

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por *Lemna minor* L. en aguas residuales provenientes de la actividad acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR

Militza Paola Aquino Carmen

ASESOR

Roger Manuel Mestas Valero

Lima, Perú

2022

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos del autor

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Datos del asesor

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (obligatorio)	

Datos del Jurado

Datos del presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos del segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos del tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos de la obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma (Normal ISO 639-3)	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesoro).

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 004 - 2023/UCSS/FIA/DI

Siendo las 12:00 m. del día 07 de octubre de 2022 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Segundo Octavio Zegarra Aliaga | presidente |
| 2. Mabel Teodora Borda Olivas | primer Miembro |
| 3. Wilfredo Mendoza Caballero | segundo Miembro |
| 4. Roger Manuel Mestas Valero | asesor |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por *Lemna minor* L. en aguas residuales provenientes de la actividad acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón** que presenta la bachiller en Ciencias Ambientales, **Militza Paola Aquino Carmen**, cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

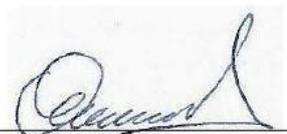
DESAPROBAR

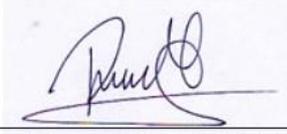
La tesis, con el calificativo de **SUFICIENTE** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare EXPEDITA para conferirle el TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL.

Lima, 07 de octubre de 2022.


Segundo Octavio Zegarra Aliaga
PRESIDENTE


Mabel Teodora Borda Olivas
1° MIEMBRO


Wilfredo Mendoza Caballero
2° MIEMBRO


Roger Manuel Mestas Valero
ASESOR

Anexo 2

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE **TESIS** / TRABAJO DE INVESTIGACIÓN CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

Ciudad, 18 de Agosto de 2023

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ingeniería Agraria

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis** / trabajo de investigación, con título: **Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por *Lemna minor* L. en aguas residuales provenientes de la actividad acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón**, presentado por alumna con código **2012100012** y DNI **71318750** para optar el título profesional de **Ingeniero Ambiental** ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 0 %**. Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,



Firma del Asesor (a)
DNI N°: 23842285
ORCID: 0000-0002-5097-9988
Facultad de Ingeniería Agraria - UCSS

* De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

DEDICATORIA

Agradecer en primer lugar a Dios por la vida y la salud, por la hermosa familia que me otorgó, quienes son mi empuje para lograr mis objetivos y metas. Sé que siempre puedo contar con ellos, en las dificultades fueron y seguirán siendo mi soporte para seguir adelante; gracias por cada consejo y por toda la confianza puesta en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre María Consuelo Carmen Juárez y mi padre Rodolfo Aquino Ruiz por todo el amor y esfuerzo puestos en mí, por estar a mi lado en cada uno de mis logros y ser el soporte que me ha servido para llegar a cumplir con mis objetivos personales y profesionales. Gracias por la formación con principios, por sus consejos y llamadas de atención, porque todo me ha servido y seguirán siendo mi aliento para seguir adelante y lograr todo lo que me proponga.

A mi esposo Jorge Enrique Coronado Chanamé por el gran amor que me demuestra día a día, por su apoyo incondicional para verme lograr mis objetivos y sueños. Gracias por toda tu comprensión y porque juntos somos un gran equipo que uno al otro brinda el soporte fundamental que necesita, éste logro es también gracias a ti.

Agradecer a mis hermanos: Fiorella Thais, Rodolfo Carlos y Javier Eduardo Aquino Carmen, éste logro va para ustedes también, porque cada acción lo hago pensando siempre en ser el mejor ejemplo para ustedes mis queridos hermanos.

A toda mi familia, en especial a aquellos que me apoyaron de una u otra forma con sus consejos, buenos ánimos y más; muchas veces su apoyo incondicional fue en el momento oportuno, ustedes tienen mucho que ver con éste gran logro profesional.

Al Dr. Roger Mestas Valero, por aceptar sin ninguna objeción ser mi asesor, quien además ha cumplido un rol esencial desde el inicio a este proyecto de investigación, sus conocimientos y aportes han sido herramientas fundamentales en todo el proceso. Asimismo, brindar un agradecimiento especial a un gran maestro y amigo, el Blgo. Armando Chiclla Salazar, por su predisposición y apoyo profesional con cada uno de sus aportes al presente estudio científico.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Índice general	viii
Índice de tablas	x
Índices de figuras.....	xii
Índice de apéndices.....	xiii
Resumen	xiv
Abstract.....	xv
Introducción.....	1
Objetivos.....	4
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Bases teóricas especializadas	12
1.2.1. Aguas residuales	12
1.2.2. Aguas residuales de piscigranjas	13
1.2.3. Biorremediación para el tratamiento de aguas residuales	16
1.2.4. “Lenteja de agua” (<i>Lemna minor</i>)	18
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1. Diseño de investigación.....	23
2.1.1. Lugar y fecha.....	23
2.1.2. Descripción del experimento.....	23
2.1.3. Tratamientos.....	29
2.1.4. Unidades experimentales	30
2.1.5. Identificación de variables y su mensuración.....	30
2.1.6. Diseño estadístico del experimento	31
2.1.7. Análisis estadístico de datos	32

CAPÍTULO III: RESULTADOS	33
3.1 Resultados del análisis de parámetros físico-químicos de la muestra inicial de las aguas residuales provenientes del CIB-Ancón	33
3.2 Análisis de la variación los parámetros físico-químico de las muestras de agua residual tratadas con la “lenteja de agua” <i>Lemna minor</i>	34
3.2.1 Variación de la conductividad eléctrica.....	34
3.2.2 Variación de la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	36
3.2.3 Variación del fósforo total.....	38
3.2.4 Variación del nitrógeno total	39
3.2.5 Variación del pH.....	41
3.2.6 Variación de Sólidos suspendidos totales.....	42
3.3 Efecto de las diferentes diluciones de agua residual en la variación de la biomasa de <i>Lemna minor</i>	44
Nota: según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes	45
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	46
4.1 Análisis de parámetros físico-químicos de la muestra inicial de las aguas residuales provenientes del CIB-Ancón	46
4.2 Análisis de la variación de los parámetros físico químicos de las muestras de agua residual tratadas con la “lenteja de agua” <i>Lemna minor</i>	47
4.3 Efecto de las diferentes diluciones de agua residual en la variación de la biomasa de <i>Lemna minor</i>	50
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	52
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	53
Referencias	54
Terminología	61
Apéndices	63

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Tratamientos del experimento</i>	30
Tabla 2. <i>Valores promedio de los parámetros correspondientes al análisis físico-químico de la muestra de agua residual inicial del CIB-Ancón</i>	34
Tabla 3. <i>Valores obtenidos de la conductividad eléctrica de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor</i>	35
Tabla 4. <i>Valores obtenidos de la demanda bioquímica de oxígeno de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor</i>	37
Tabla 5. <i>Valores del fósforo total de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor</i>	38
Tabla 6. <i>Valores del nitrógeno total de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor</i>	40
Tabla 7. <i>Valores del pH de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor</i>	41
Tabla 8. <i>Valores de los sólidos suspendidos totales en las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor</i>	43
Tabla 9. <i>Variación de la biomasa húmeda de Lemna minor en el agua residual proveniente de la piscigranja del CIB-Ancón</i>	44
Tabla 10. <i>Análisis de la varianza ANOVA de la conductividad</i>	63
Tabla 11. <i>Prueba HSD Tukey^a de la conductividad</i>	64
Tabla 12. <i>Prueba de efecto inter sujetos. Variable dependiente DBO₅</i>	65
Tabla 13. <i>Prueba HSD Tukey^{a,b}. DBO₅</i>	66
Tabla 14. <i>Análisis de la varianza ANOVA de Fósforo</i>	67
Tabla 15. <i>Prueba HSD Tukey^a- Fósforo</i>	68
Tabla 16. <i>Análisis de la varianza ANOVA. - Nitrógeno</i>	69
Tabla 17. <i>Prueba HSD Tukey^a. - Nitrógeno</i>	70
Tabla 18. <i>Análisis de la varianza ANOVA. - pH</i>	71

