

# UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

FACULTAD DE POSGRADO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

INFORME DE INVESTIGACIÓN  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**

**TEMA:**

EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN A ESCALA  
DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE  
UN AUTOLAVADO

**Autor:**

Roly Wilfrido Ramírez Páez

**Director**

Msc. Rafael Seleyman Lazo Sulca

*Milagro, 2024*

## Derechos de Autor

Sr. Dr.

**Fabricio Guevara Viejó**

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, **Roly Wilfrido Ramírez Páez**, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **Magíster en Biotecnología**, como aporte a la Línea de Investigación **Medición y Control Ambiental** de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

**Milagro, 31 de octubre del 2024**



Firmado electrónicamente por:  
**ROLY WILFRIDO  
RAMIREZ PAEZ**

**Roly Wilfrido Ramírez Páez**

**C.I.: 2100667456**

## Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, **Rafael Seleyman Lazo Sulca**, en mi calidad de tutor del trabajo de titulación, elaborado por **Roly Wilfrido Ramírez Páez**, cuyo tema es “**Evaluación de un filtro de macrófitas en flotación a escala de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales de un autolavado**”, que aporta a la Línea de Investigación **Medición y Control Ambiental**, previo a la obtención del Grado **Magíster en Biotecnología**. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

**Milagro, 31 de octubre del 2024**



**Rafael Seleyman Lazo Sulca**  
**C.I.: 0918859687**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
**FACULTAD DE POSGRADO**  
**CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA**

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**, presentado por **RAMIREZ PAEZ ROLY WILFRIDO**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UN AUTOLAVADO", las siguientes calificaciones:

|                 |           |
|-----------------|-----------|
| TRABAJO ESCRITO | 56.67     |
| SUSTENTACIÓN    | 40.00     |
| PROMEDIO        | 96.67     |
| EQUIVALENTE     | Excelente |



Firmado digitalmente por:  
**JOSE HUMBERTO VERA  
RODRIGUEZ**

Msc. VERA RODRIGUEZ JOSE HUMBERTO  
**PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL**



Firmado digitalmente por:  
**JUAN DIEGO  
VALENZUELA COBOS**

Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO  
**VOCAL**



Firmado digitalmente por:  
**YESSENIA BEATRIZ  
SARANGO ORTEGA**

Msc SARANGO ORTEGA YESSENIA BEATRIZ  
**SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL**

## **Dedicatoria**

*Dedico este logro a mis padres Marcela e Inés Páez García, Manuel Ramírez Luna y hermano Jeinson Ramírez por ser mi guía y sostén incondicional, su amor y confianza me han impulsado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.*

*A mi familia, por su apoyo constante y por creer siempre en mis capacidades.*

*A mis amigos, por su compañía y aliento a lo largo de este camino, llenando de ánimo y motivación cada paso.*

*A mis profesores, por compartir su sabiduría y brindar las herramientas necesarias para mi crecimiento académico y personal.*

**Roly Ramírez Páez**

## **Agradecimientos**

*A mis padres, quienes con su amor y confianza me impulsaron a seguir adelante, a mi familia por estar siempre a mi lado, y a mis amigos por su aliento en los momentos más desafiantes. De igual manera quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, MSc. Rafael Lazo, por su invaluable guía y dedicación durante todo el desarrollo de mi tesis. A la Universidad Estatal de Milagro y todos los profesionales que compartieron su conocimiento.*

*Agradezco profundamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - sede Orellana y a sus directivos, Dr. Carlos Mestanza PhD., MSc. Maritza Sánchez por facilitar el acceso al Laboratorio de Ciencias Ambientales, donde fue posible llevar a cabo esta investigación, de manera muy especial a los Ingenieros Hamilton Intriago, Pablo Carrera y Blga. Jhosselyn Peñafiel por su apoyo y consejos. Su disposición y compromiso con la formación académica y la investigación fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto, permitiéndome contar con un espacio adecuado y los recursos necesarios para alcanzar mis objetivos.*

*A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por acompañarme en este importante proceso de mi vida, sin su apoyo este logro no habría sido posible.*

**Roly Ramírez Páez**

## Resumen

La falta de tratamiento adecuado de las aguas residuales genera un impacto ambiental significativo, ya que la red de saneamiento público no está preparada para manejar estos contaminantes, y en algunos casos, las decargas se dan directamente hacia los cuerpos de agua. Ante esta situación, la presente investigación evaluó el uso de biofiltros con especies de macrófitas como *Pistia stratiotes* y *Elodea sp*, como una alternativa económica y ecológica para tratar estas aguas. Se diseñó un sistema de tratamiento por lotes con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 5, 10, 15 y 20 días, midiendo parámetros como pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, SST y sólidos sedimentables en laboratorio. Se realizó análisis estadísticos que incluyeron ANOVA y Kruskal-Wallis para determinar significancia entre los tratamientos y correlación Spearman para conocer las asociaciones ente variables. Los resultados mostraron que la especie *Pistia stratiotes* fue significativamente más eficaz que *Elodea* en la remoción de contaminantes, logrando una reducción del 88.94% en SST y del 50.44% en DQO, mientras que *Elodea* alcanzó un máximo de 61.2% en SST y 15.85% en DQO. El TRH de 5 días fue el más eficiente en ambos tratamientos, logrando remociones superiores al 50% en casi todos los parámetros evaluados. Los sólidos sedimentables solo fueron observados en el TRH de 15 días y no afectaron significativamente el rendimiento del sistema. En conclusión, el uso de *Pistia stratiotes* en un filtro de macrófitas flotantes mostró ser una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de aguas residuales en autolavados, especialmente con un TRH de 5 días. Este sistema ofrece una alternativa viable para reducir la carga contaminante antes del vertido en el sistema de alcantarillado, promoviendo un manejo más responsable y ecológico de las aguas residuales.

**Palabras clave:** Fitorremediación; Macrófitas; aguas residuales; *Pistia stratiotes*  
*Elodea sp*

## Abstract

The lack of adequate wastewater treatment generates a significant environmental impact, since the public sanitation network is not prepared to handle these pollutants, and in some cases, discharges are directly into water bodies. In view of this situation, this research evaluated the use of biofilters with macrophyte species such as *Pistia stratiotes* and *Elodea* sp, as an economic and ecological alternative to treat these waters. A batch treatment system was designed with hydraulic retention times (HRT) of 5, 10, 15 and 20 days, measuring parameters such as pH, COD, BOD<sub>5</sub>, TSS and sedimentable solids in the laboratory. Statistical analyses included ANOVA and Kruskal-Wallis to determine significance between treatments and Spearman correlation to determine the associations between variables. The results showed that the *Pistia stratiotes* species was significantly more effective than *Elodea* in pollutant removal, achieving a reduction of 88.94% in TSS and 50.44% in COD, while *Elodea* reached a maximum of 61.2% in TSS and 15.85% in COD. The 5-day HRT was the most efficient in both treatments, achieving removals above 50% in almost all parameters evaluated. Sedimentable solids were only observed in the 15-day HRT and did not significantly affect system performance. In conclusion, the use of *Pistia stratiotes* in a floating macrophyte filter was shown to be an effective and sustainable solution for wastewater treatment in car washes, especially with a 5-day HRT. This system offers a viable alternative to reduce the pollutant load prior to discharge into the sewage system, promoting a more responsible and environmentally friendly wastewater management.

**Key words:** Phytoremediation; Macrophytes, waste water, *Pistia stratiotes*. *Elodea* sp



## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1. Lechuga de agua (Pistia stratiotes)</i> .....                             | 22 |
| <i>Figura 2. Lechuga de agua (Elodea sp.)</i> .....                                    | 24 |
| <i>Figura 3. Humedal Parque PERLA</i> .....  | 29 |
| <i>Figura 4. Proceso de aclimatación de las plantas macrófitas</i> . ....              | 29 |
| <i>Figura 5. Área de toma de muestra de agua. El Oro Car Wash</i> .....                | 30 |
| <i>Figura 6. Diseño de filtro de macrófitas en flotación</i> .....                     | 31 |
| <i>Figura 7. Montaje de filtro de macrófitas en flotación en el laboratorio</i> . .... | 32 |
| <i>Figura 8. Boxplot pH</i> .....  | 38 |
| <i>Figura 9. Boxplot SST</i> .....   | 42 |
| <i>Figura 10. Boxplot DQO</i> .....  | 46 |
| <i>Figura 11. Boxplot DBO<sub>5</sub></i> .....  | 50 |
| <i>Figura 12. Sólidos sedimentables en TRH 15</i> .....                                | 51 |
| <i>Figura 13. Correlación entre todas las variables</i> .....                          | 56 |

## Lista de Gráficos

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Gráfico 1. Resultados promedios SST.....</i>                         | <i>39</i> |
| <i>Gráfico 2. Porcentajes de remoción SST vs TRH.....</i>               | <i>40</i> |
| <i>Gráfico 3. Resultados promedios DQO .....</i>                        | <i>43</i> |
| <i>Gráfico 4. Porcentajes de remoción DQO vs TRH.....</i>               | <i>45</i> |
| <i>Gráfico 5. Resultados promedios BDO5.....</i>                        | <i>47</i> |
| <i>Gráfico 6. Porcentajes de remoción DBO<sub>5</sub> vs TRH.....</i>   | <i>49</i> |
| <i>Gráfico 7. Resultados de tiempo de retención a los 5 días.....</i>   | <i>52</i> |
| <i>Gráfico 8. Resultados de tiempo de retención a los 10 días.....</i>  | <i>53</i> |
| <i>Gráfico 9. Resultados de tiempo de retención a los 15 días.....</i>  | <i>53</i> |
| <i>Gráfico 10. Resultados de tiempo de retención a los 20 días.....</i> | <i>54</i> |

## Lista de Tablas

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Declaración de variables.....</i>                         | <i>8</i>  |
| <i>Tabla 2. Taxonomía de Pistia stratiotes.....</i>                   | <i>23</i> |
| <i>Tabla 3. Taxonomía de Elodea sp.....</i>                           | <i>24</i> |
| <i>Tabla 4. Métodos de análisis de los diferentes parámetros.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabla 5. Caracterización de agua cruda.....</i>                    | <i>35</i> |
| <i>Tabla 6. Resultado de pH.....</i>                                  | <i>36</i> |
| <i>Tabla 7. Análisis estadísticos pH.....</i>                         | <i>38</i> |
| <i>Tabla 8. Réplicas y desviación estándar para SST.....</i>          | <i>39</i> |
| <i>Tabla 9. Resultados de remoción SST.....</i>                       | <i>39</i> |
| <i>Tabla 10. Réplicas y desviación estándar para DQO.....</i>         | <i>42</i> |
| <i>Tabla 11. Porcentajes de remoción de DQO.....</i>                  | <i>44</i> |
| <i>Tabla 12. Réplicas y desviación estándar para DBO5.....</i>        | <i>46</i> |
| <i>Tabla 13. Porcentajes de remoción de DBO5.....</i>                 | <i>48</i> |
| <i>Tabla 14. Comparación valor inicial y valor TRH.....</i>           | <i>55</i> |

## ÍNDICE

|  |      |
|--|------|
| Derechos de Autor.....                                       | ii   |
| Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación .....         | iii  |
| Dedicatoria .....  | v    |
| Agradecimientos.....   | vi   |
| Resumen .....  | vii  |
| Abstract .....   | viii |
| Lista de Figuras .....                                       | ix   |
| Lista de Gráficos.....                                       | x    |
| Lista de Tablas .....  | xi   |
| Introducción.....  | 1    |
| CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación.....             | 4    |
| 1.1. Planteamiento del problema.....                         | 4    |
| 1.2. Delimitación del problema .....                         | 5    |
| 1.3. Formulación del problema .....                          | 5    |
| 1.4. Preguntas de investigación.....                         | 6    |
| 1.5. Objetivos .....   | 6    |
| 1.5.1 Objetivo general.....                                  | 6    |
| 1.5.2 Objetivos específicos .....                            | 6    |
| 1.6. Hipótesis.....  | 6    |
| 1.7. Justificación.....                                      | 6    |
| 1.8. Declaración de las variables (Operacionalización) ..... | 8    |
| CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial .....                 | 10   |
| 2.1. Antecedentes .....                                      | 10   |
| 2.2. Contenido teórico que fundamenta el estudio.....        | 12   |
| 2.2.1. El agua .....   | 12   |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.2.2. Aguas Residuales.....   | 15        |
| 2.2.3. Parámetros fisicoquímicos.....                                    | 18        |
| 2.2.4. Fitorremediación .....  | 20        |
| 2.2.5. Tipos de plantas acuáticas (Macrófitas) .....                     | 21        |
| 2.2.6. Marco Legal.....  | 25        |
| <b>CAPÍTULO III: Diseño Metodológico .....</b>                           | <b>28</b> |
| 3.1. Tipo y diseño de investigación.....                                 | 28        |
| 3.2. Población y la muestra .....  | 28        |
| 3.3. Selección de las muestras.....                                      | 28        |
| 3.3.1 Plantas macrófitas .....   | 28        |
| 3.3.2 Aguas residuales .....   | 30        |
| 3.4. Métodos y técnicas.....   | 31        |
| 3.4.1 Diseño del filtro de macrófitas en flotación .....                 | 31        |
| 3.5. Procesamiento estadístico de la información .....                   | 33        |
| <b>CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados.....</b>         | <b>35</b> |
| 4.1. Análisis y Discusión de Resultados .....                            | 35        |
| 4.1.1. Caracterización de las aguas residuales crudas.....               | 35        |
| 4.1.2. Estimación de la eficiencia de remoción de materia orgánica ..... | 36        |
| 4.1.3. Tiempo de retención hidráulica vs cada parámetro .....            | 52        |
| <b>CORRELACIÓN DE TODAS LAS VARIABLES.....</b>                           | <b>56</b> |
| <b>CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>                   | <b>57</b> |
| 5.1. Conclusiones.....   | 57        |
| 5.2. Recomendaciones.....  | 58        |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                   | <b>59</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>  | <b>70</b> |

## Introducción

A nivel global, más del 80% de las aguas residuales son descargadas al medio ambiente sin recibir tratamiento alguno, mientras que en los países de altos ingresos se trata cerca del 70% de estas aguas (WWAP, 2017). En América Latina, los problemas relacionados con la calidad del agua están vinculados al crecimiento urbano y a la actividad industrial, ya que casi no se tratan las aguas residuales, lo que provoca que aproximadamente el 70% de ellas regrese a ríos y quebradas sin ningún tipo de tratamiento (Yee-Batista, 2013)

En Ecuador, uno de los mayores problemas que afecta la calidad del agua se debe a las descargas de aguas residuales provenientes tanto del sector doméstico como industrial. Solo alrededor del 12% de estas aguas recibe tratamiento, mientras que el 88% restante es vertido directamente en los ríos, lo que hace que el agua de estos cuerpos hídricos no sea apta para el consumo humano (SENAGUA, 2019).

Una de las actividades industriales que ha impactado negativamente el recurso hídrico y la red de saneamiento en la ciudad de Lago Agrio es el funcionamiento de los autolavados. Estas actividades generan una gran variedad de contaminantes, principalmente aceites, grasas y otros hidrocarburos (Caldera et al., 2011; Loos et al., 2013; Aly, 2015)

Este sector económico también incumple las normativas en cuanto a los valores máximos permitidos para la descarga de aguas residuales en el sistema de alcantarillado y la red pública, debido a los productos utilizados en los procesos de lavado. Según los resultados presentados por la Agencia de Regulación y Control del Agua, (2022), los parámetros más frecuentemente incumplidos por los autolavados de vehículos son grasas y aceites, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos sedimentables (SS), demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y pH.

Actualmente, se han desarrollado y documentado numerosas investigaciones y propuestas para tratar las aguas residuales generadas por autolavados en distintos países (Daneshyar & Ghaedi, 2015; Malakootian et al., 2016). En este contexto, el uso de métodos como la coagulación química, las membranas de microfiltración, la

floculación y coagulación, la electrocoagulación y el intercambio iónico han ganado una amplia aceptación y son comúnmente implementados (El-Ashtoukhy et al., 2015; Daneshyar & Ghaedi, 2015). Inclusive la industria nanotecnológica también ha aportado a la reducción de contaminantes presentes en el agua (Qu et al., 2013; Berekaa, 2016).

En Ecuador, el enfoque principal ha estado en garantizar el suministro de agua, dejando en segundo plano la calidad de esta. Es ampliamente conocido que en varias regiones del país existen elevados niveles de contaminación, especialmente en los efluentes que se vierten directamente en el sistema de alcantarillado público (Guamán, 2014)

Por ello, resulta crucial implementar mecanismos que garanticen una gestión integral del recurso hídrico y el tratamiento adecuado de los vertimientos producidos por esta actividad económica. Asimismo, es esencial fomentar nuevas técnicas que utilicen materiales cuyas propiedades aún no se han explorado por completo, como los biofiltros con plantas macrófitas.

Según lo señalado por Ceschin, Sgambato Ellwood y Zuccarello (2019), los filtros que utilizan macrófitas representan una opción sostenible para el tratamiento de aguas, ya que son factibles y eficientes. Su operación y mantenimiento son sencillos, y su instalación es más económica en comparación con los sistemas de tratamiento convencionales, que usualmente requieren el uso de productos químicos.

Se optó por utilizar macrófitas flotantes con el objetivo de replicar un humedal artificial, ya que los humedales, además de facilitar la descontaminación del agua, pueden ser implementados tanto en áreas comerciales como residenciales, ya sea en entornos urbanos o rurales (Boulware, 2013)

En estos sistemas, la biomasa vegetal actúa como barrera para el sedimento, permitiendo que la actividad microbiana se mantenga constante en el funcionamiento del sistema, a la vez que se integra al entorno, añadiendo un valor estético y natural (Ramos-Espinosa et al., 2007). Este tipo de tratamiento puede ofrecer un proceso secundario y terciario para las aguas residuales mediante la acción microbiana presente en las macrófitas (Al-Khafaji et al., 2018)

Se ha demostrado que se logran reducciones de entre el 21% y el 91% para SST y DBO<sub>5</sub>, y entre el 90,2% y el 95% para DQO (Martelo & Lara Borrero, 2012). Además, se ha observado que estos sistemas son eficaces en la remediación de aguas con presencia de nutrientes, zinc, arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo y mercurio, a través de reacciones en las que participan microorganismos adheridos al sistema radicular de las plantas macrófitas (Shah et al., 2014)

En consecuencia, en esta investigación se evaluó un sistema destinado a la reutilización del agua para los procesos productivos de autolavados, mediante la experimentación con un biofiltro de macrófitas compuesto por lechuga de agua y elodea. Se analizó la reducción de SS, SST, DQO, DBO<sub>5</sub> y pH en el agua residual de un autolavado en la ciudad de Lago Agrio.



## CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación

### 1.1. Planteamiento del problema

Las aguas residuales contaminadas representan un desafío significativo para la salud pública y el medio ambiente en diversas regiones, incluyendo Ecuador. La creciente preocupación por la contaminación del agua se debe a que las aguas residuales, tanto domésticas como industriales, a menudo son vertidas sin el tratamiento adecuado. Esta situación no solo deteriora la calidad del agua en los cuerpos receptores, como ríos y lagos, sino que también pone en riesgo la salud de las comunidades y afecta la biodiversidad acuática.

