y desafíos ambientales. Marine Georesources y Geotechnology , 42 (12), 1896–1906. https://doi.org/10.1080/1064119X.2023.2295034

Wibowo, Y., Tiaz, A., & Rohman, A. (2023). Fitorremediación de varias fuentes de aguas residuales utilizando Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en Indonesia. Reseachgeat. http://dx.doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100781

Quintero, L., Molano, A., & Pramparo, L. (2021). Diseño hidráulico y evaluación a escala laboratorio de un sistema RBC (Rotating Biological Contactor) para tanque primario de aguas residuales. Scielo, 29(2), 324-333. http://dx.doi.org/10.4067/S0718330520210002003 24

Zia, R., Muhammad, N., Muhammad, S., Sughra, H., & Asma, I.(2021). Supervivencia de las plantas bajo estrés hídrico: implicaciones, respuestas adaptativas y estrategia de gestión integrada de la rizosfera para la mitigación del estrés. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626

Zitácuaro, I., Marín, L., Celis, M., Vidal, M., León, X., & Zamora Castro, S. (2022). Vegetación ornamental utilizada en fitorremediación y sus potencialidades ambientales, económicas y sociales. Journal of Basic Sciences, 8(23), 133-145. https://doi.org/10.19136/jobs.a8n23.5353