Tabla 19. <i>Prueba HSD Tukey^a. - pH</i>	72
Tabla 20. <i>Análisis de la varianza ANOVA. - SST</i>	73
Tabla 21. <i>Prueba HSD Tukey^a. - SST</i>	74
Tabla 22. <i>Análisis de la varianza ANOVA. – Peso húmedo</i>	75
Tabla 23. <i>Prueba HSD Tukey^{a,b}. - Peso húmedo</i>	76

ÍNDICES DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Morfología de <i>Lemna minor</i>	18
<i>Figura 2.</i> Zona de extracción de <i>Lemna minor</i> L.	24
<i>Figura 3.</i> Recolecta de “lentejas de agua” <i>Lemna minor</i> en el humedal de Santa Rosa.....	25
<i>Figura 4.</i> Sistema acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón. (A) Lugar de la toma de muestra de aguas residuales. (B) Recolección total de las muestras. (C) Actividad acuícola en el CIB.	26
<i>Figura 5.</i> Punto de muestreo del agua residual.....	26
<i>Figura 6.</i> Obtención de peso húmedo de biomasa de <i>Lemna minor</i> . (A) Obtención de plantas escurriendo exceso de agua. (B) Pesaje de biomasa para cada unidad experimental.	28
<i>Figura 7.</i> Caracterización físicoquímica de aguas residuales tratadas en laboratorio.....	29
<i>Figura 8.</i> Resultados de la conductividad eléctrica de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos.....	36
<i>Figura 9.</i> Resultados de la Demanda bioquímica de oxígeno de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos.	37
<i>Figura 10.</i> Resultados del fósforo total de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos.	39
<i>Figura 11.</i> Resultados del nitrógeno total de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos.	40
<i>Figura 12.</i> Resultados del pH de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos.	42
<i>Figura 13.</i> Resultados de los sólidos suspendidos totales de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos.	43
<i>Figura 14.</i> Porcentaje de remoción de NT y PT vs % incremento de biomasa de <i>Lemna minor</i>	45

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Análisis de la varianza de la conductividad y los tratamientos.....	63
Apéndice 2. Prueba de Tukey del tratamiento y la conductividad	63
Apéndice 3. Análisis de la varianza de la DBO_5 y los tratamientos	64
Apéndice 4. Prueba de Tukey del tratamiento y DBO_5	66
Apéndice 5. Análisis de la varianza de Fósforo y los tratamientos	67
Apéndice 6. Prueba de Tukey del tratamiento y Fósforo	67
Apéndice 7. Análisis de la varianza de Nitrógeno y los tratamientos	69
Apéndice 8. Prueba de Tukey del tratamiento y Nitrógeno	70
Apéndice 9. Análisis de la varianza de pH y los tratamientos	70
Apéndice 10. Prueba de Tukey del tratamiento y pH.....	71
Apéndice 11. Análisis de varianza de sólidos suspendidos totales y los tratamientos	73
Apéndice 12. Prueba de Tukey del tratamiento y sólidos suspendidos totales	73
Apéndice 13. Anova de los tratamientos vs. Peso húmedo vs. porcentaje de remoción de NT y PTI.....	74
Apéndice 14. Prueba de Tukey aplicado al porcentaje de incremento de la biomasa vs. tipo de tratamiento.....	76
Apéndice 15.Registro Fotográfico.....	77

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por “lenteja de agua” *Lemna minor* L. en aguas residuales provenientes de la actividad acuícola. Para ello, se realizó la caracterización físico-química (conductividad eléctrica, DBO₅, fósforo total o P total, nitrógeno total o N total, pH, Temperatura y sólidos suspendidos totales) de las aguas residuales procedentes de los estanques de crianza de peces del Centro de Investigación Biológica (CIB), antes y después del tratamiento con la macrófita flotante *Lemna minor* colocadas en recipientes plásticos con una superficie aproximada de 78,5 cm² y un volumen de 500 ml. La temperatura del agua se mantuvo a 21 ± 0,5 °C. En el diseño experimental se consideraron cuatro tratamientos que contenían agua residual (T1=500 ml, T2=250 ml, T3=125 ml y T4=62,5 ml) al cual fueron adicionados 20 g de *Lemna minor*; además, fue evaluado el crecimiento de la biomasa de “lenteja de agua” para lo cual se realizó pesajes antes y después de los tratamientos. Las evaluaciones de los tratamientos se hicieron a los 14 días. Los resultados mostraron remociones de 88,9 % para la DBO₅, 40,49 % para el P total, 67,08 % para el N total, 49,96 % para sólidos suspendidos totales y una reducción del pH inicial de 6,8 y final de 6,4. También fue obtenido un incremento máximo de la biomasa en T1 con un 33,5 %. En conclusión, *Lemna minor* es eficiente en la remoción de nutrientes como el nitrógeno y la carga orgánica (expresada en DBO₅) siendo esta planta una buena alternativa para la depuración de aguas residuales con estos contenidos.

Palabras clave: Agua residual acuícola, “lenteja de agua”, *Lemna minor*, CIB-Ancón

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the capacity of nitrogen and phosphorus removal by “duckweed” *Lemna minor* L. in wastewater from aquaculture activity. Part of the study was to perform the physical chemical characterization (electrical conductivity, DBO₅, total phosphorus or total P, total nitrogen or total N, pH, T, total suspended solids) was carried out to the wastewater from the fish breeding ponds of the “Centro de Investigación Biológica (CIB)”, before and after treatment with *Lemna minor* floating macrophyte placed in plastic containers with an approximate surface area of 78,5 cm² and a volume of 500 ml. The water temperature was that of the laboratory and was around 21 ± 0.5 ° C°. Four treatments containing residual water (T1 = 500 ml, T2 = 250 ml, T3 = 125 ml and T4 = 62,5 ml) were considered to which 20 g of *Lemna minor* were added; In addition, the growth of the duckweed biomass was evaluated for which weighing’s were performed before and after the treatments. The evaluations of the treatments were made at 14 days. The results showed removals of 88.9 % for BOD₅, 40.49 % for total P, 67.08 % for total N, 49.96 % for total suspended solids and a reduction in pH in a range of 6.4 to 6.8. A maximum increase in biomass was also obtained in T1 with 33.5%. In conclusion, *Lemna minor* is efficient in the removal of nutrients such as nitrogen and organic load (expressed in BOD₅), this plant being a good alternative for wastewater treatment with these contents.