En la ciudad de Lago Agrio, por ejemplo, los autolavados contribuyen de manera considerable a la contaminación de las aguas residuales, generando una gran cantidad de contaminantes, principalmente aceites, grasas y otros hidrocarburos. Estos efluentes son descargados directamente en el sistema de alcantarillado público sin un tratamiento previo eficaz, lo que agrava la contaminación del agua y limita su uso para consumo humano y otros fines.

El tratamiento de aguas residuales es crucial para permitir su reutilización, prevenir su contaminación, proteger el medio ambiente y evitar daños a la salud pública. Según Reynolds (2002), las aguas residuales contienen diversos microorganismos que pueden causar enfermedades como la diarrea y la gastroenteritis, las cuales figuran entre las principales causas de mortalidad a nivel mundial y en la región de América Latina.

Como resultado, la vulnerabilidad y la escasez son más evidentes en los países de bajos ingresos, donde solo se trata el 8% de las aguas residuales domésticas e industriales, un porcentaje muy bajo en comparación con el 70% de los países de altos ingresos. Esto provoca que en muchas partes del mundo se descarguen aguas residuales contaminadas con bacterias, nitratos, fosfatos y disolventes en lagos y ríos, que finalmente desembocan en el mar (WWAP, 2017).

En América Latina, el tratamiento de aguas residuales casi se ha duplicado desde finales de la década de 1990. Sin embargo, se estima que entre el 70% y el 80% de las aguas negras aún se descargan sin ningún tratamiento (WWAP, 2017). Estas cifras tienen graves consecuencias para la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la equidad social. En Ecuador, alrededor del 88% de las aguas residuales no reciben tratamiento, y de las 644 plantas de tratamiento existentes, solo el 73,3% cumplen con las normativas vigentes para su correcto funcionamiento (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2023)

## **1.2. Delimitación del problema**

Las aguas residuales se refieren a cualquier tipo de agua cuya calidad se ha deteriorado debido a actividades humanas. Esto incluye aguas domésticas, urbanas, residuos líquidos industriales o mineros, así como aquellas que se mezclan con estos, como aguas pluviales o naturales, y tienen un impacto significativo en el medio ambiente. Este estudio se enfocó en la evaluación de la contaminación de las aguas residuales generadas por los autolavados en la ciudad de Lago Agrio, Sucumbíos, Ecuador. Se limita a analizar las características de los efluentes provenientes de estas actividades y su impacto en la calidad del agua en el sistema de alcantarillado público.

La investigación también se centra en el uso de biofiltros con macrófitas flotantes, específicamente lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y elodea (*Elodea sp.*), como una solución potencial para mejorar la calidad del agua residual industrial. La evaluación incluyó la reducción de parámetros fisicoquímicos como sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y pH, de las aguas generadas en un autolavado, con cuatro tiempos de retención hidráulica (TRH) diferentes usando reactores de acrílico a escala de laboratorio.

## **1.3. Formulación del problema**

¿Cuál es el rendimiento de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST) y pH en el tratamiento de aguas residuales de un autolavado por medio de un sistema de macrófitas en flotación con lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) y (*Elodea sp.*)?

#### 1.4. Preguntas de investigación

- ¿Cuál es la concentración inicial de los parámetros fisicoquímicos (SS, SST, DQO, DBO<sub>5</sub> y pH) en las aguas residuales generadas por el autolavado?
- ¿Qué capacidad de remoción de contaminantes presenta el biofiltro de macrófitas con lechuga de agua y elodea en las aguas residuales de un autolavado?
- ¿Cuál es el mejor Tiempo de Retención Hidráulica?

#### 1.5. Objetivos

##### 1.5.1 Objetivo general

Analizar el rendimiento de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y pH de un filtro de macrófitas en flotación con lechuga de agua (*Pistia stratiotes* L) y (*Elodea* sp. L.f.) de aguas residuales provenientes de un autolavado.

##### 1.5.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la producción de aguas residuales del autolavado en cinco parámetros fisicoquímicos.
2. Estimar la efectividad de remoción de DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables y pH, en 4 tiempos de retención hidráulica distintos (TRH).
3. Determinar cuál es el mejor tiempo de retención hidráulica (TRH) en relación a la remoción de materia orgánica de los tratamientos con las macrófitas (*Pistia stratiotes* L) y (*Elodea* sp L.f.)

#### 1.6. Hipótesis

La implementación de un biofiltro de macrófitas en flotación, utilizando lechuga de agua y elodea, reducirá significativamente los niveles de contaminantes en las aguas residuales provenientes del autolavado.

#### 1.7. Justificación

Dado los problemas generados por el vertido de aguas residuales en la red pública de alcantarillado, en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y en los cuerpos de agua, es fundamental encontrar alternativas económicas que no dependan de métodos convencionales para lograr la reducción de materia orgánica, sólidos sedimentables y suspendidos totales. El tratamiento adecuado de las aguas residuales generadas por los autolavados es una necesidad urgente debido a su elevado contenido de contaminantes, que representan un riesgo para la calidad del agua y el medio ambiente. En ciudades como Lago Agrio, la falta de tratamiento eficiente de estos efluentes está causando un deterioro significativo en los cuerpos hídricos, afectando la biodiversidad acuática y aumentando los riesgos para la salud pública.

Ante esta problemática, se propone la implementación de un biofiltro de macrófitas como una solución innovadora y sostenible. Este sistema utiliza plantas acuáticas, como la lechuga de agua y la elodea, que mediante procesos biológicos y la acción de microorganismos adheridos a sus raíces, son capaces de reducir la concentración de contaminantes en el agua. Los biofiltros de macrófitas no solo son una opción ecológica, sino también de bajo costo en comparación con los tratamientos fisicoquímicos convencionales, ya que requieren menos mantenimiento y no dependen de productos químicos. La propuesta responde a la necesidad de encontrar alternativas de tratamiento de aguas residuales que sean viables para ciudades con limitados recursos técnicos y económicos. Además, el uso de estos sistemas biológicos contribuye a la reutilización del agua tratada en los procesos productivos de los autolavados, promoviendo así la sostenibilidad ambiental y el uso eficiente del recurso hídrico.

## 1.8. Declaración de las variables (Operacionalización)

Tabla 1. Declaración de variables.

| Variables                               | Tipo          | Definición   |   | Dimensiones  | Indicadores   | Metodología  |
|---|---------------|--|---|--|---|--|
|   |               | Conceptual   | Operacional   |  |   |  |
| <b>Plantas macrófitas</b>               | Independiente | La mayoría de plantas acuáticas tienen la función de remoción y retención de nutrientes y es vital para ellas en su ciclo de vida para así ayudar a la vez a prevenir la eutrofización de los humedales. | Son depuradores en la remoción de contaminantes de aguas residuales donde se tiene que medir la cantidad de plantas en base al área superficial del humedal para obtener resultados favorables en el tratamiento de aguas residuales. | Densidad poblacional de la planta “ <i>Pistia stratiotes</i> “ (Lechuga de agua) | Número de plantas / Área superficial  | <p><b>tipo: Aplicada</b><br/>La presente investigación en estudio será de tipo aplicada, empleó conocimientos teóricos existentes con el fin de tratar las aguas residuales de un autolavado</p> |
|   |               |  | Densidad poblacional de la planta “ <i>Elodea sp</i> “ (Elodea)   |  |   |  |
| <b>Tratamientos de aguas residuales</b> | Dependiente   | son procesos combinados donde se utiliza los parámetros físicos, químicos y biológicos   | Las aguas residuales serán evaluadas sus propiedades físicas, químicas, y biológicas  | Parámetros físico-químicos   | <p>Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5)</p> <p>Demanda química de oxígeno (DQO)</p> | <p><b>Diseño: Cuasiexperimental</b><br/>Este tipo de investigación se enfoca en identificar la forma en</p>  |

|  |  |  |   |                          |  |  |
|--|--|--|---|--------------------------|--|--|
|  |  | para depurar contaminantes existentes en las aguas residuales. Estos procesos físicos en su generalidad está encargada de eliminar componentes o sustancias nocivas exponiéndose tal vez de forma natura | para determinar su grado de contaminación, también el costo y la eficiencia que se obtendrá en base a las plantas depuradoras |                          |  | la que se relaciona una variable independiente sobre la variable dependiente y qué es lo que esto produce.   |
|  |  |  |   |                          | pH   | <b>Nivel: Correlacional</b><br>Tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que existe entre dos variables (variable independiente y la variable dependiente). |
|  |  |  |   |                          | Sólidos suspendidos totales (SST)                |  |
|  |  |  |   |                          | Sólidos sedimentables (SS)                       |  |
|  |  |  |   |                          | Oxígeno disuelto (OD)                            |  |
|  |  |  |   | Eficiencia de depuración | Concentración orgánica inicial del agua a tratar | <b>Enfoque: Cuantitativo</b><br>Se utiliza para evaluar, comparar, interpretar, implica afinar ideas y delimitar el problema   |
|  |  |  |   |                          | Concentración orgánica final del agua tratada    |  |

## CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial

### 2.1. Antecedentes

El manejo y tratamiento de aguas residuales es un desafío a nivel global, especialmente en países en desarrollo. De acuerdo con estimaciones internacionales, más del 80% de las aguas residuales en todo el mundo se vierten en el medio ambiente sin tratamiento, y en Latinoamérica entre el 70% y 80% de las aguas negras se descargan sin tratamiento adecuado (Yee-Batista, 2013)

En Ecuador, solo el 12% de las aguas residuales se someten a algún tipo de tratamiento, lo que significa que el 88% se vierte sin tratamiento en cuerpos de agua, afectando tanto a la biodiversidad como a la salud pública (SENAGUA, 2019)

A nivel local, Heredia Moyano et al. (2020) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo llevaron a cabo el desarrollo de un humedal artificial piloto con especies no convencionales para mitigar la contaminación generada por el vertimiento de aguas residuales provenientes del Río Rumiyaçu. Se llevó a cabo el experimento con 4 especies acuáticas, entre ellas se incluyó la lechuga de agua (*Pistea stratiotes*). Durante la fase experimental llevada a cabo en un tanque de almacenamiento de aguas residuales, se observó que esta especie mostró una adaptación rápida y un crecimiento favorable, facilitando la eliminación de contaminantes en el agua residual. Según las muestras recolectadas de hojas y tallos de *Pistea stratiotes*, esta macrófitas logró remover un 84.1% del DQO en un humedal artificial.

Quispe Benavides & Ayala Amaringo (2019) evaluaron la tasa de crecimiento relativo de *Elodea* sp. utilizando aguas residuales en cinco reactores. Los reactores 1, 2 y 3 contenían agua residual de una laguna anaerobia, el reactor 4 (control) contenía agua del humedal de donde se tomó la \**Elodea*\*, y el reactor 5 (control) contenía agua de la laguna anaerobia sin *Elodea* sp. Para el análisis de los parámetros fisicoquímicos, se consideraron los resultados desde el primer reactor hasta el reactor control (reactor 4), observando que el pH fluctuó entre 7.35 y 8.65, y se logró una remoción de materia orgánica de hasta el 80%. Esto confirmó que las condiciones eran adecuadas para el desarrollo, crecimiento y reproducción de *Elodea* sp.

Finalmente, Poveda Ocaña (2014) utilizó lechuga de agua y jacinto de agua, junto con otras tres especies, para tratar aguas residuales provenientes de una empresa de lavado de jeans y aguas usadas en procesos agrícolas del río Pachanlica. Durante tres semanas, se analizaron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, DQO, DBO, grasas y aceites, detergentes, coliformes fecales, color, turbidez, alcalinidad, dureza, nitratos, nitritos y cloruros. La autora destacó que, en el caso de las aguas residuales industriales, la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) fue la especie más eficaz, ya que logró remover o reducir un 70% de 12 de los 15 parámetros analizados. En cuanto a las aguas residuales agrícolas, ambas especies mostraron resultados similares.

A nivel internacional, se destaca el uso de macrófitas como una estrategia eficaz para el tratamiento de aguas residuales. En Perú, Ramírez Amacifuen & Paredes Vásquez (2019) Se utilizó la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) para la eliminación de nitrógeno y fósforo en aguas residuales provenientes de una laguna de oxidación de la ciudad. El tratamiento tuvo un tiempo de retención de 5 días bajo condiciones controladas de luz, temperatura y pH, empleando 80 litros de agua residual cruda. Los resultados mostraron que, con el uso de la lechuga de agua, la concentración de nitrógeno se redujo de 0,35 mg/l a 0,09 mg/l, y la de fósforo de 5 mg/l a 0,53 mg/l.

En el mismo país, Quispe & Rebaza (2022) llevaron a cabo una comparación entre la eficiencia de las especies *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* para mejorar la calidad del agua residual de una planta agroindustrial. Para la investigación, se recolectaron 60 litros de agua residual de las pozas de la Planta Procesadora de Frutos Naturales, utilizándose 3 kg de cada especie en dos humedales artificiales, con 30 litros de agua en cada uno. El monitoreo del agua se realizó en tres periodos, cada 7 días. Los resultados mostraron un ligero aumento del 5% en el pH, junto con un incremento en la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto, además de una reducción del 90% en la turbidez, DQO y DBO.

Numerosas investigaciones realizadas sobre *Pistia stratiotes* y *Elodea* sp. han mostrado la gran relevancia de utilizar estas plantas en procesos de fitorremediación. En dichos estudios, se exploran alternativas tecnológicas mediante el uso de materia vegetal para la descontaminación de entornos afectados. Sin embargo, los estudios



previos han dejado ciertas incógnitas, como la falta de comprensión sobre los mecanismos y técnicas que estas plantas emplean para eliminar ciertos contaminantes.

Actualmente, se pueden observar investigaciones que confirman la capacidad y efectividad de las especies *Pistia stratiotes* y *Elodea* sp en la remediación de materia orgánica y contaminantes presentes en aguas residuales e industriales, mostrando resultados positivos y adaptabilidad a determinadas condiciones climáticas.

## 2.2. Contenido teórico que fundamenta el estudio

### 2.2.1. El agua

El agua es una sustancia líquida, sin olor, sabor ni color en su estado puro, formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H<sub>2</sub>O). Es el componente esencial para la vida en la Tierra, representando aproximadamente el 70% de la superficie del planeta y siendo crucial para los procesos biológicos, químicos y físicos de los organismos. Su versatilidad como solvente universal y su capacidad para regular el clima y mantener los ecosistemas la convierten en un recurso fundamental para la sostenibilidad del medio ambiente (Contreras et al., 2008)

Existen diversas fuentes de agua, y cada una requiere de tratamientos específicos para ser apta para el consumo humano (Contreras et al., 2008)

- **Aguas subterráneas:** Se originan cuando el agua se filtra desde la superficie terrestre a través de los poros del suelo. Aunque son menos vulnerables a la contaminación que las aguas superficiales, una vez contaminadas, su recuperación es difícil y, en muchos casos, prolongada.
- **Aguas superficiales:** Ríos y lagos constituyen fuentes clave de abastecimiento de agua, pero están más expuestas a la contaminación debido a la llegada de residuos industriales, municipales, escurrimientos de áreas urbanas y agrícolas, así como la erosión del suelo.

- **Aguas de mar:** Disponibles en grandes cantidades, se pueden convertir en agua dulce mediante distintos métodos. Sin embargo, el costo de estos procesos, sumado al manejo del residuo de sal generado, puede ser entre dos y cinco veces más alto que el tratamiento de agua dulce.

#### 2.2.1.1. Calidad del agua

Se refiere a las condiciones del agua en términos de sus características físicas, químicas y biológicas, tanto en su estado natural como después de ser modificada por actividades humanas (Lenntech, 2006). La calidad del agua destinada al consumo humano es un factor clave en la salud de las poblaciones, ya que sus propiedades pueden contribuir a la prevención o propagación de enfermedades como hepatitis A y parasitosis originadas por protozoarios y helmintos, tales como amebiasis, giardiasis, criptosporidiosis y helmintiasis. La prevención o transmisión de estas enfermedades de origen hídrico depende de varios aspectos, siendo la calidad y continuidad del suministro de agua los factores principales (Briñez et al., 2012).

#### 2.2.1.2. Contaminantes del Agua

La contaminación se produce cuando los desechos generados por los seres vivos, desde microorganismos hasta los humanos, superan la capacidad del entorno para procesarlos, lo que provoca un desequilibrio y pone en riesgo la supervivencia de las especies. Los ecosistemas acuáticos son especialmente vulnerables a la contaminación causada por actividades humanas como la agricultura, la industria o el crecimiento descontrolado de las áreas urbanas. Dado que estos contaminantes terminan acumulándose en ríos, océanos, lagos o acuíferos, se identifican dos tipos principales de contaminación:

- **Contaminación Natural:** Es aquella en la que no interviene el ser humano, por ejemplo, los animales que van a morir a lechos de ríos se descompondrán y contaminarán el agua, lechos de ríos que circulan sobre minerales tóxicos necesariamente se irán contaminando, erupciones volcánicas, etc.
- **Contaminación Artificial:** Es la que proviene de alguna actividad del hombre.

Existe una amplia variedad de contaminantes del agua que pueden clasificarse de diversas formas. Una posibilidad bastante usada es agruparlos en los siguientes ocho grupos (Echarri, 2007)

- 1. Microorganismos patógenos:** Son los diferentes tipos de bacterias, virus, protozoos y otros organismos que transmiten enfermedades como el cólera, gastroenteritis diversas, hepatitis, etc. En los países en desarrollo, las enfermedades causadas por estos patógenos representan una de las principales causas de muerte prematura, especialmente en niños.
- 2. Desechos orgánicos:** Incluyen los residuos producidos por humanos y animales, como heces y materiales que las bacterias aeróbicas pueden descomponer mediante procesos que consumen oxígeno. En exceso, estos desechos provocan la proliferación de bacterias que agotan el oxígeno en el agua, haciendo que peces y otros organismos que dependen de él no puedan sobrevivir. Indicadores como el oxígeno disuelto (OD) o la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) son útiles para medir esta forma de contaminación.
- 3. Sustancias químicas inorgánicas:** Este grupo abarca ácidos, sales y metales tóxicos, como el mercurio y el plomo, que en altas concentraciones pueden causar daños graves a la vida, reducir la productividad agrícola y corroer equipos utilizados en el tratamiento del agua.
- 4. Nutrientes vegetales inorgánicos:** Sustancias como nitratos y fosfatos, que son esenciales para el crecimiento de las plantas, pero que en cantidades excesivas pueden inducir un crecimiento desmesurado de algas y otros organismos, lo que desencadena el proceso de eutrofización en el agua.
- 5. Compuestos orgánicos:** Incluyen sustancias como petróleo, gasolina, plásticos, pesticidas, disolventes y detergentes, que suelen llegar al agua y

persistir debido a sus complejas estructuras moleculares, las cuales dificultan su descomposición por microorganismos.

6. **Sedimentos y materiales suspendidos:** Conformados por partículas y otros materiales arrastrados del suelo hacia el agua. La turbidez resultante puede afectar a algunas especies, y el depósito de sedimentos destruye áreas de alimentación y reproducción de peces, además de obstruir lagos, pantanos y canales.
7. **Sustancias radiactivas:** Isótopos radiactivos solubles que pueden acumularse a través de las cadenas alimentarias, alcanzando concentraciones más altas en ciertos tejidos de organismos vivos que en la propia agua.
8. **Contaminación térmica:** Ocurre cuando agua caliente liberada por plantas de energía o procesos industriales eleva la temperatura de ríos o embalses, reduciendo la capacidad del agua para contener oxígeno y afectando la vida de los organismos acuáticos.

### 2.2.2. Aguas Residuales

Toda comunidad produce tanto residuos sólidos como líquidos. La parte líquida, o aguas residuales, está compuesta principalmente por el agua de suministro que ha sido contaminada tras su uso en diversas actividades. Por tanto, se denomina aguas residuales a todas aquellas que componen diferentes características, debido a la alteración de su composición natural. METCALF & EDDY (1995) hace mención a las siguientes características: Sólidos totales, olor, temperatura, densidad, color, turbiedad, materia orgánica, materia inorgánica, gases., microorganismos biológicos.

Según su origen, las aguas residuales se pueden describir como una mezcla de desechos líquidos generados por hogares, instituciones, comercios e industrias, junto con aguas subterráneas, superficiales y pluviales que se puedan sumar a estas fuentes.

### 2.2.2.1. Tipos de aguas residuales

- **Aguas residuales urbanas:** Estas son las que desecharmos a través de los desagües y contienen restos de alimentos, detergentes, orina, excrementos, jabón, entre otros. Representan un potencial foco de enfermedades.
- **Aguas residuales Industriales:** Proviene de actividades industriales, ya sea de fabricación o limpieza de materiales. Su composición varía según el tipo de industria y puede incluir solventes, grasas, metales, lodos, colorantes, etc., presentando distintos niveles de peligrosidad.
- **Aguas residuales agrícolas:** tienen contaminantes provenientes de la utilización de productos químicos tales como: fertilizantes, pesticidas, herbicidas, insecticidas y residuos orgánicos. La mayoría de los productos son de alta toxicidad.

Las aguas residuales industriales y de uso agrícola no deben sobrepasar las concentraciones máximas admitidas de las sustancias que se indican en las distintas normativas legales vigentes en el Ecuador como son TULAS, INEN, Ordenanzas Municipales, entre otras, descritas anteriormente en la Fundamentación Legal.

### 2.2.2.2. Tratamiento de aguas residuales

Martínez & Ysase (2007) mencionan que los métodos para el tratamiento de aguas residuales se remontan a la antigüedad, cuando el ser humano dejó de ser nómada y comenzó a asentarse en comunidades, buscando formas de eliminar los desechos humanos.

González et al (2014) el tratamiento de aguas residuales abarca procesos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de eliminar los contaminantes presentes en el agua. Este tratamiento busca reducir el impacto negativo en los cuerpos de agua receptores, prevenir la propagación de enfermedades y evitar el deterioro de la vegetación en las áreas cercanas al efluente. Al finalizar el proceso, el agua debe cumplir con los parámetros establecidos para su descarga segura.

En términos generales, el tratamiento de aguas residuales incluye una fase primaria, en la cual el agua se deja en reposo para que los sólidos pesados se depositen en el fondo y los más ligeros floten. Luego, en una etapa secundaria, se elimina la materia disuelta y biológica a través de un proceso de separación. Finalmente, se lleva a cabo una etapa de purificación antes de que el agua sea liberada en ríos, lagos u otras corrientes, o se disponga en su destino final (Pérez Martín et al., 2016).

### **2.2.2.3. Tratamiento biológico de aguas residuales**

Una opción para el tratamiento de aguas residuales, en lugar de plantas de tratamiento convencionales, es la utilización de plantas acuáticas, las cuales demostraron su eficiencia en la depuración de contaminantes como sustancias orgánicas, nutrientes y metales pesados. Estas incluyen Lechuga de agua y Elodea. En este proceso, el agua recibe un tratamiento primario y luego se canaliza hacia una laguna, donde se lleva a cabo el equivalente a los tratamientos secundario y terciario. La purificación del agua ocurre gracias a la acción de bacterias y otros microorganismos presentes en las raíces y rizomas de las plantas. Además, estas plantas absorben metales y aumentan el pH del agua, eliminando microorganismos dañinos.

Las fitotecnologías se fundamentan en los mecanismos fisiológicos esenciales que ocurren en las plantas y los microorganismos que las acompañan, como la transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición (Ghosh & Singh, 2005). Los microorganismos presentes en la rizosfera desempeñan un rol crucial en la descomposición de la materia orgánica, cuyos metabolitos generados son absorbidos por las plantas junto con elementos como nitrógeno, fósforo y otros minerales. (Garbisu et al., 2007).

### 2.2.3. Parámetros fisicoquímicos

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La Demanda Química de Oxígeno se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, es decir, es aquel parámetro que indica el oxígeno consumido que se necesita para oxidar la materia orgánica y transformarla a dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y ácido nítrico ( $\text{NH}_3$ ), se mide con un oxidante fuerte. con dicromato de potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) conjuntamente con el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y plata (Ag). La totalidad de oxígeno consumido se da en términos de su equivalencia en oxígeno. DQO se expresa en  $\text{mg/l O}_2$  (Martínez, 2006).

El método de DQO es comúnmente empleado para cuantificar los contaminantes presentes en aguas naturales y residuales, así como para evaluar la concentración de desechos en aguas residuales municipales e industriales. Además, este enfoque se utiliza en sectores como las centrales eléctricas, la industria química, la industria del papel, lavanderías, investigaciones ambientales y en la educación general. En las plantas potabilizadoras de agua, los valores DQO deberán ser inferiores a  $10 \text{ mg/l O}_2$  al final del ciclo de tratamiento (Martínez, 2006).

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)**

La demanda bioquímica de oxígeno determina la cantidad de oxígeno disuelto (OD) consumida por los microorganismos para descomponer (en condiciones aeróbicas) la materia orgánica presente en una muestra durante un período de tiempo y temperatura específicos. Se usa para medir la capacidad contaminante de los residuos domésticos e industriales, en términos de la cantidad de oxígeno que requieren si son descargados en los cuerpos de agua naturales (Mendez & Chang, 2009).

La tasa de uso de oxígeno se basa en ciertos factores como: la clase de microorganismos existentes, el pH, la temperatura y el material orgánico presente en la muestra. Entre mayor sea la DBO en un cuerpo de agua dado, menor es el oxígeno disponible para las formas de vida acuática y, en general, es un parámetro que permite valorar la carga orgánica que se libera a los recursos acuáticos o comprobar

la eficacia de un sistema de tratamiento de aguas residuales, al contrastar la DBO de las aguas residuales sin tratamiento con el efluente final (Mendez & Chang, 2009).

- **pH**

La medición del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentemente utilizadas en la química del agua. Prácticamente todas las fases del suministro de agua y el tratamiento de aguas residuales (por ejemplo, neutralización ácido-base, ablandamiento del agua, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión) dependen del pH. El pH se utiliza en las mediciones de alcalinidad y dióxido de carbono y en muchos otros equilibrios ácido-base. A cierta temperatura, se puede determinar la intensidad del carácter ácido o básico de una solución a través del pH o la actividad del ion hidrógeno. La alcalinidad y la acidez son las capacidades de neutralización de ácidos y bases de un agua y, por lo general, se expresan en miligramos de  $\text{CaCO}_3$  por litro. La capacidad tampón es la cantidad de ácido o base fuerte, por lo general expresada en moles por litro, necesaria para cambiar el valor de pH de una muestra de 1-L en 1 unidad *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association et al., 2017).

- **Sólidos suspendidos totales (SST)**

Son los materiales en suspensión y disueltos en el agua. Se obtienen después de someter al agua a un proceso de evaporación a temperaturas comprendidas entre 103 y 105 °C. La porción filtrable representa a los sólidos Coloidales totales Disueltos y la no – filtrable son los Sólidos Totales en Suspensión (American Public Health Association et al., 2017).

- **Sólidos sedimentables (SS)**

Representa el volumen de las partículas sólidas que se depositan por la fuerza de la gravedad en un recipiente donde el líquido permanezca inmóvil durante un periodo de tiempo específico. La Materia en el agua residual que no permanece en suspensión durante un período predeterminado, se deposita en el fondo. Sólidos suspendidos que pueden ser removidos por sedimentación convencional. La parte de sólidos en suspensión que por tamaño y peso pueden sedimentar se denominan



sedimentables, siendo en promedio un 75% orgánicos y un 25% inorgánicos. A la diferencia entre sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales se les denomina coloidales (American Public Health Association et al., 2017).

#### 2.2.4. Fitorremediación

En los últimos años, la fitorremediación ha emergido como un método eficiente para limpiar suelos y cuerpos de agua contaminados. No obstante, esta técnica tuvo su origen en la década de 1980, cuando se estudiaron plantas hiperacumuladoras con la capacidad de absorber metales pesados (Hejna et al., 2021). Este proceso es de bajo costo, ya que no necesita personal especializado ni equipos complejos (Wilkinson et al., 2023). Además, es una alternativa ecológica y sostenible frente a otros tratamientos, especialmente los fisicoquímicos, siendo una opción económica y segura que no genera impactos negativos en el medioambiente ni riesgos para la salud humana (Hu et al., 2020).

La fitorremediación contribuye a la limpieza de suelos y aguas contaminados utilizando diversas plantas, como árboles, arbustos, pastos y macrófitas. No obstante, el éxito del tratamiento depende de seleccionar especies vegetales con características óptimas, como una alta capacidad para acumular y absorber contaminantes orgánicos, minerales y metales (Mirzaee et al., 2021)

Se pueden diferenciar dos tipos distintos de "fitorremediación": "in planta" y "ex planta", dependiendo de si se lleva a cabo la degradación del contaminante en el interior de la planta o fuera de la misma. En el primer caso (*in planta*), la planta absorbe el contaminante y lo incluye dentro de ella, mientras que cuando es (*ex planta*), dicha degradación se realiza en la zona de la rizosfera, debido a los exudados radicales (Hutchinson et al., 2001).

Para descontaminar aguas residuales en las (PTAR), la fitorremediación debe implementarse como un tratamiento secundario para lograr una mayor reducción de la DBO5 y otros compuestos solubles. Las plantas absorben y translocan los metales pesados presentes en las aguas hacia sus células vegetales, a través de su sistema

radicular, utilizando humedales artificiales que imitan las condiciones de los humedales naturales (Musa & Idrus, 2021).

Las ventajas que comprende el proceso de fitorremediación son:

- El costo de energía es bajo
- La producción de residuos secundarios es mínima
- La descontaminación se puede dar en considerables superficies
- La velocidad de degradación es mayor

### **2.2.5. Tipos de plantas acuáticas (Macrófitas)**

Las macrófitas acuáticas son plantas que habitan en cuerpos de agua como ríos, lagos, lagunas y pantanos (Sytar et al., 2021). Aunque comúnmente se consideran maleza debido a su rápida propagación, lo que puede cubrir la superficie de los cuerpos de agua, en años recientes se ha investigado su papel en los ecosistemas acuáticos. Diversos estudios subrayan la capacidad de estas plantas para mejorar la calidad del agua al absorber y acumular en su interior elementos tóxicos (Xie et al., 2023)

Entre las plantas que muestran la capacidad de bioacumular diversos metales se encuentra la especie *Pistia stratiotes* (Tabinda et al., 2020). Estas plantas tienen la habilidad de alterar las propiedades físicas y químicas del agua contaminada, principalmente por actividades industriales. Además, presentan altos porcentajes de remoción de contaminantes como nitratos, sulfatos, DQO, DBO5, nitrógeno amoniacal, colorantes y sólidos presentes en aguas municipales y textiles (De Souza et al., 2021; Rezanía et al., 2016).

En los procesos de fitorremediación acuática con especies vegetales se distribuyen en:

- Emergentes: la parte superior de la planta se desarrolla por encima de la superficie del agua y la raíz se encuentra enterrada en los sedimentos.
- Flotantes: pueden subdividirse en dos grupos como plantas fijas y no fijas.
- Sumergidas: las plantas se encuentran sumergidas en su totalidad.

La selección de macrófitas para llevar a cabo un tratamiento está determinada por sus características que influyen en la eficiencia del proceso. Entre estas cualidades se incluyen su capacidad para adaptarse al entorno, su resistencia a los contaminantes, su capacidad de dispersión y crecimiento efectivo, su alta eficiencia en la remoción de contaminantes y su capacidad para aprovechar los procesos microbianos.

#### **2.2.5.1. Características de *Pistia stratiotes***

La especie *Pistia stratiotes*, conocida como repollito de agua o lechuga de agua, destaca por su peculiar apariencia. Está formada por rosetas de aproximadamente 30 cm, con hojas gruesas y anchas de color verde fosforescente, que flotan libremente en la superficie del agua. Sus raíces están sumergidas, produciendo flores y frutos, y se multiplican rápidamente, invadiendo el humedal. Este comportamiento invasivo se debe a las condiciones del sistema y su alta capacidad para asimilar nutrientes, lo que incrementa su productividad de biomasa. Originaria de África, se ha expandido principalmente en los ecosistemas pantanosos de Sudamérica (Mustafa & Hayder, 2021).

**Figura 1. Lechuga de agua (*Pistia stratiotes*)**



**Tabla 2. Taxonomía de *Pistia stratiotes*.**

| Clasificación taxonómica |                   |
|--------------------------|-------------------|
| <b>División</b>          | Magnoliophyta     |
| <b>Clase</b>             | Liliopsida        |
| <b>Orden</b>             | Alismatales       |
| <b>Familia</b>           | Araceae           |
| <b>Género</b>            | <i>Pistia</i>     |
| <b>Especie</b>           | <i>Stratiotes</i> |

**Fuente:** (Tropicos, 2024b)

#### **2.2.5.2. Características de *Elodea* sp.**

La *Elodea* es una especie invasora originaria de Norteamérica que representa un problema debido a su rápida proliferación. Se trata de una macrófita acuática sumergida de tipo arbustivo, cuyo tallo se ramifica entre 20 y 30 cm de longitud. Sus hojas, de color verde oscuro, son dentadas, miden aproximadamente 1 cm de largo y entre 2 a 3 mm de ancho, y se caracterizan por ser cerosas y rígidas. Además, esta planta contiene altos niveles de fósforo en su biomasa y puede almacenar dicho elemento en sus raíces (CABI, 2005).

Figura 2. Peste de agua (*Elodea* sp.)



Tabla 3. Taxonomía de *Elodea* sp.

| Clasificación taxonómica |                  |
|--------------------------|------------------|
| División                 | Magnoliophyta    |
| Clase                    | Liliopsida       |
| Orden                    | Hydrocharitales  |
| Familia                  | Hydrocharitaceae |
| Género                   | <i>Elodea</i>    |
| Especie                  | sp               |

Fuente: (Tropicos, 2024a)

## **2.2.6. Marco Legal**

Según lo estipulado en la Constitución de la República del Ecuador, publicada en el Registro Oficial 449 el 20 de octubre de 2008, específicamente en el Artículo 424, la Constitución es la norma suprema y prevalece sobre cualquier otra dentro del orden jurídico. De acuerdo con el Artículo 425, y en consonancia con la pirámide de Kelsen, la Constitución es la primera norma a ser tomada en cuenta, seguida por los tratados y convenios internacionales, y finalmente, por los demás actos y decisiones de los poderes públicos (Asamblea Constituyente, 2008).

### **2.2.6.1. Constitución de la República del Ecuador**

La Constitución fomenta de manera integral la protección, el respeto y la conservación del ecosistema, impulsando un desarrollo sostenible y equilibrado de la población. Tanto personas naturales como jurídicas tienen el derecho de exigir el cumplimiento de este principio, respaldado por artículos vigentes que garantizan su aplicación. De esta manera, los problemas ambientales causados por la actividad humana son sancionados conforme a la normativa, en función del daño ocasionado (Asamblea Constituyente, 2008).

Dentro de la constitución de la República del Ecuador, se presentan artículos sobre la protección y restauración del ambiente, los cuales se muestran a continuación:

En el Art. 14 y 66 inciso 27, hablan sobre establecer derechos de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como la preservación de espacios públicos y la recuperación de espacios naturales de interés público, y el derecho a la restauración de los ecosistemas para garantizar la salud, por medio de mecanismos efectivos de prevención y control de la contaminación ambiental como se menciona en el Art. 72 y 397 inciso 2.

En el Art. 395, se establecen principios ambientales relacionados al desarrollo sostenible, siendo importante tan solo mencionar lo más relevante dentro de cada numeral:

1. El Estado garantizará que se conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas.

2. Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento.
3. El Estado garantizará la participación activa y permanente de las personas afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales.

Con respecto al Art. 406 menciona que el Estado regulará la conservación, manejo y uso sustentable, recuperación y limitaciones de los ecosistemas frágiles y amenazados, entre estos los humedales.

### **2.2.6.2. Código orgánico del Ambiente (COA)**

El objetivo primordial del COA es garantizar el derecho de toda la población a vivir en un entorno ecológicamente equilibrado, promoviendo el Sumak Kawsay. Para ello, el COA busca establecer, implementar y fomentar la conservación y restauración de los ecosistemas, la biodiversidad y sus componentes (Asamblea Constituyente, 2008).

Reiterando lo antes mencionado, en el Art. 3 numeral 4, 7 y 8, y Art. 6 se propone que este código tiene como fin: establecer, implementar e incentivar mecanismos e instrumentos para la restauración de los ecosistemas, servicios ambientales y recursos naturales; por medio de la prevención, minimización, control y participación frente a los impactos ambientales, teniendo presente los derechos de la naturaleza como se hace mención en la carta magna. En el Art. 9, sobre los principios ambientales, en el numeral 2 menciona que: El Estado va a proponer tanto al sector público como privado el uso de tecnologías limpias amigables con el ambiente, que reduzcan los daños al ambiente en todas las fases productivas y los costos y disposición final de los desechos. Respecto al Art. 26 numeral 2 y Art. 27 numeral 2 es competencia de los GAD provinciales y municipales elaborar planes, programas y proyectos de restauración. En el Art. 82 relacionado con los servicios ambientales, se establecerá un marco general para la restauración de los ecosistemas por medio de mecanismos que aseguren su permanencia. El Art. 118 hace mención que en la restauración de ecosistemas se priorizará la regeneración natural cuando sea posible técnica, económica y socialmente; y De acuerdo con el Art. 261 con respecto a las medidas mínimas de adaptación y mitigación la autoridad

ambiental con las entidades intersectoriales, impulsarán la promoción de la restauración de zonas y ecosistemas degradados y afectados.

### **2.2.6.3. Acuerdo ministerial 097-A. Reforma del texto unificado de legislación secundaria (TULSMA)**

El principal propósito del Acuerdo Ministerial 097-a (2015) es regular y salvaguardar la calidad del agua para proteger y mantener los recursos otorgados, la integridad de las personas, de los ecosistemas, sus conexiones y del entorno en su totalidad. La reglamentación técnica define los límites permisibles, disposiciones y restricciones para el vertido de aguas residuales en cuerpos de agua o sistemas de drenaje público. Además, controla la calidad del agua en sus diversas aplicaciones, con la finalidad primordial de evitar y regular la polución, salvaguardando de esta manera los ecosistemas acuáticos y la vida que los habita.



## CAPÍTULO III: Diseño Metodológico

### 3.1. Tipo y diseño de investigación

Tomando en cuenta los componentes del filtro de macrófitas en flotación, el presente trabajo de investigación aborda un enfoque práctico, como demostrar el rendimiento de remoción de materia orgánica.

Asimismo, adopta un enfoque de tipo experimental, para investigar los efectos en un entorno controlado, a partir de la manipulación variables que condicionan el funcionamiento del sistema, lo que permitió evaluar el tratamiento propuesto.