Keywords: Aquaculture Wastewater, duckweed, *Lemna minor*, CIB-Ancón

INTRODUCCIÓN

La acuicultura es una alternativa a determinados problemas ambientales, sin embargo, las aguas residuales no tratadas, producto de dicha actividad, generan una problemática ambiental que se incrementa cada día. El depósito excesivo de nutrientes en zonas específicas contribuye con la presencia y crecimiento de colonias de algas y la propagación del plancton, las cuales absorben descontroladamente el oxígeno disponible en el agua, produciendo así efectos secundarios o colaterales sobre las especies de la fauna que se encuentran alrededor. De ahí, que las especies mueren o se ven obligadas a emigrar a otras zonas más favorables para el desarrollo de su hábitat (Barragán *et al.*, 2009).

Las aguas usadas en la crianza de peces e invertebrados presentan gran cantidad de nutrientes como el nitrógeno y fósforo. Estos efluentes no tratados son vertidos directamente a las aguas costeras y continentales, generando un alto impacto ambiental y donde algunos inician un proceso llamado eutrofización, el cual influye de manera negativa al medio ambiente, provocando un desarrollo desmedido de algas y plantas acuáticas que desplaza la flora normal y se acumulan de tal manera que dejan sin luz otras algas y plantas. Las plantas que han quedado sin luz mueren y son alimento de bacterias que, en el proceso de digestión, consumen el oxígeno presente en el agua, matando también las especies animales, lo cual provoca la incubación de un mayor número de bacterias, entre las cuales comienzan a predominar las anaeróbicas (Escobar, 2002).

La producción de macrófitas acuáticas para remover altos contenidos de nutrientes han sido objetos de estudio en la biorremediación de aguas residuales. Dentro de las especies promisorias en esta actividad está la “lenteja de agua” *Lemna minor*, cuyos estudios han demostrado una alta capacidad de crecimiento en ecosistemas hídricos contaminados, produciendo una biomasa con una elevada concentración de proteínas (Ponce y Fitz, 2004). Estudios recientes muestran que la “lenteja de agua” *Lemna minor* tiene un buen potencial para la remoción de nutrientes y metales pesados de aguas residuales no tratadas, por lo que se puede emplear y probar su efectividad en otras técnicas de fitorremediación para aguas no solo residuales, sino también de humedales costeros, que hoy en día se ven afectados por

actividades industriales o de extracción, que causan la contaminación de estos ecosistemas (Coronel, 2016).

En comparación con otras técnicas para remediar ambientes contaminados, ya sea suelo o agua, la fitorremediación es una técnica favorable y viable, porque es menos costosa, mucho más limpia y no utiliza reactivos químicos contaminantes. Por tales motivos, el presente estudio evaluó la capacidad de remoción de los nutrientes, nitrógeno y fósforo por *Lemna minor* en aguas residuales no tratadas provenientes de la actividad acuícola desarrollada en el Centro de Investigación Biológica (CIB – Ancón). Este trabajo es de gran importancia porque permite obtener un efluente de buena calidad y con escasos nutrientes para ser usados en la crianza de peces; además, permite valorar a *Lemna minor* como una alternativa para el desarrollo de futuros estudios.

El presente informe de estudio se estructuró en seis capítulos:

El primer capítulo – marco teórico, expone estudios científicos similares al presente estudio de investigación, tanto nacionales e internacionales, de los cuales se ha recopilado información relevante, a fin de evaluar los resultados obtenidos en el presente estudio. Asimismo, describe las bases teóricas especializadas relacionadas al presente estudio como, por ejemplo, concepto de aguas residuales, aguas residuales de piscigranjas, descripción de parámetros a evaluar, entre otros conceptos.

El segundo capítulo, describe los materiales y métodos aplicados en los cuatro tratamientos de estudio del presente trabajo de investigación, el cual es de tipo experimental y, donde se evaluó la tasa de remoción de nitrógeno y fósforo a diferentes concentraciones de agua residual, utilizando *Lemna minor*.

El tercer capítulo muestra el análisis de parámetros físico-químicos de la muestra inicial de agua residual no tratada y de los resultados obtenidos en la muestra de agua tratada con *Lemna minor* a diferentes concentraciones de agua residual; explicando la variación de los valores obtenidos de la conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno, fósforo

total, nitrógeno total, pH y sólidos suspendidos. El cuarto capítulo muestra la discusión e interpretación de los parámetros físico-químicos de la muestra inicial de las aguas residuales no tratadas y de los resultados obtenidos en las muestras de agua residual tratadas con *Lemna minor*. Por último, el quinto y sexto capítulo presentan las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación, respectivamente.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por “lenteja de agua” *Lemna minor* L. en aguas residuales proveniente de la actividad acuícola del CIB-Ancón.

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales provenientes de la piscigranja del CIB- Ancón.
- Evaluar la variación de los parámetros fisicoquímicos (Conductividad eléctrica, Demanda bioquímica de oxígeno, Fósforo total, Nitrógeno total, pH y Sólidos disueltos totales) del agua residual sometida a la actividad remediadora de *Lemna minor*.
- Evaluar el efecto de las diferentes diluciones de agua residual en la variación de la biomasa de *Lemna minor*.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Internacionales

Sarango y Sánchez (2016) realizaron una investigación cuyo objetivo fue diseñar dos filtros biológicos con *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms y *Lemna minor* para evaluar la disminución de la polución presente en las aguas contaminadas de la empresa extractora Rio Manso EXA S.A en Quevedo, Ecuador. El estudio presentó un diseño experimental con un enfoque cuantitativo en un periodo de tres meses. La metodología desarrollada consistió en la selección inicial de las plantas para este estudio, recolectándose 16 plantas de *Eichhornia crassipes* y 1056 plantas de *L. minor*. Dentro de la composición de los biofiltros usaron como lecho de soporte la arena, gravilla, grava y piedra pómez, que fueron depositados en cada uno de los biofiltros. Además, fue realizado el análisis fisicoquímico y microbiológico del agua, al inicio y al término de la investigación. El diseño de los biofiltros contempló el ingreso de agua por un tubo de PVC, un tanque de recolección y para la aireación fueron añadidos dos tubos perforados. El tiempo de retención establecido fue de 28,5 horas. Posteriormente, al término del proceso remediador, las especies vegetales fueron recolectadas y usadas como insumo para la elaboración de compostaje. Los autores utilizaron la prueba t-Student para evaluar la significancia ($p < 0,05$) de los porcentajes de degradación en todos los tratamientos. Los resultados mostraron altos valores de degradación para los parámetros fisicoquímicos analizados. Además, el proceso de degradación realizado entre *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*, no presentó diferencias significativas lo que posibilita usar cualquiera de ellos, obteniéndose los mismos resultados de remediación.

Žaltauskaite *et al.* (2014), realizaron la evaluación de la toxicidad de los efluentes municipales de la localidad de Kaunas, Lithuania, utilizando los bioensayos con “lenteja de agua” común de planta superior acuática (*Lemna minor* L.). El objetivo del estudio fue evaluar la aplicabilidad de la “lenteja de agua” para pruebas de toxicidad de aguas residuales y su eficiencia en la eliminación de sustancias tóxicas. Fueron realizadas pruebas de toxicidad en muestras de aguas residuales no tratadas y biológicamente tratadas de la ciudad Šilalė, las cuales recibieron aguas residuales municipales e industriales con una población equivalente entre 2 000 y 10 000 habitantes. Las muestras de aguas residuales fueron llevadas al laboratorio de la Universidad Vytautas Magnus y fueron almacenadas en el refrigerador antes de la realización de los bioensayos. El cultivo de *Lemna minor* fue realizado en medio *Steinberg* modificado, en cámaras de crecimiento a $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un ciclo luz/oscuridad de 16/8 h. Luego fueron transferidas 20 colonias de lentejas de agua comunes sanas (*Lemna minor*) de doble fronda a matraces Erlenmeyer que contenían 100, 50, 25, 12,5 y 6,25 % de aguas residuales. El estudio y análisis experimental tuvo una duración de 7 días y fueron realizadas en 3 repeticiones. En el análisis químico registró altas concentraciones de nutrientes y metales pesados en aguas residuales no tratadas. El tratamiento de aguas residuales redujo significativamente (hasta el 60 %) el contenido de nutrientes (N, P), sin embargo, sólo fue observada una ligera reducción (hasta 10 %) en las concentraciones de metales pesados. Tanto las aguas residuales no tratadas como las biológicamente tratadas inhibieron la tasa de crecimiento relativo de *Lemna minor*. Las aguas residuales no diluidas eran extremadamente fitotóxicas y condujeron a la muerte de los organismos de ensayo. El estudio demostró que *Lemna minor* fue un potencial eliminador de nutrientes y metales pesados de aguas residuales y puede usarse en sistemas de tratamiento.

León y Chávez (2010) realizaron una investigación cuyo objetivo fue reducir la contaminación del efluente de vacuno usando tres metodologías de bajo costo. La investigación fue desarrollada en el Laboratorio de Biotecnología de microalgas de la Universidad Nacional de Costa Rica. La metodología consistió en proponer el tratamiento de efluentes y lograr una mejor calidad hídrica libre del contaminante, para lograr este objetivo se propuso el tratamiento con microalgas inmovilizadas y otra con *Lemna aequinoctiales* Welw en un sistema de humedales artificiales de 10 m de ancho x 1,5 m de largo x 0,65 m de alto con flujo horizontal. Los parámetros analizados fueron oxígeno

disuelto, DBO₅, sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), amonio (N-NH⁴⁺), nitrato (N-NO³⁻) y algunos iones. Los autores aplicaron la prueba t-Student para comparar los valores medios obtenidos en los ecosistemas evaluados. El nitrato, la DBO₅, sólidos totales y sedimentables fueron los parámetros que mostraron significancia (p<0,05) en el experimento. Las plantas adaptadas al humedal fueron *Ludwigia* L., *Zantedechia aetiopica* (L.) Spreng., *Hedychium coronarium* J. Koenig y *Canna generalis* L.H. Bailey. Los autores concluyeron que las microalgas; así como, los sistemas de humedales fueron altamente eficientes en la reducción del contenido residual del efluente tratado.

Ramírez y Sierra (2010) efectuaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar los reactores tipo batch a escala de laboratorio usando *Lemna* “lenteja de agua” para la remoción de contaminantes orgánicos y enterobacterias. Esta investigación fue realizada con aguas residuales del municipio de Valledupar, Colombia. La metodología consistió en analizar los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno, nitrógeno total, fósforo, coliformes, conteo de frondas y determinación de la biomasa. Los resultados preliminares mostraron el desarrollo óptimo de la “lenteja de agua” en condiciones de luz abundante, por lo que el experimento fue realizado bajo estas condiciones y otra controlada. Fueron realizados análisis fisicoquímico del agua durante toda la fase experimental, considerándose los parámetros de DQO, pH, nitrógeno total, temperatura y fósforo; así como el análisis de crecimiento de la “lenteja de agua” a lo largo del tiempo. Los valores de pH oscilaron cercanos a 7,35; alcanzando un mayor valor el día 15 de evaluación. Los resultados de remoción de la materia orgánica fueron significativos los primeros días del experimento, así como los valores promedios de la remoción de nitrógeno y fósforo. Los autores concluyeron que la “lenteja de agua” fue un organismo eficaz para la captura de la materia orgánica, expresada en cargas de nitrógeno y fósforo, principalmente presente en las aguas residuales domésticas. No fue posible tener éxito en la remoción de la contaminación fecal expresada en concentraciones de coliformes totales y fecales, debido a que esta permaneció sin alterarse significativamente al paso de los días. Los autores recomendaron su uso en el tratamiento de aguas por el bajo costo en cuanto a su operación y mantenimiento.

Alvarado *et al.* (2008) realizaron un estudio cuyo objetivo fue evaluar y comparar la remoción de arsénico por el “jacinto de agua” *Eichhornia crassipes* y la “lenteja de agua

menor” *Lemna minor*. El experimento fue desarrollado en las instalaciones de la universidad Lisandro Alvarado, en la provincia de Lara-Venezuela. El diseño experimental fue aleatorio con cinco tratamientos y cinco repeticiones: dos grupos experimentales, dos grupos de control y un control adicional de agua con arsénico, sin plantas. Las unidades experimentales presentaron recipientes plásticos con una capacidad de 20 L, siendo colocadas las plantas con densidades de 1 kg/m² para la “lenteja de agua menor” y 4 kg/m² para el “jacinto de agua” sobre una base húmeda. El arsénico fue determinado en muestras de tejido foliar y agua por espectroscopía de absorción atómica de generación de hidruros; además los autores aplicaron un análisis de varianza usando el programa STATISTIX 8. El elemento fue controlado en función del tiempo durante 21 días y no fueron encontradas diferencias significativas ($p > 0,05$) en la capacidad de bioacumulación de ambas especies. La tasa de eliminación de *Lemna minor* fue de 140 mg. As. ha⁻¹.d⁻¹ con una recuperación de eliminación de 5 %. El “jacinto de agua” tuvo una tasa de remoción de 600 mg. As. ha⁻¹.d⁻¹ y una recuperación de la eliminación de 18 %, bajo las condiciones del ensayo. La eficiencia de remoción de “jacinto de agua” fue mayor debido a la producción de biomasa ya las condiciones climáticas más favorables. Esta especie representa una alternativa fiable para la biorremediación de arsénico en aguas.

Fang *et al.* (2007) realizaron una investigación cuyo objetivo fue evaluar las plantas de *Landoltia punctata* y su capacidad para tomar NH₄⁺ y NO₃⁻ tanto por las raíces como por las frondas. El estudio fue realizado en las instalaciones de la Universidad Occidental de Australia. Para realizar los cultivos de las plantas los autores usaron recipientes de plástico opaco de 50 L en una solución nutritiva Hoagland modificada antes del tratamiento. Los flujos de NO₃⁻ y NH₄⁺ fueron estimados mediante una técnica de microelectrodo selectivo de iones no invasivo. Esta técnica permite mediciones directas de los flujos de iones a través de la superficie de la raíz o la fronda de una planta intacta. Para realizar dichas mediciones de flujo de iones, fueron colocadas las plantas en placas de Petri para luego poder analizar mediante un microscopio óptico invertido. Los experimentos fueron realizados en temperatura de 20 a 22 °C bajo iluminación de laboratorio estándar. La estimación de las preferencias de raíces de NO₃⁻ o NH₄⁺ fue realizada mediante mediciones en la frontera de la elongación y zonas maduras de raíces y el centro de la fronda después de 2 horas de exposición. Todos los tratamientos fueron realizados en orden aleatorio. El análisis de la diferencia en los flujos de iones en diferentes zonas de la raíz y a diferentes concentraciones

de NO_3^- y NH_4^+ , fueron evaluadas mediante la prueba t de Student. En dicho estudio los autores concluyeron que las plantas de *Landoltia punctata* absorbieron NO_3^- y NH_4^+ tanto por las frondas como por las raíces, sin embargo, cuando ambas fuentes de N están disponibles, las plantas prefieren tomar NH_4^+ , aunque se ha observado que tomarían NO_3^- cuando sea la única fuente de nitrógeno.