### 3.2. Población y la muestra

Las plantas utilizadas fueron la lechuga de agua (*Pistia stratiotes* L.) y la elodea (*Elodea sp.* Lf.). Fueron seleccionadas por su amplia disponibilidad en humedales de la ciudad, y por sus características de tolerancia hacia los contaminantes.

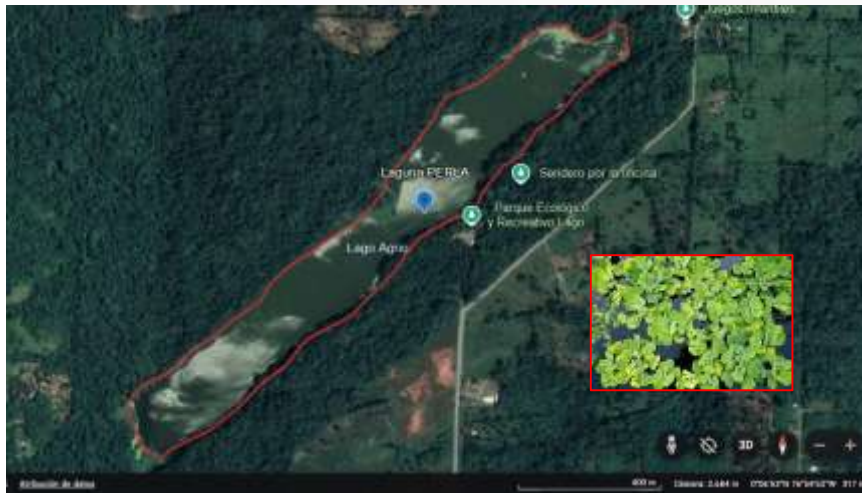
Muestra de agua residual cruda producida en el autolavado "Oro Car Wash", alrededor de 80 litros.

### 3.3. Selección de las muestras

#### 3.3.1 Plantas macrófitas

Para este estudio se utilizaron la lechuga de agua (*Pistia stratiotes* L.) y la elodea (*Elodea sp.* Lf.). Material vegetal que fue extraído del medio silvestre, proveniente de un área protegida dentro del cantón Lago Agrio conocido como parque PERLA. Ubicación geográfica en las siguientes coordenadas WGS 1984: UTM 18N (12515,146N; 287232,2E) **Figura 3.**

**Figura 3. Humedal Parque PERLA.**



**Fuente:** (Google Earth, 2024)

Debido a que las plantas provenían de ambientes con condiciones de temperatura distintas a las del laboratorio, requirieron un período de adaptación antes de realizar los ensayos en el laboratorio de ciencias ambientales de la Escuela Politécnica de Chimborazo, Sede Orellana, en la ciudad de Puerto Francisco de Orellana (El Coca). Por ello, se llevó a cabo un proceso de aclimatación durante 20 días en contacto con agua limpia, a fin de evitar falsos positivos durante las pruebas con el agua residual del autolavado. **Figura 4.**

**Figura 4. Proceso de aclimatación de las plantas macrófitas.**



**Fuente:** Autor, 2024.

### 3.3.2 Aguas residuales

El agua residual se obtuvo del autolavado "Oro Car Wash" ubicado en la Avenida Quito y calle 20 de junio en el centro de la ciudad de Lago Agrio, Sucumbíos, Ecuador coordenadas WGS 1984: UTM 18N (9215,848N; 289637,437E). Según la ubicación del establecimiento dentro del análisis de uso de suelo del PDOT-LA (2019) se encuentra ubicado en un área de tipo residencial, vertiendo el agua residual, producto de las actividades de lavado directamente a la red pública de alcantarillado de la ciudad. Figura 3.

Para obtener una muestra de agua representativa para los análisis, se coordinó con las autoridades del establecimiento el día del muestreo, ya que informaron que los días de mayor actividad en la limpieza de vehículos eran los (viernes y sábados). Con base en esta información, se realizó la recolección de las muestras siguiendo los criterios establecidos en la normativa de toma de muestras de aguas residuales del INEN (2013).

**Figura 5. Área de toma de muestra de agua. El Oro Car Wash.**



Fuente: (Google Earth, 2024)

### 3.4. Métodos y técnicas

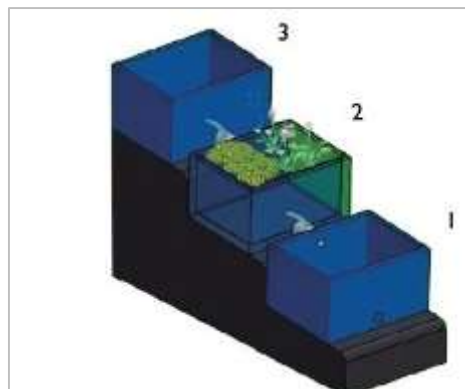
#### 3.4.1 Diseño del filtro de macrófitas en flotación

El filtro de macrófitas combina características de dos sistemas de tratamiento basados en mecanismos naturales: los humedales artificiales de flujo superficial y los sistemas acuáticos. Este modelo fue diseñado y patentado en 2001 por el grupo de Agroenergética del departamento de producción vegetal de la Universidad Politécnica de Madrid (Beascoechea et al., 2001).

En esta investigación, se diseñó un sistema de macrófitas en flotación utilizando módulos de PVC transparente. Se seleccionó un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 5 días, de acuerdo con lo señalado por Medina et al (2012) y JAIME (2016). Así, se logró una superficie de plantación de 0,180 m<sup>2</sup> por reactor, operando en cuatro tiempos de retención hidráulica (TRH) o tandas de construcción propia.

El sistema constaba de tres tanques con una inclinación del 2% para permitir que el agua fluyera por gravedad. En el tanque del nivel superior se encontraba el agua residual del autolavado que debía ser tratada, mientras que el tanque del segundo nivel estaba dividido en dos compartimentos: (uno para la lechuga de agua y otro para la elodea). Finalmente, en el tanque del último nivel, el agua tratada se extraía de los reactores Bach tras cada TRH, utilizando mangueras conductoras individuales. Esto se ilustra en las **Figuras 6 y 7**.

**Figura 6. Diseño de filtro de macrófitas en flotación.**



**Fuente:** Tomado de Garavito-Bermúdez et al., (2020)

**Figura 7. Montaje de filtro de macrófitas en flotación en el laboratorio.**



**Fuente:** Autor, 2024.

### **3.4.2 Técnicas de caracterización**

La caracterización fisicoquímica del agua, tanto al inicio de las pruebas como en los controles de los dos efluentes (el de la Pistia y el de elodea), se llevó a cabo utilizando las técnicas establecidas en el *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* de la American Public Health Association et al (2017). Los parámetros analizados se basaron en el rendimiento principal de las plantas macrófitas en la eliminación de contaminantes. Los análisis descritos en la tabla 1 fueron realizados para determinar las características fisicoquímicas del agua cruda.

Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de ciencias ambientales de la Escuela Politécnica de Chimborazo sede Orellana (ESPOCH), a excepción de la medición del  $DBO_5$ , que requirió transportar las muestras de agua al laboratorio ambiental LABSU para su análisis.

**Tabla 4. Métodos de análisis de los diferentes parámetros**

| <b>Parámetro</b> | <b>Técnica de análisis</b>       | <b>Método de referencia</b>                             |
|------------------|----------------------------------|---|
| <b>DQO</b>       | Micro DQO: reflujo abierto       | Standard methods 5220B                                  |
| <b>DBO5</b>      | Incubación cinco días y oxímetro | Standard methods 5210B-5 Day<br>Normalizado / PEE-LABSU |
| <b>pH</b>        | Electrométrico                   | Standard methods 4500- H <sup>+</sup>                   |
| <b>SST</b>       | Gravimétrico Dried at 103-105 °C | Standard methods 2540 D                                 |
| <b>SS</b>        | Cono Imhoff                      | Standard methods 240 F                                  |

**Fuente:** Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23 edición, 2017.

Se utilizaron aproximadamente 40 litros de agua para iniciar los reactores junto con las especies macrófitas, comenzando las pruebas para los TRH en modo batch.

No se incluyó un "reactor" de control con agua sin tratamiento de macrófitas.

Al finalizar el TRH de 5 días, se realizaron análisis fisicoquímicos de los parámetros y se compararon con los del agua cruda para determinar los porcentajes de remoción de DQO, DBO5, pH, sólidos suspendidos totales y sedimentables (SST y SS). Posteriormente, se ajustó el sistema de tratamiento para los TRH de 10, 15 y 20 días, y se repitieron las pruebas fisicoquímicas.

Cada medición se efectuó al finalizar cada tanda, y según el parámetro a analizar, se utilizaron los blancos correspondientes cuando fue necesario.

Se realizó las mediciones por triplicado (3 réplicas de los TRH), y las muestras fueron puntuales, tomadas al final de cada tanda (días 5, 10, 15 y 20). No se tomaron muestras aleatorias dentro del reactor; las muestras se obtuvieron solo a la salida del mismo para cada tipo de macrófitas. Finalmente, los datos de remoción de cada parámetro se graficaron de acuerdo con los TRH correspondientes.

### **3.5. Procesamiento estadístico de la información**

Para determinar si existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos respecto a los parámetros pH, DBO5, DQO y SST, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, previa verificación en el cumplimiento de los supuestos de normalidad de datos y homogeneidad de varianzas. Los datos recopilados en cada variable fueron procesados utilizando el software estadístico RStudio versión 4.2.2 para Windows, con un nivel de confiabilidad del 95% ( $\alpha=0,05$ ).

Dada la naturaleza de los datos, se hizo uso de la prueba de Kruskal-Wallis un test no paramétrico utilizado principalmente para comprobar la igualdad de medias entre dos muestras, o de una sola muestra, en caso de que las muestras no sigan una distribución normal ( $p<0,05$ ).

Finalmente, se empleó la correlación de Spearman, una prueba no paramétrica que evalúa la dependencia entre dos variables con datos continuos. Esta herramienta estadística permite medir la asociación entre dos variables y es especialmente útil cuando las mediciones se realizan en una escala ordinal, cuando hay valores atípicos o ante distribuciones no normales, ya que estos factores pueden afectar significativamente las correlaciones de Pearson (Lahoz-Beltrá et al., 1995).

## CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

### 4.1. Análisis y Discusión de Resultados

#### 4.1.1. Caracterización de las aguas residuales crudas

Los resultados obtenidos para los parámetros del agua cruda se determinaron mediante los métodos indicados en la **Tabla 4**, y los datos recopilados se presentan en la **Tabla 5**. Es importante señalar que la caracterización del agua cruda se realizó una única vez debido a limitaciones en el acceso al laboratorio.

**Tabla 5. Caracterización de agua cruda.**

| Parámetro        | Valor inicial | Referencia<br>TULSMA | Unidad de medida |
|------------------|---------------|----------------------|------------------|
| pH               | 8,1           | 6-9                  | unidades         |
| SST              | 18,00         | 220,0                | mg/L             |
| DQO              | 82,00         | 500,0                | mg/L             |
| DBO <sub>5</sub> | 42,00         | 250,0                | mg/L             |
| SS               | 3,55          | 20                   | mg/L             |

**Fuente:** Autor, 2024.

La comparación de los parámetros se hace según la normativa Ecuatoriana, Acuerdo Ministerial 097-a (2016) en la reforma del texto unificado de legislación secundaria, en su apartado sobre los límites de descargas residuales al sistema de alcantarillado público. Según los datos obtenidos el agua residual del lavadero de autos tiene un pH básico, con un valor que se encuentra dentro de los límites permisibles el cuál se establece en la norma que debe oscilar entre 6,0 y 9,0 unidades. De acuerdo con lo señalado por Trujillo et al (2014), los valores ideales para procesos de tratamiento biológico se sitúan entre 6.5 y 8.5 unidades. Asimismo, según el tratamiento aplicado al agua, este rango puede variar entre 7 y 8 unidades (Mejía-López et al., 2017).

De igual manera, el pH del agua cruda evidencia el uso de sustancias y jabones desengrasantes alcalinos utilizados en la limpieza de vehículos, lo que contrasta con los valores reportados por otros estudios, que oscilan entre 4 y 7 unidades (Kang et



al., 2011; Zulaikha et al., 2014), e incluso difiere de los valores observados en aguas residuales simuladas (Yang et al., 2012).

La DQO presentó un valor inferior al límite permisible, según la normativa ecuatoriana, la cual establece que debe estar por debajo de los 500 mg/L, asimismo el bajo el valor contenido en SST, no superior a los 220 mg/L permisibles. Sin embargo, aunque los valores no superan los límites, si el agua es vertida en un alcantarillado de público, debido a la antigüedad de la red municipal, podría provocar corrosión e incluso la ruptura de las tuberías, como resultado de los taponamientos causados por la acumulación de grasas e hidrocarburos (González, 2020). Adicional, a ello el valor de DBO<sub>5</sub> se encuentre dentro del límite establecido no superior a los 250 mg/L; por su parte, los sólidos sedimentables SS se encuentran en un valor por debajo de 20 mg/L establecido como límite en la normativa.

#### **4.1.2. Estimación de la eficiencia de remoción de materia orgánica**

##### **4.1.2.1. Caracterización físico química del efluente**

Se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica del agua residual después de su paso por el reactor batch, evaluando cuatro tiempos de retención hidráulica (TRH) de 5, 10, 15 y 20 días.

#### **pH**

Analizando el pH en cada uno de los batch, se evidencia en la **Tabla 6**, los resultados obtenidos de variaciones de este parámetro. Para el caso del agua cruda, el pH no superó el límite máximo permisible, cabe recalcar que, aunque la medición se realiza directamente con un equipo y no se requiere duplicados o triplicados de las mediciones, para este caso si se realizó mediciones por triplicado.

**Tabla 6. Resultado de pH**

| Macrófita                  | Pistia |      |      |      | Elodea |      |      |      |
|----------------------------|--------|------|------|------|--------|------|------|------|
|                            | 5      | 10   | 15   | 20   | 5      | 10   | 15   | 20   |
| Replica 1 unidades pH      | 7,14   | 7,15 | 7,34 | 7,9  | 7,37   | 6,91 | 7,12 | 7,52 |
| Replica 2 unidades pH      | 7,2    | 6,9  | 7,43 | 7,7  | 7,52   | 7,1  | 7,16 | 7,6  |
| Replica 3 unidades pH      | 7      | 7,2  | 7,48 | 7,8  | 7,15   | 6,9  | 7,2  | 7,63 |
| <b>Desviación estándar</b> | 0,10   | 0,16 | 0,07 | 0,10 | 0,19   | 0,11 | 0,04 | 0,06 |
| <b>Promedio</b>            | 7,11   | 7,08 | 7,42 | 7,80 | 7,35   | 6,97 | 7,16 | 7,58 |

Fuente: Autor, 2024.

La especie Pistia o lechuga de agua no demostró gran variación con respecto al cambio de TRH de 5 a 10 días, pero la disminución del pH es menor en comparación al TRH de 15 y 20 días, y se mantiene en el rango de 7 a 8 unidades, con una variación del día 5 al 20 de: 0,7 unidades. Lo anterior, es similar a lo reportado por Ramirez Amacifuen & Paredes Vásquez, (2019) para aguas residuales, donde las variaciones de pH no superan las 2 unidades.

Asimismo, la Elodea no registró una disminución mayor de pH, comparado con la lechuga de agua para el TRH de 5 días, y en los THR de 10 al 20, el valor resultante tuvo una variación de sólo 0,2 unidades.

Estos resultados indican el cumplimiento con lo establecido en la normativa Ecuatoriana Acuerdo Ministerial 097-a (2016), descargas al sistema de alcantarillado público, en la tabla 9, donde este parámetro debe encontrarse en el rango de 6,0 y 9,0 unidades, lo que sugeriría que con la implementación de un sistema de macrófita flotantes, le permitiría al autolavado cumplir con la norma.

De acuerdo con el análisis estadístico para ambas macrófitas **Tabla 7** se infiere que el parámetro de pH presenta un comportamiento normal ( $p > 0,05$ ), además que entre los tratamientos presenta la misma varianza (homogeneidad  $p > 0,05$ ), y en la prueba paramétrica ANOVA no hay diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre los tratamientos de las especies Pistia y Elodea. Como se observa en la **Figura 8**, muestra que los valores medios y extremos del boxplot no difieren de manera relevante entre tratamientos. Sin embargo, se evidenció que la especie Pistia

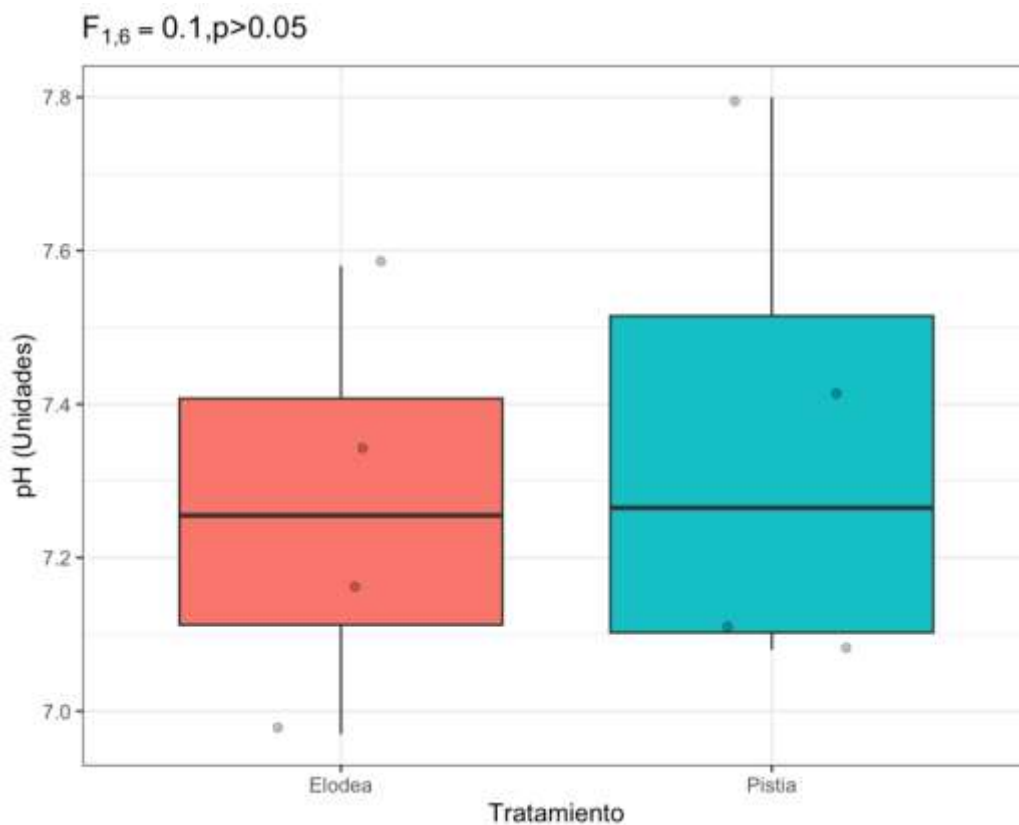
disminuye más el parámetro pH respecto a la Elodea en un (9,1%). Adicional, este parámetro no presentó correlación alguna con los demás parámetros (Ver **Figura 16. Correlación de Spearman**).