Ozengin y Elmaci (2007) realizaron una investigación cuyo objetivo fue analizar la capacidad de la planta *Lemna minor* en la eliminación de TP (fósforo total), PO_4^{3-} , (Ortofosfato, OP), TN (nitrógeno total) y DQO (Demanda Química de Oxígeno) de aguas residuales e industriales. Estas aguas fueron colectadas de la localidad de Bursa, Turkia. Dentro de la metodología fueron considerados dos tanques en los cuales incorporaron poblaciones de *Lemna minor*. Estos tanques presentaron dimensiones de 40 x 20 x 15 cm y una superficie de 800 cm² y un volumen final de 6,4 L; la temperatura del agua fue alrededor de 21 ± 0.5 °C, que fue medida utilizando termómetro (JAGER). La luz fue suministrada por una lámpara especial (Luz diurna OSRAM 18 W) durante el día y durante la noche. La lámpara era desconectada por un temporizador. La “lenteja de agua” fue obtenida del río Susurluk en el área de Karacabey, Turquía y adaptada al sistema de escala de laboratorio en el Departamento de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Uludag. La medida analítica de parámetros fisicoquímicos fue realizada de acuerdo con los métodos estándar (APHA, 1998), mientras que otros análisis fueron realizados utilizando fotómetro modelo de Lange Lasa 2 plus. El agua residual municipal fue monitoreada a intervalos de 48 horas, registrando la remoción de TN, TP y OP. Además, hicieron determinaciones de los parámetros fisicoquímicos presentes en las aguas tales como: DQO, nitrógeno total (TN), fósforo total (TP) y ortofosfato (OP), y cuyos valores permitieron obtener las eficiencias de remoción de los reactores influenciados por la acción de *Lemna minor*. Los resultados mostraron que la eficiencia de eliminación entre los dos reactores fue similar y que tanto las aguas residuales municipales como las industriales mostraron pH en el afluente de 7,2 y en el efluente de 8,0. El tratamiento de aguas residuales a base de lentejas de agua fue altamente eficiente en condiciones de laboratorio. Además, observaron disminuciones en la producción de las lentejas a temperaturas inferiores de 17 °C y por encima de 35 °C. Los autores concluyeron que *L. minor* presentó una alta adaptación en la reducción en los parámetros evaluados.

Axtell *et al.* (2003) realizaron un estudio cuyo objetivo fue examinar la capacidad de *Microspora* (una macro-alga) y *Lemna minor* (una planta acuática) para eliminar el plomo y el níquel solubles en diversas condiciones de laboratorio en la localidad de Duluth, USA. La metodología consistió en exponer la biomasa de las plantas al contacto con el metal en solución, para lo cual realizaron cultivos de estos organismos en laboratorio. La macro-alga *Microspora* fue probada en un proceso por lotes y semi-discontinuo para la eliminación del plomo. *Lemna minor* fue probada en un proceso por lotes con plomo y níquel para examinar la competencia potencial entre los metales para la adsorción. La *Microspora* fue expuesta a 39,4 mg.L⁻¹ de plomo más de 10 días, donde los resultados mostraron que hasta 97 % del plomo fue eliminado en el proceso por lotes y 95 % en el proceso de semi-lotes. Además, las concentraciones iniciales por debajo de 50 mg.L⁻¹ (una dosis que letal para las algas) no tuvieron efecto sobre la concentración final. Por otro lado, *Lemna minor* fue expuesta al plomo y níquel utilizando un diseño experimental factorial de 3 x 3 (nueve experimentos, más repeticiones). Las concentraciones de plomo iniciales fueron 0, 5 y 10 mg.L⁻¹, y las concentraciones de níquel fueron 0, 2,5 y 5 mg. L⁻¹ en el experimento. Los resultados mostraron que las poblaciones de *Microspora* eran capaces de tolerar grandes concentraciones de plomo de hasta un 89 % del plomo en las primeras 24 horas, mientras que las poblaciones de *L. minor* mostraron tasas de remoción de 76 % para plomo y 82 % para níquel. Las conclusiones de la investigación fueron que ambos organismos eliminaron altamente el plomo y níquel; sin embargo, los autores no observaron ningún efecto sinérgico-antagonista para los experimentos con múltiples metales, en términos de eliminación de metales.

Nacional

Alvarado (2018) realizó una investigación cuyo objetivo fue evaluar la influencia de la planta *Lemna minor* en el tratamiento de las aguas residuales. La investigación presentó un diseño de tipo experimental con enfoque cuantitativo y un alcance explicativo. La metodología consistió en obtener 70 L de agua proveniente de los efluentes de la empresa ubicada en la localidad de Lurín, Lima, los cuales fueron caracterizados con los parámetros químicos de DBO, DQO y sólidos suspendidos totales. Para la realización de este estudio fueron utilizadas diferentes cantidades de la planta *Lemna minor* (100, 200 y 300 g) las que fueron dispuestas sobre el efluente residual, con un tiempo de retención máximo de 10 días y siendo analizados a los 3,6 y 10 días, siguiendo los métodos estandarizados para aguas residuales.

Para la prueba de hipótesis fueron usados el análisis de varianza (ANOVA) de dos factores y la prueba HDS de Tukey, con un nivel de significancia del 5 %, usando el programa SPSS. Los resultados obtenidos por la autora indicaron una disminución de los parámetros que determinan la contaminación orgánica tales como la DBO, que logró disminuir en un 61 % mientras que la DQO fue reducida en un 68 % y la concentración de sólidos suspendidos totales fue reducida en 61 %. Las máximas reducciones tanto para la DBO como para DQO fueron obtenidas con el tratamiento que usó 100 g de *Lemna* y 10 días de exposición. La autora concluyó que el uso de *Lemna minor* influyó en el tratamiento de manera significativa ($p < 0,05$) con la contaminación orgánica de los efluentes industriales de la empresa Cotexsur, siendo el parámetro de la DQO el de mayor remoción a los 10 días de tratamiento.

Garay (2017) realizó una investigación que tuvo como principal objetivo evaluar la eficacia en la disminución del boro por las plantas “jacinto” y “lenteja de agua”. La investigación fue efectuada con muestras extraídas de la laguna “La Milagrosa” ubicada en Chilca, Lima. La investigación fue de tipo experimental, donde consideraron el protocolo de monitoreo de aguas superficiales para la toma de muestra de la laguna. Para la ejecución del estudio fueron construidas 3 peceras con una capacidad total de 30 L que fueron llenadas con agua de la laguna. Las peceras recibieron la siguiente codificación: M1 (“jacinto de agua”), M2 (“lenteja de agua”) y M3 (Jacinto y “lenteja de agua”). En M1 fueron colocadas 07 “jacintos de agua”, en M2 fueron colocadas 30 g de “lenteja de agua” y en M3 fueron colocadas 03 “jacintos de agua” y 15 gramos de “lenteja de agua”. Los datos recogidos fueron analizados usando el análisis de varianza (ANOVA) a través del programa Minitab. Los resultados de las evaluaciones realizadas durante 3 semanas presentaron una disminución significativa ($p < 0,05$) del 89,04 % de Boro con el tratamiento de Jacinto de agua, siendo este el mayor de todos; a su vez; la “lenteja de agua” presentó una reducción del 57,13 %, mientras que el tratamiento mixto se obtuvo un 56,37 %. El autor concluyó que la mayor capacidad de remoción de boro lo realizó el “Jacinto de agua” presentando una mayor resistencia a este elemento en el tiempo de la experimentación.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Aguas residuales

Las aguas residuales suelen presentar desechos de la actividad antrópica lo que lo convierte en un recurso no apropiado para otras actividades y muy peligrosa para su consumo. Generalmente debe ser tratada por mecanismos naturales biológicos, químicos o físicos, pudiendo ser aprovechado para actividades como la recreativa, industria, agricultura y la vida natural (Espigares y Pérez, 1985).

Tipos de aguas residuales

Existen diversas denominaciones para las aguas residuales, las cuales son definidas por Romero (2000) y se describen a continuación:

- Agua residual doméstica: Producidas en las diferentes actividades al interior de las viviendas y presenta como característica principal que los contaminantes están en concentraciones moderadas.
- Agua residual municipal: Se refiere a las aguas que son transportadas por el alcantarillado de una localidad o una ciudad.
- Agua residual industrial: Son aquellas consideradas como resultado de las descargas industriales y su contenido está en función del tipo de industria que desarrolla.
- Agua negra: Es el efluente que contiene principalmente orina y heces y por su contenido presenta un alto contenido de patógenos.
- Agua amarilla: Es el efluente que presenta una gran cantidad de orina y presenta un alto contenido de nutrientes y patógenos.
- Agua café: Este tipo de agua contiene una pequeña cantidad de orina y heces y como característica presenta una alta concentración de nutrientes y patógenos.

- Agua gris: Agua proveniente de lavamanos, ducha y lavadora. Presenta pocos nutrientes y agentes patógenos.

1.2.2. Aguas residuales de piscigranjas

Las aguas residuales generadas en las actividades de la crianza de peces se producen en los distintos procesos de la acuicultura. El cuerpo de agua de esta actividad logra metabolizar los residuos orgánicos por acción de las poblaciones bacterianas que se encuentran en cada uno de los estanques dispuestos para este fin. Uno de los factores que condiciona el desarrollo de los peces y otras especies acuáticas es la temperatura, en el caso de las poblaciones bacterianas algunas se ven favorecidas otras no, condicionando su desarrollo. El oxígeno disuelto en las aguas es requerido para poder metabolizar diversos procesos durante toda su vida (León, 1992). Asimismo, existen diversos parámetros que permiten su caracterización, así tenemos:

Nitrógeno

Considerado nutriente, es un elemento químico que existe de manera natural en el ambiente atmosférico como acuático y lo podemos encontrar en sus formas de nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amonio (NH_4^+) y nitrógeno orgánico, en diferentes estados de oxidación. Todas estas formas, logran relacionarse bioquímicamente en el ciclo de este elemento. La concentración de nitrógeno total generalmente suele estar en un rango de 8,0 a 8,5 mg/L y esto es por un proceso de tratamiento primario natural que sucede en sus aguas. A su vez el nitrógeno total concentra a las formas amoniacales y orgánicas como las más influyentes y predominante, mientras las formas nítricas suelen ser muy bajas. En los humedales artificiales los procesos referidos a la remoción de este nutriente son de tipo biológico y en menor frecuencia los de tipo químico (Fernández *et al.*, 2015).

Fósforo total

Este nutriente se puede encontrar en las aguas residuales principalmente en forma de fosfatos y estos presentarse en partículas o disuelta en el cuerpo de agua. Clasifican a este nutriente en su forma orto (ortofosfatos), en su forma orgánica (fósforo orgánico) o fósforo

condensado (piro-meta y polifosfatos). Las variaciones de las formas orgánicas del fósforo se suceden principalmente por procesos biológicos y suelen estar presentes en el agua residual como residuos de alimentos; mientras que las variaciones de las formas inorgánicas son principalmente producto de la aplicación de agentes de limpieza y otros insumos usados en la agricultura como los fertilizantes agrícolas (Fernández *et al.*, 2015).

La presencia del fósforo en los ecosistemas es de mucha importancia y está relacionada estrechamente con la presencia del nitrógeno. El fósforo, como otros elementos, es saludable e incluso necesario en cantidades limitadas. Sin embargo, cantidades excesivas de fósforo pueden causar un tipo de contaminación llamada eutrofización. Este es un proceso donde hay una estimulación agresiva de algas y otras plantas simples lo que finalmente agota el oxígeno en ciertas áreas y crea lo que se conoce como zonas muertas en el agua. Este proceso no solo destruirá la vida acuática, sino que también puede causar el agotamiento de la fauna y la flora saludables. Este tipo de contaminación por nutrientes puede crear problemas ambientales en todo, desde arroyos y ríos hasta lagos y zonas costeras (Fernández *et al.*, 2015).

Según lo informado por Londoño y Marín, (2009, p. 32):

El fósforo está normalmente presente en aguas residuales en forma de ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La oxidación biológica da como resultado que la mayoría del fósforo sea convertido a ortofosfatos. Los mecanismos de remoción de fósforo son principalmente adsorción, absorción por plantas, formación de complejos y precipitación.

Remoción de nitrógeno en aguas residuales

El nitrógeno puede ser producido tanto por fuentes naturales como antropogénicas. En la actualidad existen varias técnicas para la eliminación de los nitratos en las aguas. Estas se pueden clasificar en dos grupos: La primera está referida a la técnica de separación, y es aplicada para el retiro de nitratos principalmente de los cuerpos de agua, posteriormente, se concentran para su tratamiento por electrodiálisis o por osmosis inversa. La segunda técnica es la de transformación y está referida al cambio de los nitratos en otros compuestos inocuos para lo cual se usan instrumentos a través de vías bioquímicas (Palomares, 2013).

Remoción de fósforo en aguas residuales

Von Sperling (2012) menciona una serie de metodologías para la disminución de fósforo que han podido ser mejorados en los últimos años, estos pueden ser explicados a través de: Eliminación biológica de fósforo por plantas de tratamiento, los sistemas de disposición controlada en el suelo, lodos activados, reactores aerobios con biopelícula y la remoción por procesos físico-químicos. Estas tecnologías tienen una dependencia referida a la inclusión de otros contaminantes, la falta de espacio y el destino final del recurso. El método seleccionado frecuentemente está determinado por una variedad de factores que pueden incluir las características generales del agua que se trata, la instalación del proceso que se utiliza, el resultado que se desea y los costos involucrados.

La precipitación química es el proceso más utilizado para eliminar el fósforo del agua. Normalmente implica el uso de coagulantes de hierro y aluminio y a veces se usa hidróxido de calcio o cal. Cuando los productos químicos se colocan en las aguas residuales durante el proceso de sedimentación primaria, se denomina pre-precipitación. Los productos químicos también se pueden agregar durante el proceso posterior a la precipitación o durante el mismo, lo que se denomina coprecipitación (Oyarzo, 2007).

La remoción biológica permite agregar diferentes tipos de bacterias al agua para eliminar el exceso de fósforo. Los organismos acumuladores de polifosfatos (PAO) son principalmente bacterias que pueden ayudar a facilitar el proceso de eliminación del fósforo. Se debe de considerar, además, que una de las condiciones críticas en la remoción del fósforo es la exposición a condiciones aerobias y anaerobias que se someten a las bacterias (Oyarzo, 2007).

Otros parámetros importantes para evaluar

Potencial de hidrógeno (pH)

Este parámetro indica la presencia de iones de hidrógeno en el agua, el cual identifica si el medio acuático se encuentra en un medio ácido, neutro o básico dependiendo del valor que

registre, siendo el rango establecido por la norma peruana de 6,5 a 8,5 para este tipo de actividad (Figueroa, 2018).