**Tabla 7. Análisis estadísticos pH.**

|        | Shapiro-Wilk (Normalidad) | Test de Bartlett (Homogeneidad) | P-value |
|--------|---------------------------|---------------------------------|---------|
| Pistia | 0.3542                    | 0,6234                          | 0.695   |
| Elodea | 0.9765                    |                                 |         |

Fuente: Autor, 2024.

**Figura 8. Boxplot pH**



Fuente: Autor, 2024.

### SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Para el caso de los sólidos suspendidos totales se obtuvo mayor remoción alcanzando un 88,94% en un tiempo de retención de 5 días, con la especie Pistia.

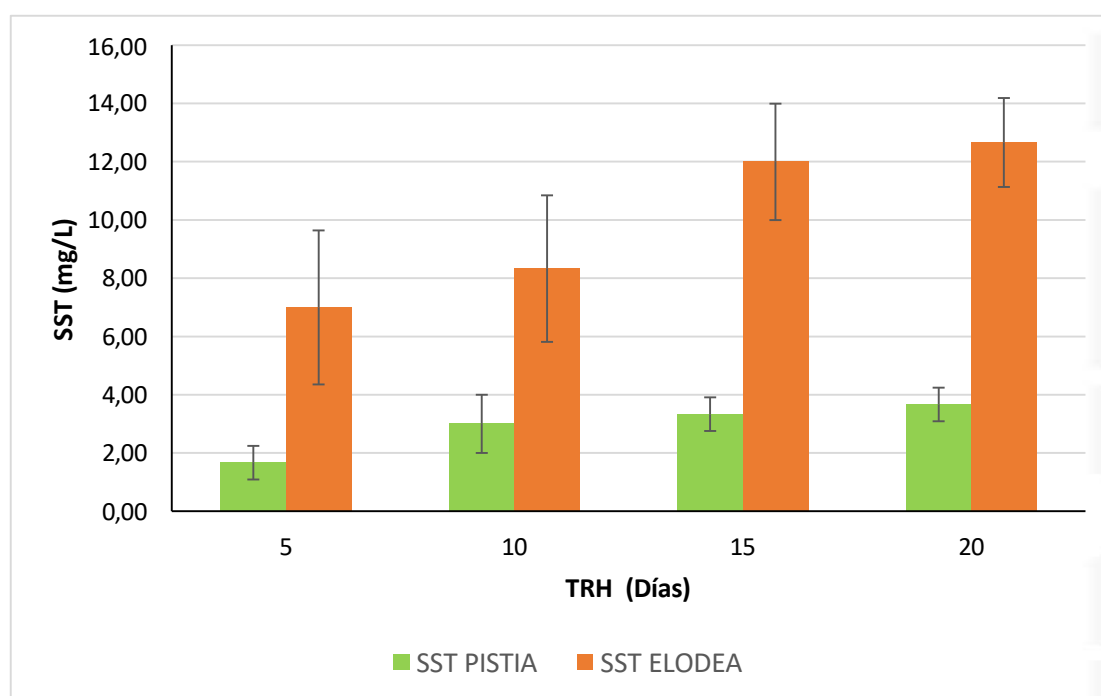
**Tabla 8. Réplicas y desviación estándar para SST.**

| Macrófita                  | Pistia |      |      |      | Elodea |      |       |       |
|----------------------------|--------|------|------|------|--------|------|-------|-------|
|                            | 5      | 10   | 15   | 20   | 5      | 10   | 15    | 20    |
| Replica 1 (mg/L)           | 2      | 4    | 3    | 4    | 10     | 11   | 12    | 14    |
| Replica 2 (mg/L)           | 2      | 2    | 3    | 4    | 6      | 8    | 14    | 13    |
| Replica 3 (mg/L)           | 1      | 3    | 4    | 3    | 5      | 6    | 10    | 11    |
| <b>Desviación estándar</b> | 0,58   | 1,00 | 0,58 | 0,58 | 2,65   | 2,52 | 2,00  | 1,53  |
| <b>Promedio (mg/L)</b>     | 1,67   | 3,00 | 3,33 | 3,67 | 7,00   | 8,33 | 12,00 | 12,67 |

Fuente: Autor, 2024.

Para el cálculo de la remoción de sólidos suspendidos totales, se utilizó el promedio de los datos obtenidos en cada uno de los tiempos de retención. Estos datos se observan junto con sus desviaciones gráficamente en el **Gráfico 1**.

**Gráfico 1. Resultados promedios SST.**



Fuente: Autor, 2024.

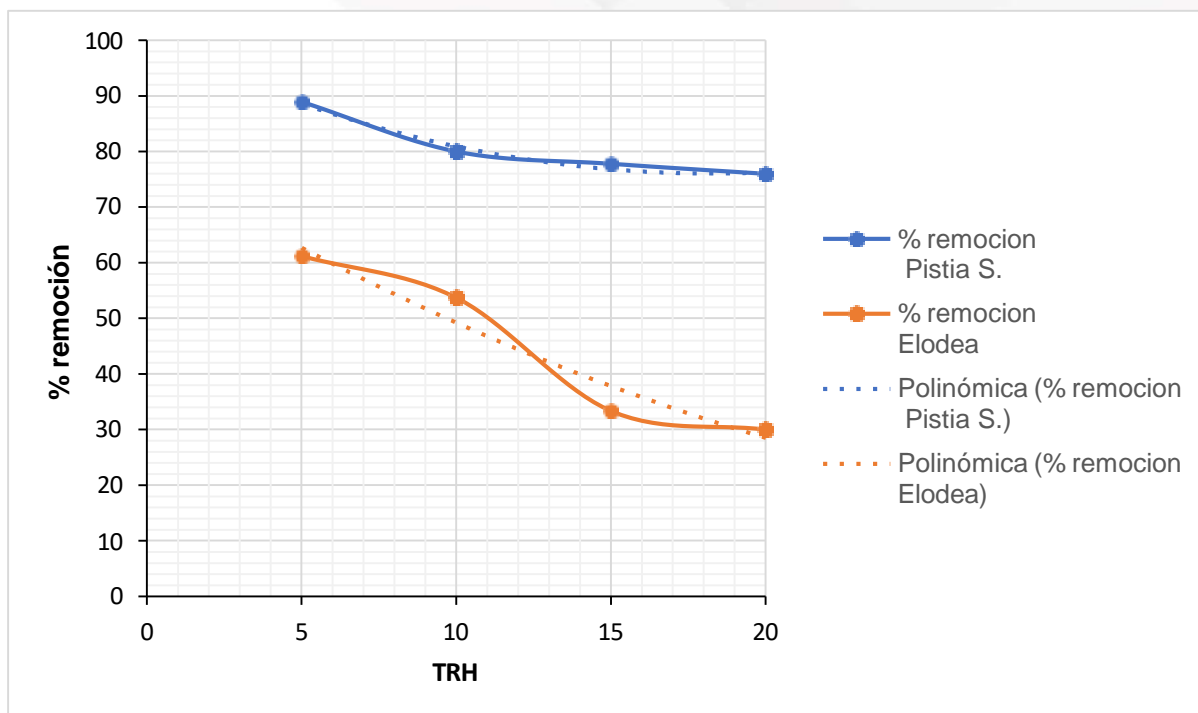
**Tabla 9. Resultados de remoción SST.**

| TRH (días) | % remoción Pistia S. | % remoción Elodea |
|------------|----------------------|-------------------|
| 5          | 88,94%               | 61,2%             |
| 10         | 80%                  | 53,7%             |
| 15         | 77,8%                | 33,34%            |
| 20         | 76%                  | 30%               |

**Fuente:** Autor, 2024.

En cuanto a los resultados obtenidos en el tratamiento de sólidos suspendidos totales, se observó que cumplen con la normativa ecuatoriana establecida en el Acuerdo Ministerial 097-a (2016), la cual exige que este parámetro esté por debajo de 220 mg/L. Los resultados indican que la especie Pistia logró los mejores índices de remoción de sólidos por encima del 88% y 61% para Elodea. Resultados que se asemejan con lo observado por Ali et al (2024) y Carrillo (2014) quienes presentaron porcentaje de remoción de SST de 84% y 72% para las especies Pistia y Elodea respectivamente. Esto demuestra que las macrófitas responden positivamente al tratamiento en un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 10 días, periodo en el cual el tratamiento aplicado al agua residual del autolavado también mostró valores similares de remoción.

### **Gráfico 2. Porcentajes de remoción SST vs TRH**

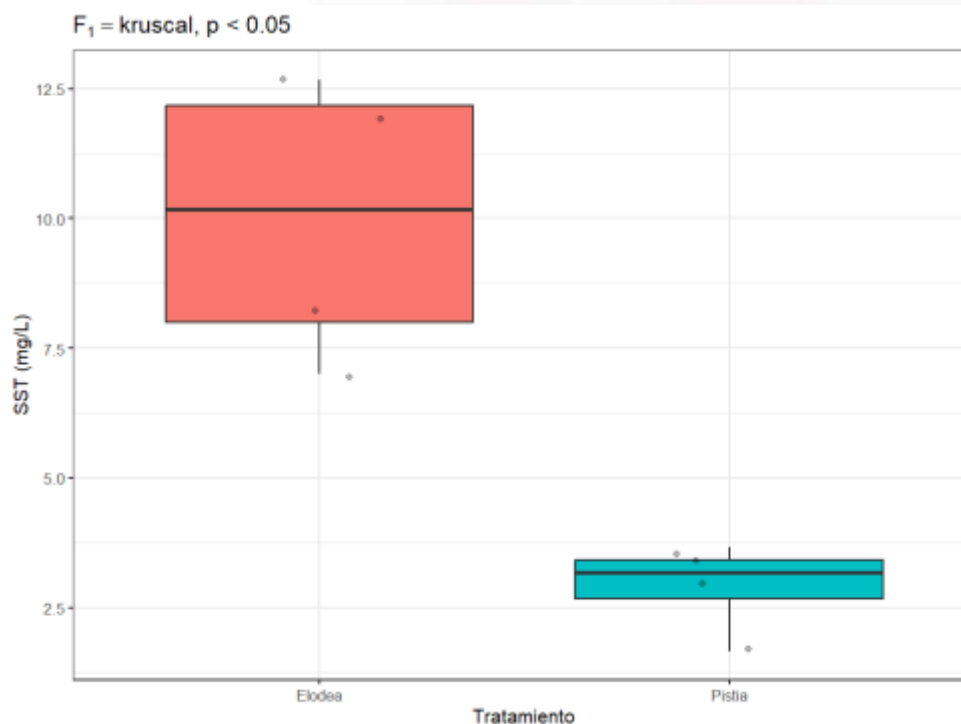


**Fuente:** Autor, 2024.

En el **Gráfico 2** se aprecia que la tendencia de remoción de SST en ambos tratamientos sigue un patrón similar, con una disminución en el porcentaje de remoción conforme aumenta el tiempo de retención hidráulica (TRH).

Según el análisis estadístico de este parámetro, se encontró significancia para la prueba de normalidad ( $p > 0,05$ ), lo que indica que los datos siguen un comportamiento normal en ambas macrófitas. En cuanto a la prueba de homogeneidad, el parámetro no cumple con la hipótesis nula ( $p < 0,05$ ), lo que sugiere que los grupos presentan varianzas similares. Además, la prueba de varianzas (Kruskal-Wallis) mostró significancia estadística, lo que señala que la mediana de la población difiere estadísticamente de la mediana hipotética, y como se logra apreciar en la **Figura 9** los valores medios y extremos del boxplot difieren de manera relevante; por otra parte, de acuerdo con los porcentajes de remoción más eficientes de SST, fue la especie Pistia. Por último, este parámetro presentó una correlación positiva con los parámetros de DQO Y DBO5.

Figura 9. Boxplot SST.



Fuente: Autor, 2024.

## DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Para este parámetro se realizaron mediciones por triplicado y el valor que se tomó para los cálculos de remoción de DQO de cada TRH fue el promedio de las mediciones, esto se puede observar en la **Tabla 10**.

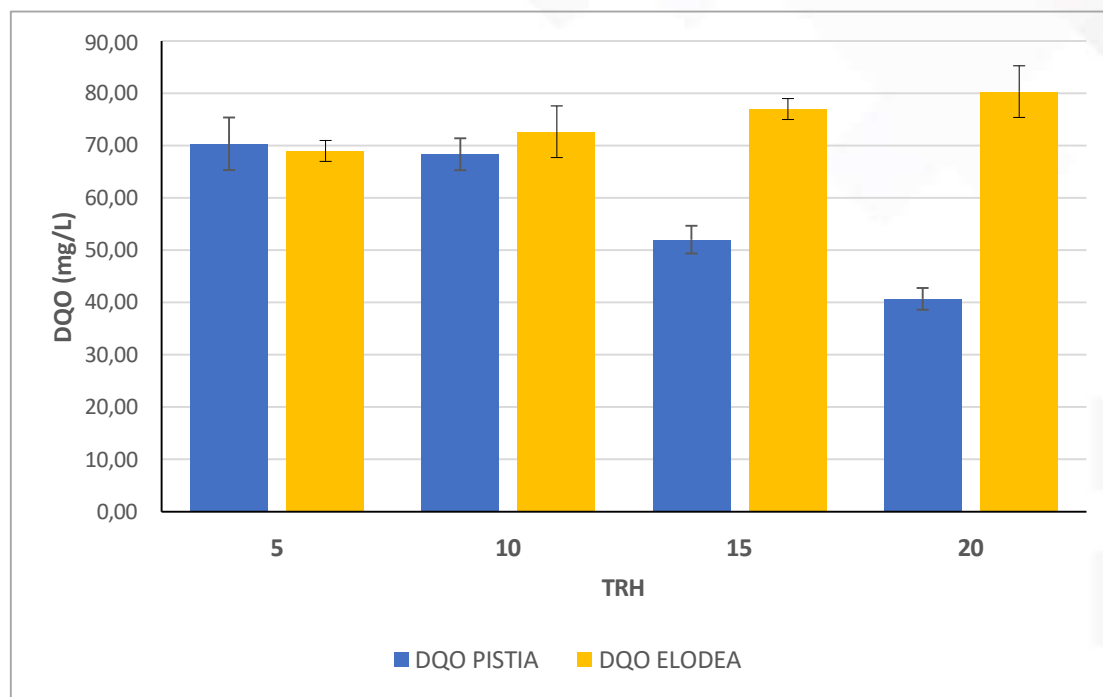
Tabla 10. Replicas y desviación estándar para DQO.

| Macrófita                  | PISTIA |       |       |       | ELODEA |       |       |       |
|----------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| TRH (días)                 | 5      | 10    | 15    | 20    | 5      | 10    | 15    | 20    |
| Replica 1 (mg/L)           | 75     | 69    | 55    | 43    | 69     | 75    | 79    | 86    |
| Replica 2 (mg/L)           | 71     | 71    | 50    | 39    | 71     | 67    | 77    | 78    |
| Replica 3 (mg/L)           | 65     | 65    | 51    | 40    | 67     | 76    | 75    | 77    |
| <b>Desviación estándar</b> | 5,03   | 3,06  | 2,65  | 2,08  | 2,00   | 4,93  | 2,00  | 4,93  |
| <b>Promedio (mg/L)</b>     | 70,33  | 68,33 | 52,00 | 40,67 | 69,00  | 72,67 | 77,00 | 80,33 |

Fuente: Autor, 2024.

En el **Gráfico 3** se presentan los resultados obtenidos en este parámetro y planteados en la tabla anterior.

**Gráfico 3. Resultados promedios DQO.**



**Fuente:** Autor, 2024.

En el caso de la Demanda Química de Oxígeno, la mayor remoción se obtuvo con la especie Pistia, alcanzando un 50,44% al TRH 20 días, mientras que Elodea mostró su máxima remoción del 15,85% en TRH 5 días. Mosoarca et al., (2018) y Sankaranarayanan et al., (2023) encontraron que en la fitorremediación de aguas residuales con la especie Elodea, la remoción estaría por encima del 50%, en este estudio el resultado con Elodea no alcanzó a ese valor, ya que esta especie mostró ser más sensible que la Pistia Stratiotes para un tiempo de retención de 15 y 20 días, lo que degradó el material, aportando biomasa al agua por muerte de tejido vegetal. Mientras que en otros casos, en el tratamiento realizado a los 20 días por Delgado Vasquez, (2021) para aguas residuales con la especie Pistia, tratamiento para el cual reporta una remoción de 15,68% , resaltando que, el tratamiento reportado en este estudio supera este resultado en el caso de Pistia con el mismo tiempo, alcanzando una remoción del 50,44, como se aprecia en la **Tabla 11**, donde se observa el



comportamiento de la remoción de la DQO, destacándose que la especie Pistia presenta un rendimiento superior en comparación con la Elodea.

**Tabla 11. Porcentajes de remoción de DQO.**

| TRH (DIAS) | % remoción Pistia S. | % remoción Elodea |
|------------|----------------------|-------------------|
| 5          | 14,23%               | 15,85%            |
| 10         | 16,6%                | 11,44%            |
| 15         | 36,58%               | 6,09%             |
| 20         | 50,44%               | 2,03%             |

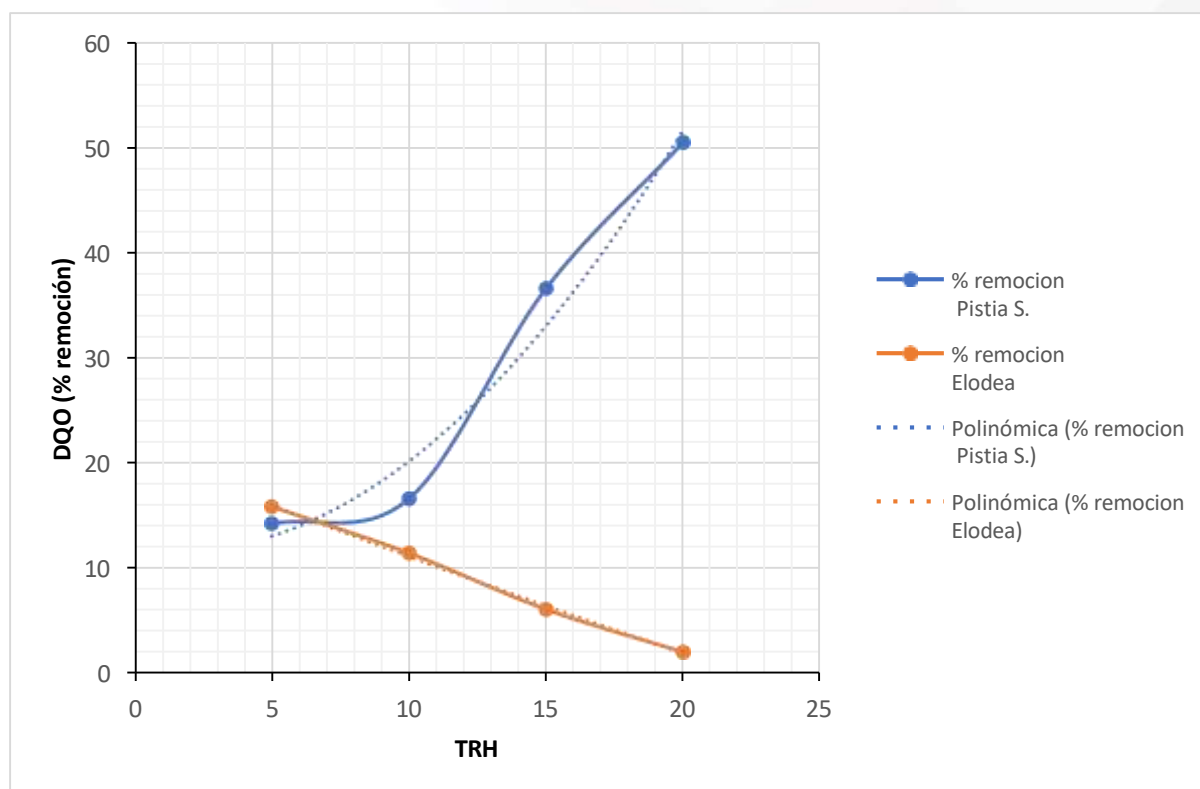
**Fuente:** Autor, 2024.

Según los resultados obtenidos, la DQO muestra una variación significativa en cada uno de los tiempos de retención y con cada una de las macrófitas. El tratamiento con la especie Elodea fue el menos efectivo en este parámetro, ya que la remoción disminuyó a medida que aumentó el tiempo de retención.

Por su parte, en el cumplimiento de la normativa Ecuatoriana Acuerdo Ministerial 097-a (2016), establece que el límite para DQO es de 500 mg/L, esto indicaría que lo reportado en este estudio se encuentra dentro de lo establecido. Por otro lado, aunque los valores reportados fueron bajos, esto debido a que se tratan de aguas residuales industriales de autolavado, donde la materia orgánica no es abundante, la efectividad de remoción se ve reflejada en la reducción de DQO en el tratamiento con la especie Pistia. Tendencia similar a la registrada por Ali et al. (2024) donde reportaron que Pistia logró una remoción del 45% al TRH 20 días en aguas residuales, lo que demuestra que para el tratamiento de agua residual de los autolavados se presenta un mejor desempeño.

Adicional a esto, en el **Gráfico 4** puede apreciarse la tendencia de comportamiento de la remoción de DQO respecto a cada uno de los tiempos de retención y el tipo de planta. Para la remoción de la DQO, las macrófitas presentan una tendencia que se ajusta a un comportamiento de una ecuación polinómica de grado 2, pero contrario entre sí.

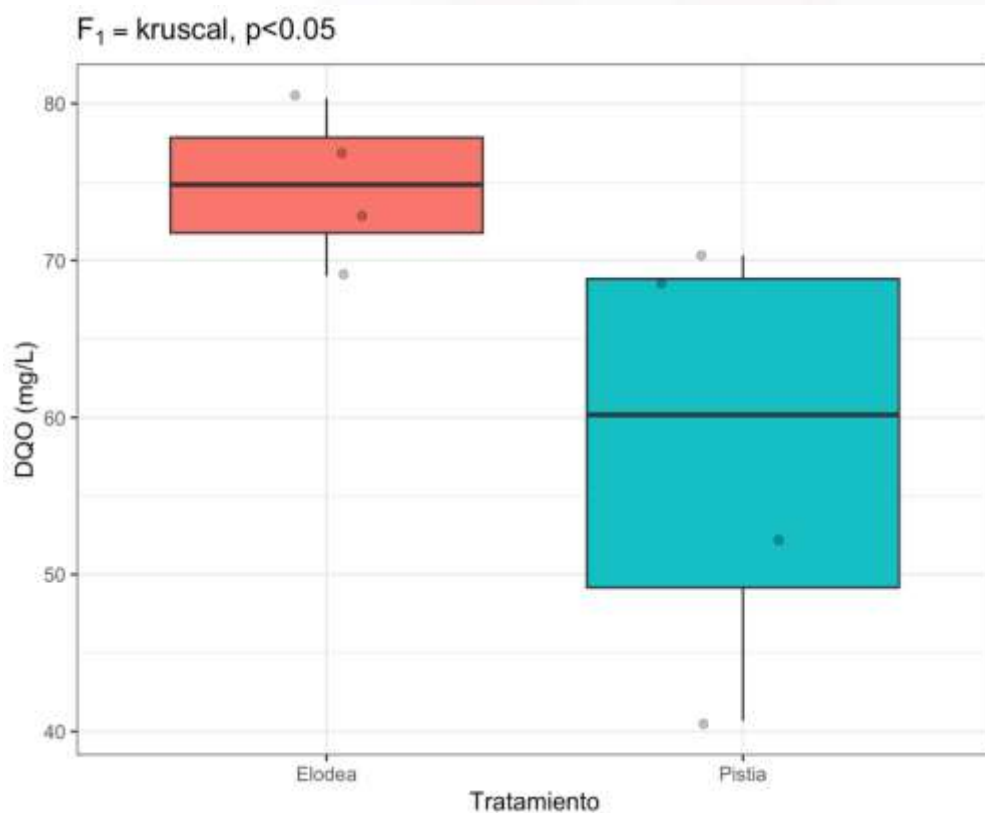
**Gráfico 4. Porcentajes de remoción DQO vs TRH**



**Fuente:** Autor, 2024.

En relación a los resultados obtenidos en los análisis estadísticos para la DQO, se observó que los datos presentan una significancia en la normalidad, lo que se traduce en que los datos siguen un comportamiento normal en ambas macrófitas: al realizar la prueba de igualdad de varianzas, este parámetro presentó evidencia estadísticamente significativa entre los tratamientos con las especies Pistia y Elodea, como se observa en la **Figura 10** donde los valores promedio y extremos del boxplot muestran diferencias significativas, la especie Pistia destacó por lograr una mayor reducción de DQO, con una diferencia del 45%. Por último, esta variable presentó una correlación positiva media con el parámetro DBO5.

Figura 10. Boxplot DQO



Fuente: Autor, 2024.

### DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO<sub>5</sub>)

Del mismo modo que la DQO, para LA DBO<sub>5</sub> se realizaron mediciones por triplicado y el valor que se tomó para los cálculos de remoción de DBO<sub>5</sub> de cada TRH fue el promedio de las mediciones, como se observa en la **Tabla 12**.

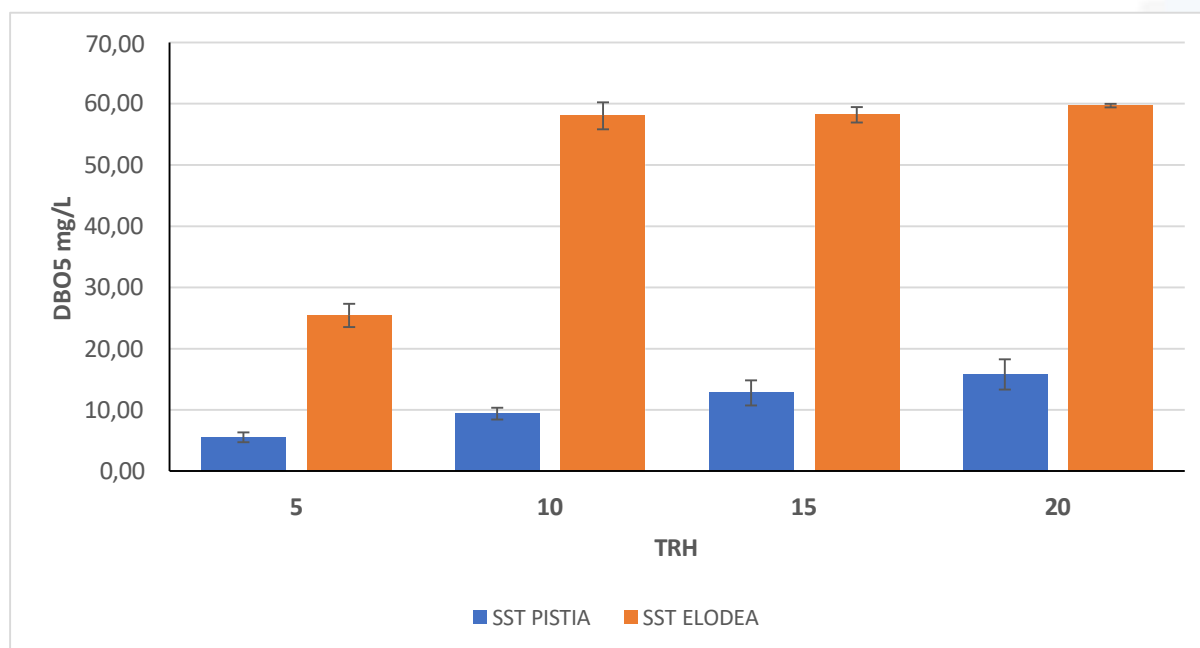
**Tabla 12. Replicas y desviación estándar para DBO<sub>5</sub>.**

| Macrófita           | PISTIA |      |       |       | ELODEA |       |       |             |
|---------------------|--------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------------|
|                     | 5      | 10   | 15    | 20    | 5      | 10    | 15    | 20          |
| Replica 1 (mg/L)    | 6,3    | 10,4 | 14,2  | 18,5  | 25,4   | 58    | 58    | 60          |
| Replica 2 (mg/L)    | 5,5    | 8,5  | 11,3  | 15,1  | 27,3   | 55,8  | 59,5  | <u>59,5</u> |
| Replica 3 (mg/L)    | 4,7    | 9,2  | 12,1  | 13,7  | 23,5   | 60,2  | 57    | 59,5        |
| Desviación estándar | 0,80   | 0,96 | 2,05  | 2,47  | 1,90   | 2,20  | 1,26  | 0,29        |
| Promedio (mg/L)     | 5,50   | 9,37 | 12,75 | 15,77 | 25,40  | 58,00 | 58,17 | 59,67       |

Fuente: Autor, 2024.

En el **Gráfico 5** se presentan los resultados obtenidos en este parámetro y planteados en la tabla anterior.

**Gráfico 5. Resultados promedios BDO5.**



Fuente: Autor, 2024.

En el caso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, la mayor remoción se obtuvo con la especie Pistia, alcanzando un 86,9% al TRH 5 días, mientras que Elodea mostró su máxima remoción del 39,5% en el mismo TRH 5 días. Datos semejantes a los reportados por Del Aguila Barrera & Saavedra Córdova (2021), en su trabajo remediación de aguas industriales de palma aceitera con Pistia stratiotes,

la DBO registró una carga muy alta, aun así, fue remediada en un 83% en un TRH de 5 días, esto sugiere que los mejores rendimientos en remoción se pueden obtener temprano en el tratamiento de aguas industriales. Desde el punto de vista de la normativa ambiental Acuerdo Ministerial 097-a (2016), el límite establecido es de 250mg/L, para este caso los resultados estarían cumpliendo la norma, aunque merece la pena indicar que la especie Pistia presenta una mayor capacidad depuradora en la reducción del DBO, sobre la Elodea.

En la **Tabla 13** se observa el comportamiento de la remoción de la DBO en el tratamiento, destacándose que la especie Pistia presenta un rendimiento superior en comparación con la Elodea.

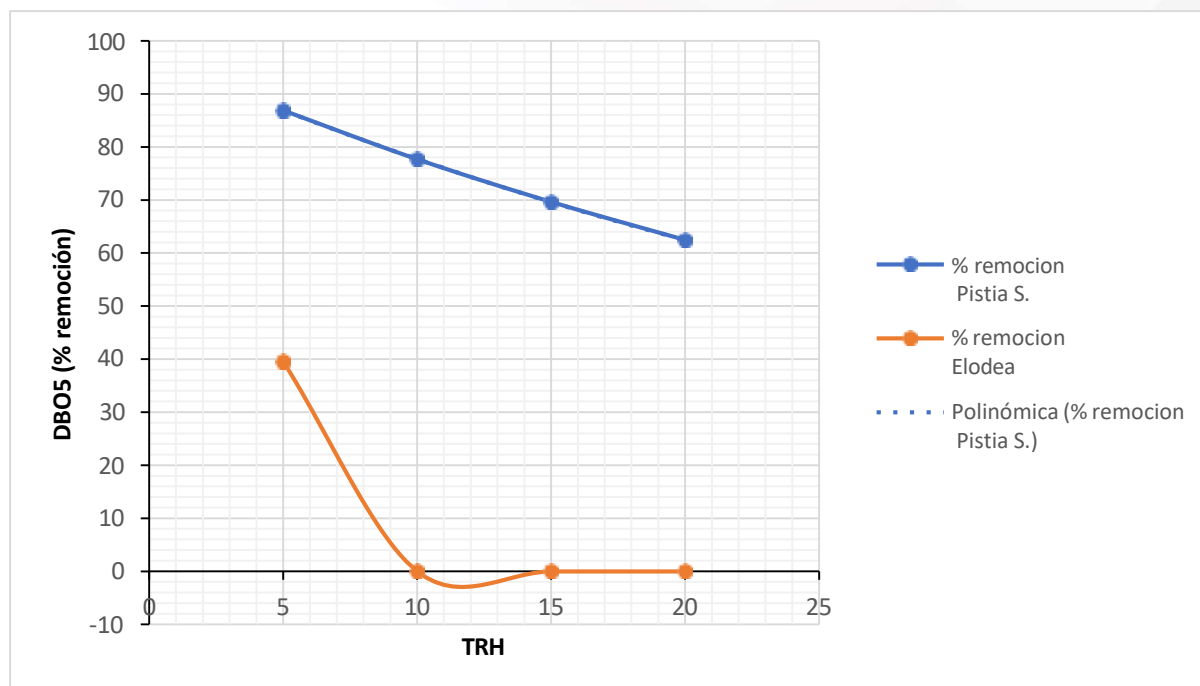
**Tabla 13. Porcentajes de remoción de DBOs.**

| TRH (DIAS) | % remoción Pistia S. | % remoción Elodea |
|------------|----------------------|-------------------|
| 5          | 86,9%                | 39,5%             |
| 10         | 77,69%               | 0                 |
| 15         | 69,64%               | 0                 |
| 20         | 62,45%               | 0                 |

**Fuente:** Autor, 2024.

En adición, en el **Gráfico 6** puede apreciarse la tendencia de comportamiento de la remoción de DBO respecto a cada uno de los tiempos de retención. Muestra una tendencia decreciente a medida que aumenta el TRH y que se ajusta a una curva polinómica para apreciar la tendencia. Hacia el TRH de 5 días, se alcanza un valor máximo cercano al 90% de remoción para la especie Pistia, que desciende gradualmente hasta aproximadamente un 60% en el TRH de 20 días. En contraposición al rendimiento inferior reflejado por Elodea.

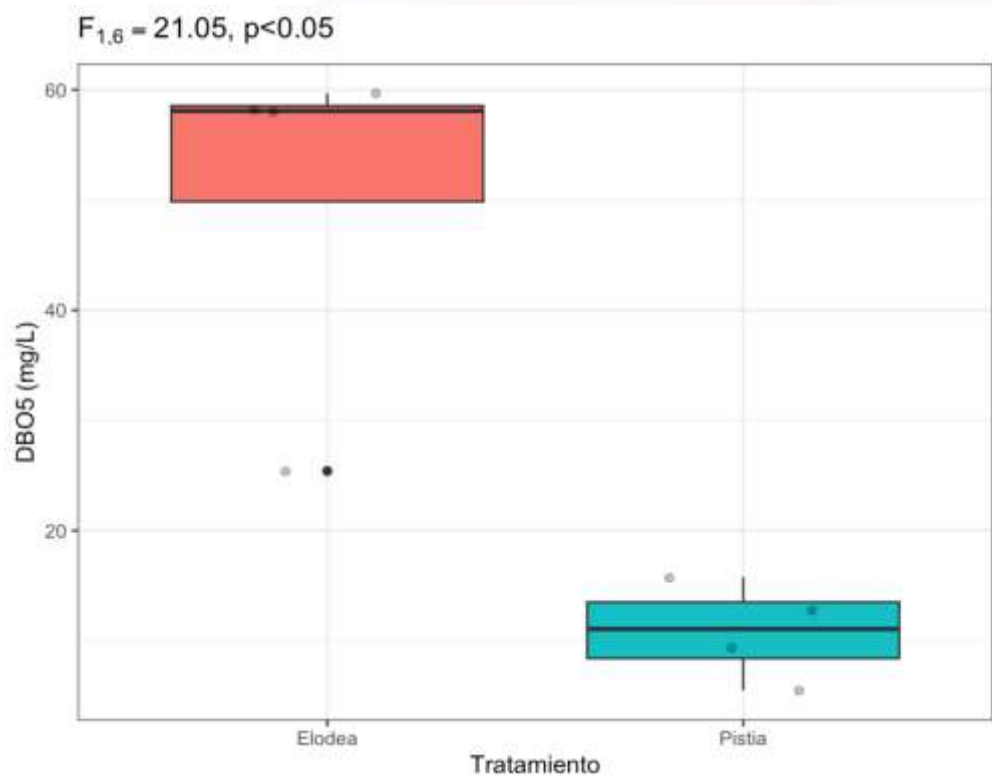
**Gráfico 6. Porcentajes de remoción DBO<sub>5</sub> vs TRH**



**Fuente:** Autor, 2024.

De acuerdo con el análisis estadístico el parámetro DBO<sub>5</sub> presenta una significancia estadística para la prueba de normalidad y los datos poseen un comportamiento normal para las dos especies de macrófitas; así mismo, la prueba de homogeneidad de Barlett si presenta significancia estadística lo cual indica que los grupos no cuentan con la misma varianza; también para la prueba ANOVA, la significancia de las diferencias entre los tratamientos de Pistia y Elodea, como se puede apreciar en la **Figura 11**, gráficamente, se observa una diferencia notable entre los valores medios y extremos del boxplot. En cuanto a las estadísticas obtenidas para este parámetro, el tratamiento más eficiente fue el de la especie Pistia, con una reducción de la DBO<sub>5</sub> de 45% mayor en comparación con el tratamiento con Elodea.

Figura 11. Boxplot DBO<sub>5</sub>



Fuente: Autor, 2024.

### SOLIDOS SEDIMENTABLES (SS)

Para el caso de los sólidos sedimentables, solo fueron observables para el TRH 15, para ambos tratamientos, y con un valor no superior a 3.5 ml/L, tal como se puede observar en la **Figura 12** teniendo el agua tratada con especie Elodea a la izquierda y con Pistia a la derecha.

**Figura 12. Sólidos sedimentables en TRH 15**



**Fuente:** Autor, 2024.

Por su parte en el Acuerdo Ministerial 097-a, (2016), el límite de descarga permitido para este parámetro es de 20 mg/L, esto indica que al TRH 15 en adelante ambas macrófitas cumplirían la norma. Por otro lado, los sólidos sedimentables tienen implicaciones importantes, ya que, junto con otros parámetros como la turbidez, dificultan el paso de la luz solar, lo que reduce el proceso fotosintético de las plantas acuáticas. Esto provoca una disminución en los niveles de oxígeno en el agua, favoreciendo la aparición de un estado anaeróbico no deseado (Ruiz, 2018). Es importante destacar que los sólidos sedimentables fueron visibles únicamente en el TRH de 15 días y no se pueden atribuir al agua residual cruda, sino al material vegetal desprendido de las plantas.