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

Este parámetro indica la carga orgánica en el cuerpo de agua usada para una determinada actividad, ya que representa la cantidad de oxígeno necesaria para degradar la porción orgánica que generalmente proviene de residuos metabólicos de los organismos. La DBO₅ presenta niveles máximos de 100 mg/L en el efluente liberados a cuerpos naturales como son los lagos, ríos y mares (Figueroa, 2018).

Demanda química de oxígeno (DQO)

Este parámetro representa el oxígeno disponible para que elementos orgánicos e inorgánicos se oxiden en el agua y se utiliza principalmente la reacción con el dicromato potásico. Se considera que la DQO es siempre superior que la DBO y según la norma peruana el valor no debe superar los 200 mg/l en el efluente que se libera al cuerpo de agua natural (Figueroa, 2018).

1.2.3. Biorremediación para el tratamiento de aguas residuales

La fitorremediación es una de las variantes de la biorremediación cuyo objetivo principal es descartar o disminuir las sustancias no deseables en el agua a niveles delimitados que permiten una óptima distribución o aprovechamiento en determinadas actividades. Esta metodología para el tratamiento convencional de aguas servidas consiste en una interrelación de procesos físicos, químicos y biológicos para reducir sustancias consistentes, compuestos orgánicos, nutrientes y microorganismos perjudiciales, tal como lo menciona Pescod (1992). La fitorremediación es una alternativa que complementa los tratamientos convencionales o tradicionales más utilizados, que permite reducir costos y mejorar procesos en el tratamiento de algunos efluentes principalmente aquellos con alta carga orgánica.

La fitorremediación entonces se puede definir como una tecnología amigable con el ambiente que utiliza como principal herramienta a las plantas para reducir *in situ* la

presencia de contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica y que pueden estar en suelos, sedimentos, agua y aire, generando una serie de procesos bioquímicos desarrollados principalmente en órganos como las raíces de las plantas y por otros microorganismos, donde los agentes contaminantes son transformados en formas reducidas, oxidadas, mineralizadas y volatilizadas. Esta tecnología funcional permite asociar mecanismos fisiológicos de las plantas y los microorganismos, para reducir las sustancias contaminantes presentes en el sustrato, tales como la fitodegradación, fitoestimulación, fitoestabilización, fitoextracción y rizofiltración (Olguín y Sánchez-Galván, 2010).

Sistema de tratamiento con macrófitas flotantes

Thomaz *et al.* (2008) mencionan que alrededor del mundo existen diversas plantas acuáticas consideradas como malezas invasoras, muchas de ellas consideradas indeseables por la característica principal que ellas tienen relacionadas a su crecimiento acelerado lo que puede ser una amenaza en la funcionalidad de los ecosistemas. Las principales características de las macrófitas flotantes son:

- Lograr reproducción asexual vegetativa.
- Presentar una tasa de crecimiento acelerada.
- Presenta estrategias de supervivencia eficientes.
- Logran colonizar ecosistemas diversos, especialmente aquellos que presentan mejores condiciones climáticas.
- Actúan como medio de soporte del microcosmos de organismos favoreciendo su desarrollo.
- Tener la capacidad de captar los nutrientes presentes en las aguas; así como, transferir el oxígeno desde las raíces a órganos aéreos. Además, captar el carbono y otros nutrientes a diversos tejidos necesarios para el metabolismo.

Una de las características de las plantas flotantes es que su capacidad fotosintética es mayor que las sumergidas dado que la mayor parte de ellas están bajo agua lo que provoca que su crecimiento no sea el deseado, más aún si el cuerpo de agua presenta turbiedad (Delgadillo *et al.*, 2010).

1.2.4. “Lenteja de agua” *Lemna minor*

Según lo descrito por Sarango y Sánchez (2016, p.10):

También denominada macrófita es una planta acuática que flota libre en aguas estancadas o ríos con un curso lento de agua, sus hojas son ovaladas y planas con un tamaño que varía de 0,1 cm a 2 cm, necesitan de una iluminación intensa; soportan cambios climáticos y la temperatura puede ser de 15 a 25 °C, y a pesar de ser una planta flotante no presenta tallo separado de las hojas y posee una fusión conocida como fronda.

En la Figura 1, se observa la morfología de *Lemna minor* la cual tiene un tamaño de 10 mm y presenta una lámina de color verde o verde amarillento con una alta dependencia a la iluminación como parte de su requerimiento fisiológico; las raíces cortas generalmente están la lámina interna y permiten captar los alimentos del agua para el desarrollo de la planta. En muchas latitudes, estas plantas son considerados plaga por su poder colonizador; lo que ha permitido ser usado como alimento par peces y como material para procesos de remediación. Estas plantas toleran muy bien la poca iluminación y con respecto al pH se han realizado investigaciones en donde se detalla la adaptación a extremos ácidos como alcalinos. Su reproducción está dada por la forma asexual de gemación (formación de brotes pequeños) y es de desarrollo acelerado al aire libre (Curt, 2010).

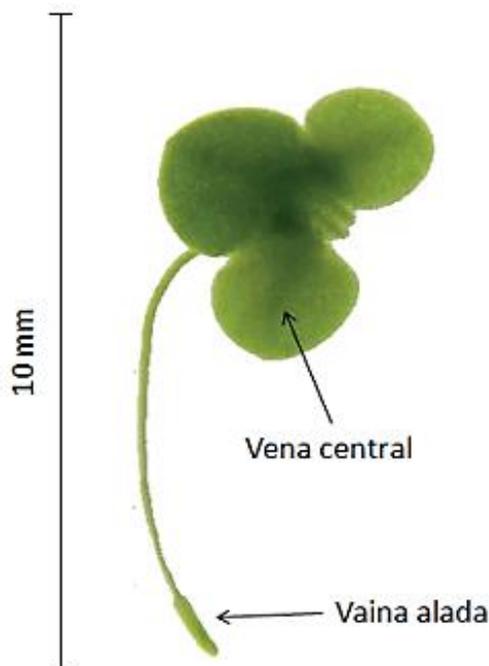


Figura 1. Morfología de *Lemna minor*. Fuente: Hidalgo-Nicho y Iannacone (2020).

Parámetros de crecimiento de *Lemna minor*

Temperatura

La macrófita *Lemna minor* es una especie tolerante a rangos altos de temperatura, teniendo como rango óptimo temperaturas de 15 a 18° C. Se ha observado que esta macrófita puede tolerar temperaturas bajas de 5 °C permitiéndole una alta supervivencia y crecimiento en condiciones extremas, por lo que esta especie se adapta a cualquier condición de temperatura en especial a cortos periodos. La iluminación a su vez, en esta especie, ha permitido referenciar una alta capacidad de respuesta a este estímulo (Arroyave, 2004).

Iluminación

La iluminación generada por la radiación solar es un factor que es aprovechado por *Lemna minor* y esto es factible gracias a sus pigmentos que son usados como fuente energética para diversos procesos fisiológicos. Existe intervalos de saturación de la intensidad luminosa que van a favorecer el crecimiento de *Lemna minor*; a su vez, queda demostrado que el parámetro de temperatura influye a una alta eficiencia energética relacionada con la iluminación (Arroyave, 2004).