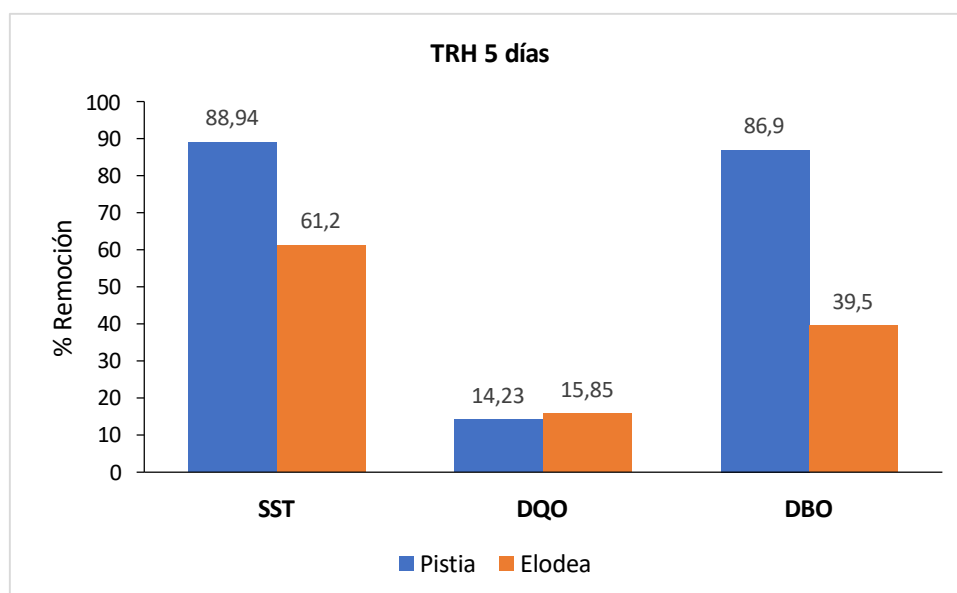


### 4.1.3. Tiempo de retención hidráulica vs cada parámetro

Además de evaluar el comportamiento de cada parámetro de forma individual, es crucial identificar la tendencia general en cada tiempo de retención, para determinar cuál de ellos ofrece una mayor capacidad de tratamiento y proporcionaría los mayores beneficios.

En el tiempo de retención de 5 días, según los datos presentados en el **Gráfico 7**, se observó que todos los parámetros, excepto la DQO, lograron una remoción superior al 50%, lo cual es notable considerando los valores iniciales del tratamiento.

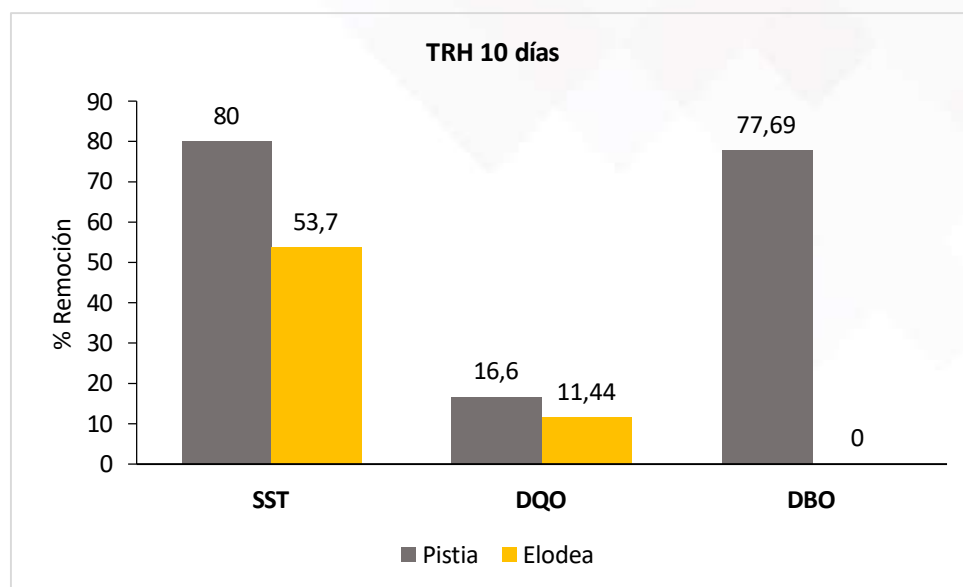
**Gráfico 7. Resultados de tiempo de retención a los 5 días.**



**Fuente:** Autor, 2024.

En el tiempo de retención de 10 días, se observó un aumento de 1,16% en la remoción de DQO en el tratamiento con la especie Pistia, en comparación con el TRH anterior, mientras que disminuyó en el tratamiento con Elodea, debido a la pérdida de tejido vegetal de esta macrófita. Sin embargo, los valores de los demás parámetros se mantuvieron con remociones superiores al 50%, como se muestra en el **Gráfico 8**.

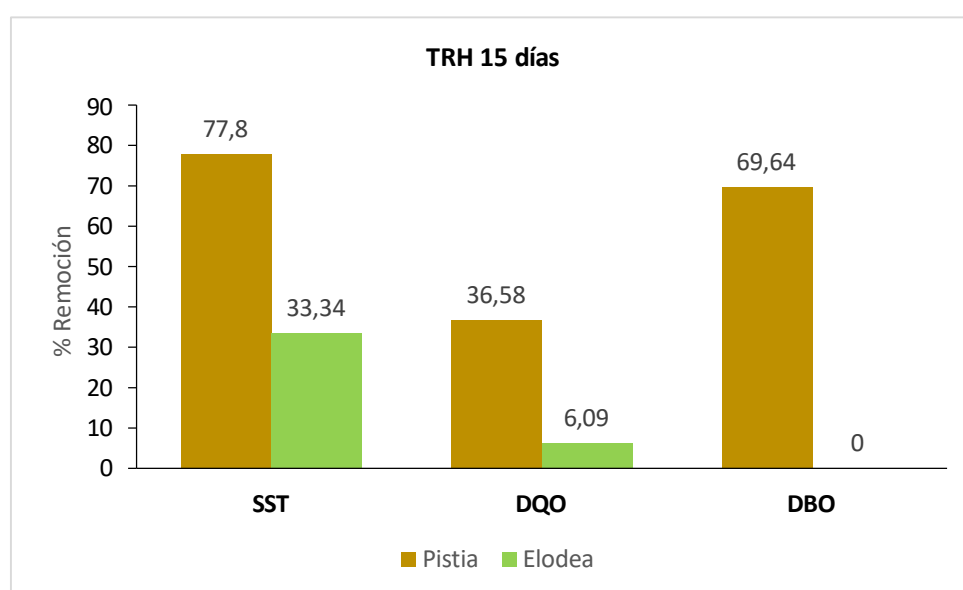
**Gráfico 8. Resultados de tiempo de retención a los 10 días.**



**Fuente:** Autor, 2024.

Para el tiempo de retención de 10 días, se observó un incremento en la remoción de DQO en un 19% con el tratamiento de la especie Pistia en comparación con el TRH de 10 días. Así mismo se mantiene el descenso en la eficacia de remoción DQO en el tratamiento con Elodea, como se observa en el **Gráfico 9**.

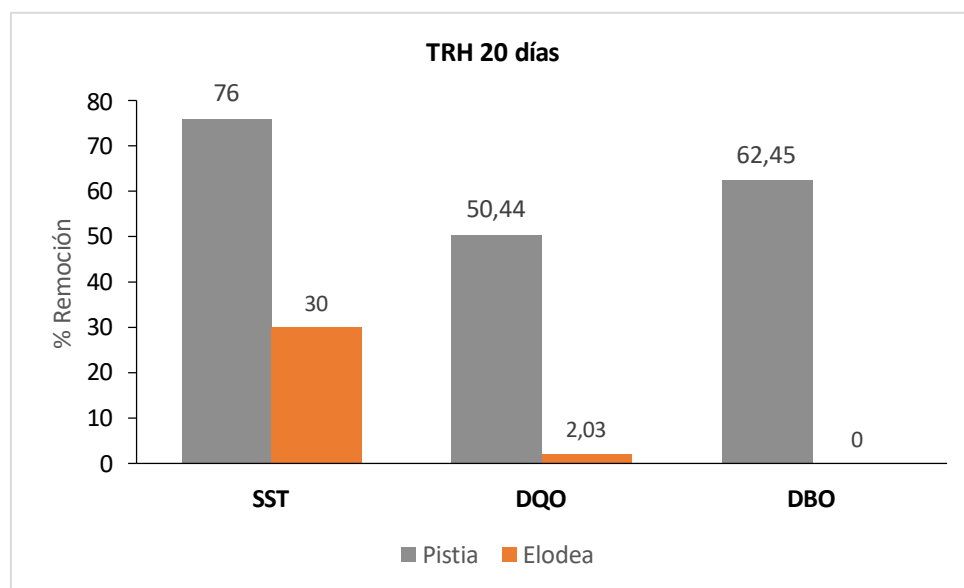
**Gráfico 9. Resultados de tiempo de retención a los 15 días.**



**Fuente:** Autor, 2024.

Por su parte en el último tiempo de retención, a los 20 días en general se obtuvieron remociones superiores al 50% en cada parámetro, pero solo evidente en el tratamiento con la especie Pistia, para el caso de la especie Elodea, los valores de remoción siguen descendiendo, como se aprecia en el **Gráfico 10**, para el caso de la DBO5, con Elodea no se obtuvo remoción del parámetro debido a la muerte del tejido vegetal en el tratamiento.

**Gráfico 10. Resultados de tiempo de retención a los 20 días.**



**Fuente:** Autor, 2024.

En resumen, el tiempo de retención que mejores resultados presentó en cuanto a la mayoría de parámetros fue a los 5 días. No obstante, se evaluará el tiempo de retención que mejor se adapte a los requerimientos del autolavado, garantizando a la vez una remoción eficiente de los contaminantes.

**Tabla 14. Comparación valor inicial y valor TRH**

| Parámetro | Macrófita | Agua<br>cruda | Pistia |       |       |       |       | Elodea |       |       |    |
|-----------|-----------|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|----|
|           | TRH       |               | 0      | 5     | 10    | 15    | 20    | 5      | 10    | 15    | 20 |
|           | Unidad    |               |        |       |       |       |       |        |       |       |    |
| pH        | -         | 8,1           | 7,11   | 7,08  | 7,42  | 7,80  | 7,35  | 6,97   | 7,16  | 7,58  |    |
| SST       | mg/L      | 18            | 1,67   | 3,00  | 3,33  | 3,67  | 7,00  | 8,33   | 12,00 | 12,67 |    |
| DQO       | mg/L      | 82            | 70,33  | 68,33 | 52,00 | 40,67 | 69,00 | 72,67  | 77,00 | 80,33 |    |
| DBO       | mg/L      | 42            | 5,50   | 9,37  | 12,75 | 15,77 | 25,40 | 58,00  | 58,17 | 59,67 |    |
| SS        | mg/L      | 3,55          | 3,55   | 3,55  | 3,55  | 3,55  | 3,55  | 3,55   | 3,55  | 3,55  |    |

Fuente: Autor, 2024.

Finalmente, como se muestra en la **Tabla 14**, el tiempo de retención óptimo fue de 5 días, ya que, al comparar los resultados de cada TRH con los valores iniciales del agua cruda, se observó la mayor reducción en los parámetros analizados a los 5 días, tanto para la especie Pistia como para Elodea. Además, los resultados indican que la especie Pistia logró una mayor reducción de contaminantes y materia orgánica en comparación con los valores del agua cruda.

## CORRELACIÓN DE TODAS LAS VARIABLES

Al realizar el análisis de Correlación de Spearman **Figura 13**, se comparó adicionalmente con las variables Oxígeno disuelto (OD) y Temperatura (Tem).

**Figura 13. Correlación entre todas las variables.**



**Fuente:** Autor, 2024.

Se encontró que para el caso de la variable DQO presenta una correlación positiva media con la variable SST ( $r=0,67$ ), al igual que con la variable DBO5 ( $r=0,67$ ). En cuanto a la variable SST esta presenta una correlación muy marcada con la variable DBO5 ( $r= 1,00$ ), esta correlación con estos parámetros sugiere que una variación en uno de estos parámetros afectará directamente al otro en mayor o igual medida. Por último, de las variables adicionales, solo OD presentó una correlación positiva con las variables (SST, DQO y DBO5). Pudiéndose deberse a las interacciones bioquímicas propias de la degradación de materia orgánica y disponibilidad de oxígeno en los reactores.

## CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

A través de la caracterización fisicoquímica del agua cruda de autolavado les permite a los administradores del establecimiento entender la importancia de monitorear la calidad del agua que se descarga desde las instalaciones, tanto en días de alta afluencia de clientes como en aquellos con menor actividad.

De acuerdo con lo obtenido en el análisis fisicoquímico, se determinó que el agua residual del autolavado presentó niveles moderados de pH (alcalino), DQO y DBO5, cumpliendo con los límites permisibles establecidos por la normativa ecuatoriana. Así mismo, los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos sedimentables (SS) también estuvieron por debajo de los límites, lo que sugiere que los contaminantes principales podrían ser los detergentes y restos de hidrocarburos provenientes del proceso de lavado de vehículos.

El tratamiento con la especie *Pistia stratiotes* mostró mejores resultados de remoción en la mayoría de los parámetros evaluados en comparación con *Elodea*, con un rendimiento óptimo en los primeros 5 días de TRH. Alcanzó un mejor resultado en la reducción de pH superior a *Elodea* con 0,7 unidades de diferencia. La remoción de DBO5 y SST fue más eficiente con *Pistia*, alcanzando un 86.9% y un 88.94% de remoción respectivamente. *Elodea* presentó un rendimiento inferior, con un 39.5% de remoción de DBO5. En términos de DQO, *Pistia* alcanzó una remoción del 50.44% a los 20 días de TRH, mientras que *Elodea* fue menos eficiente, con una remoción máxima del 15.85% a los 5 días, lo que sugiere una sensibilidad de esta macrófita al aumento del tiempo de retención.

El TRH de 5 días resultó ser el más eficiente para la remoción de contaminantes, superando el 50% en la mayoría de los parámetros, lo que demuestra que el tratamiento de aguas residuales de autolavado puede ser optimizado en cortos periodos de retención. Los tratamientos con la especie *Pistia* demostraron ser más consistentes y eficaces en la reducción de materia orgánica en comparación con *Elodea*, lo que hace de la especie *Pistia* una mejor opción para este tipo de sistemas de tratamiento.

## 5.2. Recomendaciones

La administración del autolavado podría considerar la implementación de un sistema de macrófitas en flotación como tratamiento para mejorar el vertido de aguas residuales al alcantarillado, ya que este sistema contribuirá a reducir la carga contaminante. Aunque las inspecciones por parte de las autoridades sanitarias y ambientales no han sido frecuentes, el autolavado debería avanzar en el tratamiento de sus aguas de manera preventiva.

Considerando que el TRH de 5 días mostró el mejor rendimiento en la mayoría de los parámetros evaluados, se sugiere ajustar los sistemas de tratamiento para que operen con este tiempo de retención, logrando una remoción eficiente en un corto periodo de tiempo. Asimismo, es esencial establecer un plan de monitoreo continuo de los parámetros fisicoquímicos (pH, DQO, DBO5, SST, etc.) para garantizar que el sistema mantenga un rendimiento óptimo, especialmente durante picos de actividad del autolavado.

Sería beneficioso llevar a cabo estudios adicionales que evalúen la efectividad de las macrófitas en diferentes condiciones de temperatura, concentración de contaminantes y caudal, como también explorar el comportamiento de remoción con otras variables, como TPH (hidrocarburos totales), grasas y detergentes, para determinar su rendimiento en contextos variados y mejorar el diseño de futuros sistemas de tratamiento.

Para la recolección de muestras y el análisis de los parámetros fisicoquímicos, se deberán realizar al menos 3 réplicas de cada prueba y de cada parámetro evaluado. Esto permitirá reducir al máximo el margen de error, obtener más datos para el análisis estadístico y validar de manera más precisa el porcentaje de remoción que cada macrófita es capaz de lograr en relación con cada parámetro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuerdo Ministerial 097-a. (2016). *Ministerio del ambiente* (pp. 301–302). Ministerio del Ambiente del Ecuador. <https://www.gob.ec/regulaciones/acuerdo-ministerial-097-anexos-normativa-reforma-libro-vi-texto-unificado-legislacion-secundaria-ministerio-ambiente>
- Agencia de Regulación y Control del Agua. (2022). *Plan Estratégico Institucional de la Agencia de Regulación y Control del Agua 2022 – 2025*. <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/2022/07/Plan-Estrategico-Institucional-2022-2025-con-firmas-signed-signed-signed-signed.pdf>
- Al-Khafaji, M. S., Al-Ani, F. H., & Ibrahim, A. F. (2018). Removal of some heavy metals from industrial wastewater by Lemna minor. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1077–1082. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-017-1112-x>
- Ali, M., Aslam, A., Qadeer, A., Javied, S., Nisar, N., Hassan, N., Hussain, A., Ali, B., Iqbal, R., & Chaudhary, T. (2024). Domestic wastewater treatment by Pistia stratiotes in constructed wetland. *Scientific Reports*, 14(1), 7553. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-57329-y>
- Aly, O. H. I. (2015). A new development of wastewater treatment unit for paint shop in vehicle industry. *International Journal of Sciences Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 21(1), 15–25. <https://core.ac.uk/download/pdf/249334533.pdf>
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for examination of water and wastewater* (23rd ed., Vol. 5, Issue 2). American Public Health Association. [https://www.academia.edu/105197442/Standard\\_Methods\\_For\\_the\\_Examination\\_23th\\_edition](https://www.academia.edu/105197442/Standard_Methods_For_the_Examination_23th_edition)
- Beascoechea, E. d, Muñoz, J. d, Fernández, D., & Fernández, J. (2001). Manual de fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación. *Madrid: Universidad Politécnica de Madrid*.
- Berekaa, M. M. (2016). Nanotechnology in wastewater treatment; influence of nanomaterials on microbial systems. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 5(1), 713–726.



<https://kh.aquaenergyexpo.com/wp-content/uploads/2022/11/Nanotechnology-in-Wastewater-Treatment-Influence-of-Nanomaterials-on-Microbial-Systems.pdf>

Boulware, E. W. B. (2013). *Alternative water sources and wastewater management*. McGraw Hill Professional.

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071719513>

Briñez, K. J., Guarnizo, J. C., & Arias, S. A. (2012). Calidad del agua para consumo humano en el departamento del Tolima. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 30(2), 175–182. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v30n2/v30n2a06.pdf>

CABI. (2005). *Bioscience Suiza Centro informe a la Agencia Suiza para el Medio Ambiente*. <https://www.cabi.org/>

Caldera, Y., Rodríguez, Y., Oñate, H., Prato, J., & Gutiérrez, E. (2011). Eficiencia del quitosano como coagulante durante el tratamiento de aguas de baja turbidez asociadas a la producción de petróleo. *Revista Tecnocientífica URU*, 1(1), 45–52. [https://uru.edu/fondoeditorial/revista/pdf/rtcun1-resumenes/Eficiencia del quitosano como coagulante.pdf](https://uru.edu/fondoeditorial/revista/pdf/rtcun1-resumenes/Eficiencia%20del%20quitosano%20como%20coagulante.pdf)

Carrillo Quispe, L. P. (2014). *Análisis comparativo de la capacidad depuradora de fosfatos y nitratos utilizando las macrófitas Eichhornia crassipes y Elodea potamogeton en aguas residuales domésticas en la zonal 14 Comas*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/138535>

Ceschin, S., Sgambato, V., Ellwood, N. T. W., & Zuccarello, V. (2019). Phytoremediation performance of Lemna communities in a constructed wetland system for wastewater treatment. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 67–71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098847218315946>

Constituyente, A. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/45208547/constitucion-ecuador-libre.pdf?1461965702=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DConstitucion\\_ecuador.pdf&Expires=1728516909&Signature=lfVdkhHJJD~hVltLr37x3GF7zYyOvs7N4ReL0iHx2za5oQdLNi](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/45208547/constitucion-ecuador-libre.pdf?1461965702=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DConstitucion_ecuador.pdf&Expires=1728516909&Signature=lfVdkhHJJD~hVltLr37x3GF7zYyOvs7N4ReL0iHx2za5oQdLNi)

P8EGLaitiqZ

- Contreras, K., Contreras, J., Corti, M., De Sousa, J., Durán, M., & Escalante, M. (2008). El agua un recurso para preservar. *Informe Científico. Universidad de Los Ángeles. Mérida, Venezuela*. <https://www.academia.edu/7277814/Agua>
- Daneshyar, A., & Ghaedi, M. (2015). Application of microfiltration membrane for treatment of car wash effluent by Taguchi method prediction. *Iranian Journal of Environmental Technology*, 1(2), 1–10. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/89655926/article\\_15586\\_19736a545b592b6d66f996352e8a3e5a-libre.pdf?1660520901=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DApplication\\_of\\_microfiltration\\_membrane.pdf&Expires=1726449537&Signature=DNxhL21k1Qt6V4pW](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/89655926/article_15586_19736a545b592b6d66f996352e8a3e5a-libre.pdf?1660520901=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DApplication_of_microfiltration_membrane.pdf&Expires=1726449537&Signature=DNxhL21k1Qt6V4pW)
- De Souza, D. C., Fontaneli, A. C., Peron, A. P., & Froehner, S. (2021). Physiological effects of exposure to copper and chromium in three floating aquatic macrophyte species. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 1–12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-020-04960-w>
- Del Aguila Barrera, M. A., & Saavedra Córdova, Y. K. (2021). *Capacidad de fitorremediación de plantas macrófitas en aguas residuales industriales de palma aceitera, Pongo de Caynarachi*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/82750>
- Delgado Vasquez, J. S. (2021). *Evaluación del aporte de las plantas acuáticas Pistia Stratiotes y Eichhornia Crassipes en el tratamiento de aguas residuales municipales del distrito de Reque provincia de Chiclayo* [Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/3965>
- Echarri, L. (2007). Contaminación del agua. In *Población, Ecología y Ambiente, Universidad de Navarra, Madrid-España*. [https://www.academia.edu/5356696/Tema\\_8\\_Contaminacion\\_del\\_agua\\_07](https://www.academia.edu/5356696/Tema_8_Contaminacion_del_agua_07)
- El-Ashtouky, E. S. Z., Amin, N. K., & Fouad, Y. O. (2015). Treatment of real wastewater produced from Mobil car wash station using electrocoagulation technique. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 1–11.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4836-4>

- Garavito-Bermúdez, G. I., Ospina-Romero, L. V., & Ospina-Mora, D. C. (2020). Evaluación de un sistema a escala laboratorio, de un filtro de macrófitas en flotación como tratamiento de aguas residuales de un autolavado. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 12(1), 10–20. <http://www.scielo.org.co/pdf/logos/v12n1/2422-4200-logos-12-01-10.pdf>
- Garbisu, C., Becerril, J. M., Epelde, L., & Alkorta, L. (2007). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas*, 16(2). <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/127>
- Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Asian J Energy Environ*, 6(4), 18. <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/AJEE/10262422.pdf>
- González-Cabrera, O., Ruiz-Pérez, T., Claro-Pérez, M., Pérez-Pino, N. M., Pérez-Gálvez, G., & Collazo-Alfonso, L. (2014). Estudio de patentes sobre tecnologías para tratamiento de agua y el agua residual. *Transinformação*, 26(3), 339–347. <https://www.scielo.br/j/tinf/a/kVQQ7TTvGYZN54tbQmSqpd/?lang=es>
- González Rivera, L. (2020). *Propuesta de un sistema para el tratamiento de aguas residuales de la empresa Food & Drinks Alimentos SAS a nivel laboratorio*. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8004>
- Guamán Mendoza, Á. R. (2014). *Gestión ambiental en la Empresa Lavandería y Tintorería de Jeans Mundo Color y su incidencia en el recurso Agua* [Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas ...]. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/6983>
- Hejna, M., Onelli, E., Moscatelli, A., Bellotto, M., Cristiani, C., Stroppa, N., & Rossi, L. (2021). Heavy-metal phytoremediation from livestock wastewater and exploitation of exhausted biomass. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2239. <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/5/2239>
- Heredia Moyano, S. F., Gavilanes Montoya, A., & Heredia Moyano, M. F. (2020).

DEPURACIÓN DE AGUA CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS EN EL RÍO RUMIYACU, MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA PROVINCIA DE FRANCISCO DE ORELLANA. *Perfiles*, 1(24), 84–93. <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/perfiles/v1n24/2477-9105-perfiles-1-24-00084.pdf>

Hu, H., Li, X., Wu, S., & Yang, C. (2020). Sustainable livestock wastewater treatment via phytoremediation: Current status and future perspectives. *Bioresource Technology*, 315, 123809. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420310816>

Hutchinson, S. L., Banks, M. K., & Schwab, A. P. (2001). Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. *Journal of Environmental Quality*, 30(2), 395–403. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2001.302395x>

INEN. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria NTE INEN 2169:2013 Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Manejo y Conservación de Muestras*. [https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE INEN 2169 - AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS.pdf](https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE%20INEN%202169%20-%20AGUA.%20CALIDAD%20DEL%20AGUA.%20MUESTREO.%20MANEJO%20Y%20CONSERVACION%20DE%20MUESTRAS.pdf)

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2023). *Estadística de Información Ambiental Económica en gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. Gestión de Agua Potable y Saneamiento 2022*. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas\\_Ambientales/Municipios\\_2022/Agua\\_potable\\_alcantarillado/PR ESENTACION\\_APA\\_2022\\_VFINAL.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2022/Agua_potable_alcantarillado/PRESENTACION_APA_2022_VFINAL.pdf)

JAIME, L. I. G. (2016). Filtros verdes. Humedales. Macrofitas. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización. *Escuela de Organización Industrial*, 16. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-nacional-de-ingenieria/evaluacion-del-impacto-ambiental/filtros-verdes-humedales-y-macrofitas-magua-2016/66102763>

Kang, J., Lu, L., Zhan, W., Li, B., Li, D., Ren, Y., & Liu, D. (2011). Photocatalytic

pretreatment of oily wastewater from the restaurant by a vacuum ultraviolet/TiO<sub>2</sub> system. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 849–854.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410015013>

Lahoz-Beltrá, R., Ortega-Escobar, J., & Montraveta, C. F. (1995). *Métodos estadísticos en biología del comportamiento*. Editorial Complutense.

Lenntech, B. (2006). Agua residual & purificación del aire. *Delft, Holanda: Rotterdamseweg*. <https://www.lenntech.es/home-esp.htm>

Loos, R., Carvalho, R., António, D. C., Comero, S., Locoro, G., Tavazzi, S., Paracchini, B., Ghiani, M., Lettieri, T., & Blaha, L. (2013). EU-wide monitoring survey on emerging polar organic contaminants in wastewater treatment plant effluents. *Water Research*, 47(17), 6475–6487.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135413006647>

Malakootian, M., Toolabi, A., Derakhshan, Z., & Ghaneian, M. T. (2016). Efficiency of coagulation and flocculation process combined with chemical sequestration in removal of organic and inorganic contaminants from automotive industry sewage. *Journal of Community Health Research*, 5(3), 182–194.  
<https://jhr.ssu.ac.ir/article-1-299-en.pdf>

Martelo, J., & Lara Borrero, J. A. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221–243.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-91652012000100011&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-91652012000100011&script=sci_arttext)

Martínez, A. D. (2006). Métodos de análisis físicos y espectrofotométricos para el análisis de aguas residuales. *Tecnología En Marcha*, 19(2), 31–40.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835509>

Martínez, F., & Ysase, T. (2007). *DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS* [UNIVERSIDAD DE ORIENTE NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI].  
<http://ri2.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/813/2/Tesis-IC007-M53.pdf>

Medina, Y. F., De Miguel, E. O., & Rodríguez, J. J. S. (2012). Tendencias actuales en

- las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. *Ingeniería Civil*, 168, 137–143. [https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua\\_articulo/ingcivil/p-131-143.pdf](https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/ingcivil/p-131-143.pdf)
- Mejía-López, A., Cabrera, M., & Carrillo, Y. (2017). Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala de laboratorio. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de La Vida*, 26(2), 64–71. <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/lgr/v26n2/1390-3799-lgr-26-02-00064.pdf>
- METCALF, & EDDY. (1995). Tratamiento, vertimiento y reutilización. In *Ingeniería de aguas residuales*. [https://www.academia.edu/45529169/INGENIERIA\\_DE\\_AGUAS\\_RESIDUALES\\_TRATAMIENTO\\_VERTIDO\\_Y\\_REUTILIZACION\\_Volumen\\_II\\_Metcalf\\_y\\_Eddie](https://www.academia.edu/45529169/INGENIERIA_DE_AGUAS_RESIDUALES_TRATAMIENTO_VERTIDO_Y_REUTILIZACION_Volumen_II_Metcalf_y_Eddie)
- Mirzaee, M. M., ZakeriNia, M., & Farasati, M. (2021). The effects of phytoremediation of treated urban wastewater on the discharge of surface and subsurface drippers (Case study: Gorgan wastewater treatment plant in northern Iran). *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100210. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821001701>
- Mosoarca, G., Vancea, C., Popa, S., & Boran, S. (2018). Adsorption, bioaccumulation and kinetics parameters of the phytoremediation of cobalt from wastewater using *Elodea canadensis*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 100, 733–739. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00128-018-2327-3>
- Musa, M. A., & Idrus, S. (2021). Physical and biological treatment technologies of slaughterhouse wastewater: a review. *Sustainability*, 13(9), 4656. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/9/4656>
- Mustafa, H. M., & Hayder, G. (2021). Recent studies on applications of aquatic weed plants in phytoremediation of wastewater: A review article. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 355–365. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920301131>

- Neira Mendez, J. X., & Chang Gómez, J. V. (2009). *Proyecto investigación 2007- demanda bioquímica de oxígeno*. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6157>
- PDOT-LA. (2019). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Lago Agrio*. 120. <http://lagoagrio.gob.ec/alcaldia/files/descargas/PDOT/PDOT-y-plan-uso-gestion-suelo-PUGS.pdf>
- Pérez Martín, F., Armenteros Ordóñez, T. de los Á., & Hernández Touse, J. P. (2016). Sistema de tratamiento para las aguas residuales en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Villa Clara. *Centro Azúcar*, 43(2), 68–75. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2223-48612016000200007&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2223-48612016000200007&script=sci_arttext&tlng=en)
- Poveda Ocaña, R. A. (2014). *Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizadas en el cantón Ambato, provincia de Tungurahua*. [https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8455/1/BQ 56 .pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/8455/1/BQ%2056.pdf)
- Qu, X., Alvarez, P. J. J., & Li, Q. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*, 47(12), 3931–3946. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135413001772>
- Quispe Benavides, K. L., & Ayala Amaringo, M. K. (2019). *Utilización de la Eichhornia crassipes y Lemna minor en la remoción de Nitrógeno y Fósforo, de las aguas residuales de la laguna de oxidación de la empresa EMAPACOP SA-Ucayali 2018*. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4238/000004197T-AMBIENTAL.pdf?sequence=1>
- Quispe, F. D. L., & Rebaza, L. U. M. T. (2022). Acción de dos macrófitas para el tratamiento del agua residual de las lagunas de estabilización de Magollo, Tacna–Perú. *Ciencia & Desarrollo*, 21(1), 29–39. <https://revistas.unjbg.edu.pe/index.php/cyd/article/view/1239/1698>
- Ramirez Amacifuen, K. P., & Paredes Vásquez, M. E. (2019). *Evaluación de dos especies macrófitas Pistia stratiotes y Eichhornia crassipes en la remoción de*

*contaminantes microbiológicos y químicos a través de un sistema de biofiltro en aguas residuales domésticas, Tarapoto–2018.*  
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/39476>

Ramos-Espinosa, M. G., Rodríguez-Sánchez, L. M., & Martínez-Cruz, P. (2007). Uso de macrófitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo. *Hidrobiológica*, 17, 7–15.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-88972007000400002&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-88972007000400002&script=sci_arttext)

Reynolds, K. A. (2002). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 4849.  
[https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/documentos\\_nuevos/DeLaLaveSepOct02.pdf](https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/documentos_nuevos/DeLaLaveSepOct02.pdf)

Rezania, S., Taib, S. M., Din, M. F. M., Dahalan, F. A., & Kamyab, H. (2016). Comprehensive review on phytotechnology: heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 587–599.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389416306860>

Ruiz Román, K. L. (2018). *Validación de métodos de ensayo para determinación de pH, conductividad, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y sólidos disueltos en aguas en el Laboratorio Ambiental Environovalab.*  
<https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/f8f8ff5c-1240-4772-96aa-a84fee0f3e4e/content>

Sankaranarayanan, V., Velusamy, S., Sankaran, P., & Kandasamy, K. (2023). Phytoremediation potential of *Elodea canadensis* for reduction of chromium—optimization using response surface methodology. *Desalination and Water Treatment*, 293, 192–199.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S194439862400972X>

SENAGUA. (2019). Plan Nacional de Riego y Drenaje 2019. *Secretaria Del Agua*, 30.  
<https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/05/Estrategia-Nacional-de-Calidad-del->



Agua\_2016-2030.pdf

- Shah, M., Hashmi, H. N., Ali, A., & Ghumman, A. R. (2014). Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 1–12. <https://link.springer.com/article/10.1186/2052-336X-12-106>
- Sytar, O., Ghosh, S., Malinska, H., Zivcak, M., & Brestic, M. (2021). Physiological and molecular mechanisms of metal accumulation in hyperaccumulator plants. *Physiologia Plantarum*, 173(1), 148–166. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ppl.13285>
- Tabinda, A. B., Irfan, R., Yasar, A., Iqbal, A., & Mahmood, A. (2020). Phytoremediation potential of *Pistia stratiotes* and *Eichhornia crassipes* to remove chromium and copper. *Environmental Technology*. <https://www.tandfonline.com/doi/10.1080/09593330.2018.1540662>
- Tropicos. (2024a). *Elodea canadensis*. Missouri Botanical Garden. <https://tropicos.org/name/16100003>
- Tropicos. (2024b). *Pistia stratiotes*. Missouri Botanical Garden. <https://tropicos.org/name/2103622>
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista Ion*, 27(1), 17–34. <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v27n1/v27n1a03.pdf>
- Wilkinson, S. R., Naeth, M. A., & Dhar, A. (2023). Potential of macrophytes for wastewater remediation with constructed floating wetlands in cold climates. *Water*, 15(13), 2479. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/13/2479>
- WWAP. (2017). (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). *Informe Mundial de Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo de Los Recursos Hídricos 2017. Aguas Residuales: El Recurso Desaprovechado*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

- Xie, P., Liu, Z., Li, J., Ju, D., Ding, X., Wang, Y., & Hower, J. C. (2023). Pollution and health-risk assessments of Cr-contaminated soils from a tannery waste lagoon, Hebei, north China: With emphasis on Cr speciation. *Chemosphere*, 317, 137908. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523001753>
- Yang, B., Chen, G., & Chen, G. (2012). Submerged membrane bioreactor in treatment of simulated restaurant wastewater. *Separation and Purification Technology*, 88, 184–190. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586611007362>
- Yee-Batista, C. (2013). *Un 70% de las aguas residuales de Latinoamérica vuelven a los ríos sin ser tratadas. Banco Mundial. BIRF–AIF.* <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>
- Zulaikha, S., Lau, W. J., Ismail, A. F., & Jaafar, J. (2014). Treatment of restaurant wastewater using ultrafiltration and nanofiltration membranes. *Journal of Water Process Engineering*, 2, 58–62. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714414000336>

## ANEXOS



**Anexo 1;** Filtrado al vacío, para extracción SST



**Anexo 2;** preparación de viales de digestión DQO



**Anexo 3;** Toma de datos de pH



**Anexo 4;** Gravimetría para la estimación SST



**Anexo 5;** Deshidratación de filtros de SST en estufa



**Anexo 6;** Digestión y lectura de vial DQO en Espectrofotómetro

|   |                         |  |
|---|-------------------------|--|
|  | <b>ANÁLISIS DE AGUA</b> | Laboratorio de ensayo acreditado<br>por el SAE con acreditación<br>N° SAE LEN 07-003 |
|   | Informe de Ensayo       |  |
|   | N°: 168 656             |  |

Coca, 5 de septiembre de 2024

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Razón Social: N/A

Solicitado por: Ing. Roly Ramírez

Dirección: Coca

Fecha de toma de muestra: 2/04/08/20 Hora: 10:00

Responsable: Ing. Roly Ramírez

Identificación de la muestra: Agua, M1

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha ingreso al Laboratorio: 2/04/08/20 Hora: 12:30

Condiciones Ambientales de Análisis: T. Múc: 26,5°C

Fecha del análisis: 2/04/08/20 a 2/04/09/08

T. Múc: 21,5°C

Código de muestra: a 33 372 SPS: 24 - 1 706

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

| Ítem | Análisis solicitados                | Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU | Unidad | Código de muestra |
|------|-------------------------------------|---|--------|-------------------|
|      |                                     |   |        | a 33 372          |
| 1    | Determinación bioquímica de oxígeno | SM 5210 B/ PEE-LABSU-09                       | mg/L   | 7,45              |

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.
- El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo conforme lo solicitado por el cliente.
- El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.

**3.- RESPONSABLE DEL INFORME:**

|  |                         |  |
|--|-------------------------|--|
|  | <b>ANÁLISIS DE AGUA</b> | Laboratorio de ensayo acreditado<br>por el SAE con acreditación<br>N° SAE LEN 07-003 |
|  | Informe de Ensayo       |  |
|  | N°: 168 657             |  |

Coca, 5 de septiembre de 2024

**1.- INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE**

Razón Social: N/A

Solicitado por: Ing. Roly Ramírez

Dirección: Coca

Fecha de toma de muestra: 2/04/08/20 Hora: 10:00

Responsable: Ing. Roly Ramírez

Identificación de la muestra: Agua, M2

**2.- INFORMACIÓN DEL LABORATORIO**

Fecha ingreso al Laboratorio: 2/04/08/20 Hora: 12:30

Condiciones Ambientales de Análisis: T. Múc: 26,5°C

Fecha del análisis: 2/04/08/20 a 2/04/09/08

T. Múc: 21,5°C

Código de muestra: a 33 373 SPS: 24 - 1 706

**2.1.- PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA:**

| Ítem | Análisis solicitados                | Método de Referencia Normalizado/ PEE - LABSU | Unidad | Código de muestra |
|------|-------------------------------------|---|--------|-------------------|
|      |                                     |   |        | a 33 373          |
| 1    | Determinación bioquímica de oxígeno | SM 5210 B/ PEE-LABSU-09                       | mg/L   | 29,33             |

**2.2.- COMENTARIOS Y OBSERVACIONES**

- Los ensayos marcados con (\*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.
- El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo conforme lo solicitado por el cliente.
- El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente.

**3.- RESPONSABLE DEL INFORME:**

**Anexo 7;** parte de los informes de análisis DBO<sub>5</sub> por LABSU laboratorio.

# UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

*¡Evolución académica!*

@UNEMIEcuador