Densidad y cosecha

Para el cultivo y cosecha de la lenteja de agua se deben de considerar:

1. Que las plantas cubran toda el área de la superficie en experimentación.
2. Que los sistemas presenten bajas profundidades para que las lentejas puedan utilizar la mayoría de los nutrientes.
3. Que las aguas sean ricas en contenido inorgánico y orgánico.
4. Esta especie es denso-dependiente, no sólo para la reproducción sino para funciones esenciales como la fotosíntesis, lo que podría generar bajas posibilidades de reproducción por área evaluada.

Composición química del agua para el desarrollo de *Lemna minor*

A los miembros de la familia Araceae se les llama “lentejas de agua” y presentan distribución cosmopolita, habiéndose registrado en distintas regiones extremas. La mayoría de los miembros de esta familia se han descrito para climas tropicales y algunas zonas templadas. Se desarrollan notablemente en cuerpos de agua ricos en nutrientes, con altos niveles de nitrógeno y fósforo principalmente, esta característica va a definir el valor nutricional de esta planta (Luevano, 2016). Se describen los comportamientos de esta planta en diversos parámetros fisicoquímicos:

pH

Las Araceae presentan adaptaciones diversas que pueden estar en rangos óptimos de crecimiento. McLay (1976) realizó estudios con plantas del género *Spirodela punctata*, *Lemna minor* y *Wolfia australiana*. Los pH estudiados se suscribieron en rangos de 7, 6,2 y 5 respectivamente, con un rango de tolerancia que va del ácido al alcalino.

Salinidad y conductividad

Los altos requerimientos de nutrientes de la “lenteja de agua” indican que es resistente a altos niveles de salinidad. Existen reportes de la capacidad para tolerar diversos problemas, en especial estos contaminantes. Oron *et al.* (1987) encontraron que algunas especies de Araceae cultivadas en aguas salinas logran altos rendimientos a niveles superiores a 4 000 mS/cm. Esta resistencia de *Lemna minor* a altas salinidades es un factor importante para su aplicación en cuerpos de agua con la finalidad de reducir la salinidad presente en lagunas de tratamiento de aguas residuales y reducir así la salinidad de los efluentes.

Nitrógeno

La macrófita *Lemna minor* es una especie vegetal que puede desarrollarse en un amplio rango relacionado con la alimentación. Las tolerancias reportadas por Landolt (1986) es de 0,001 mg/L. Los niveles óptimos en la tolerancia del nitrógeno son variados, habiéndose reportado valores entre 0,6 y 70 mg/L; y para límites máximos valores entre 200 mg/L y 2 800 mg/L (Landolt, 1986).

Lemna minor generalmente puede utilizar nitrógeno en diversas modalidades tales como iones amoniacales o iones de nitrato, habiendo demostrado a través de diversos estudios una gran afinidad por el nitrógeno amoniacal. Este último nutriente se ubica en la fase intermedia de las formas nitrogenadas amonio y amoníaco. El pH del agua va a condicionar la proporcionalidad de este nutriente. Asimismo, está bien establecido que la forma transitoria de amoníaco (NH_4^+) es bastante tóxico para la mayoría de las plantas aún a bajas concentraciones, a diferencia de *Lemna minor*, que usa el nitrógeno para la síntesis de aminoácidos y proteínas (Córdoba *et al.*, 2010).

Fósforo

El fósforo es otro de los nutrientes que favorece notablemente el crecimiento de *Lemna minor*, siendo los ortofosfatos, la principal fuente de fósforo identificada para este grupo vegetal. Junto con la capacidad de absorción eficiente de nutrientes, la “lenteja de agua” puede tolerar altos niveles de nutrientes en las aguas residuales. Por ejemplo, se ha reportado alto crecimiento de *Spirodela polyrrhiza* en presencia de 1,5 g/L de fósforo. La alta tolerancia a los nutrientes es particularmente valiosa para el tratamiento de aguas residuales de organismos porque sus niveles de nutrientes son generalmente muy altos (30 a 100 mg/L de fósforo) (Cheng *et al.*, 2002).

Materia orgánica

La macrófita *Lemna minor* usa como fuente energética a los carbohidratos, sobre todo bajo condiciones de no saturación de luz. Siendo las condiciones de luz óptimas, el estímulo al crecimiento producido por los azúcares se ve reflejado con un crecimiento de la biomasa de la lenteja. Recientemente, se ha demostrado que la luz es el factor significativo que controla el crecimiento de esta planta en ecosistemas eutrofizados con presencia de materia orgánica (Karlsson *et al.*, 2009).

Oxígeno disuelto

Este parámetro reviste de una importancia para el crecimiento celular. Es determinante en el desarrollo de *Lemna minor*, esta planta al ser flotante toma el oxígeno que necesita de la atmósfera (Jaramillo y Flores, 2012).

Dióxido de carbono

El gas dióxido de carbono, es fuente de carbono inorgánico que aporta a especies como *Spirodela polyrrhiza* y *Lemna minor* en fuente energética. Las recientes revisiones de la literatura refieren que las lentejas de agua reducen notablemente el CO₂ a carbohidratos, por el mismo mecanismo básico del ciclo de Calvin o el ciclo reductor de pentosas fosfato. En consecuencia, el carbono captado puede mejorar la producción de azúcar y su almacenamiento por tejidos vegetales. Especies de lentejas de agua que crecen a bajo altos niveles de CO₂ podría presentar algunas ventajas en comparación con otros grupos de plantas. Primero, algunas especies de lenteja de agua tienen estomas no funcionales (hacia arriba) que nunca se cierran, beneficiando el intercambio de gases con el ambiente. Además, la actividad fotosintética en plantas con metabolismo C3 (como lentejas de agua) puede mejorarse aumentando el CO₂ en cualquier sistema (Mohedano *et al.*, 2016).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de investigación

La presente investigación presentó un diseño metodológico experimental debido a que se evaluó la tasa de remoción de nitrógeno y fósforo a diferentes concentraciones de agua residual. Así mismo, presentó un enfoque cuantitativo. El alcance de la investigación correspondió a un estudio explicativo, donde se buscó explicar la variación de la remoción en las diferentes diluciones de agua residual (Hernández *et al.*, 2010).

2.1.1. Lugar y fecha

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Centro de Investigación Biológica – Ancón (Playa Las Conchitas de Ancón alt. km 40 de la Panamericana Norte) y en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, Los Olivos – filial Lima (Jr. Manuel Gonzales Prada 398, Los Olivos 15301); durante los meses de julio a diciembre de 2019.

2.1.2. Descripción del experimento

Obtención de la biomasa de *Lemna minor*

Las plantas de “lenteja de agua” *Lemna minor* fueron recolectadas del humedal de Santa Rosa-Chancay, Lima. El punto de colecta se muestra en el mapa de ubicación (Figura 2) con coordenadas UTM Zona 18 L (WGS 84) 8694611,60 N 262727,50 E. Posteriormente, la biomasa de “lentejas de agua” fueron lavadas con agua potable y seleccionadas (Figura 3) para ser trasladados al laboratorio para su cultivo. Una muestra de la planta fue llevada al Museo de Historia Natural Javier Prado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos para su determinación taxonómica.

Se realizó el cultivo de la “lenteja de agua” bajo condiciones de laboratorio, es decir a 26 °C y con abundante iluminación. Para lograr la adaptación y aumento de la biomasa de la “lenteja de agua”, se utilizó el medio de cultivo hidropónico La Molina® disuelto en agua desionizada estéril en concentraciones estipuladas por el fabricante y colocadas en una bandeja, por un periodo de 10 días.

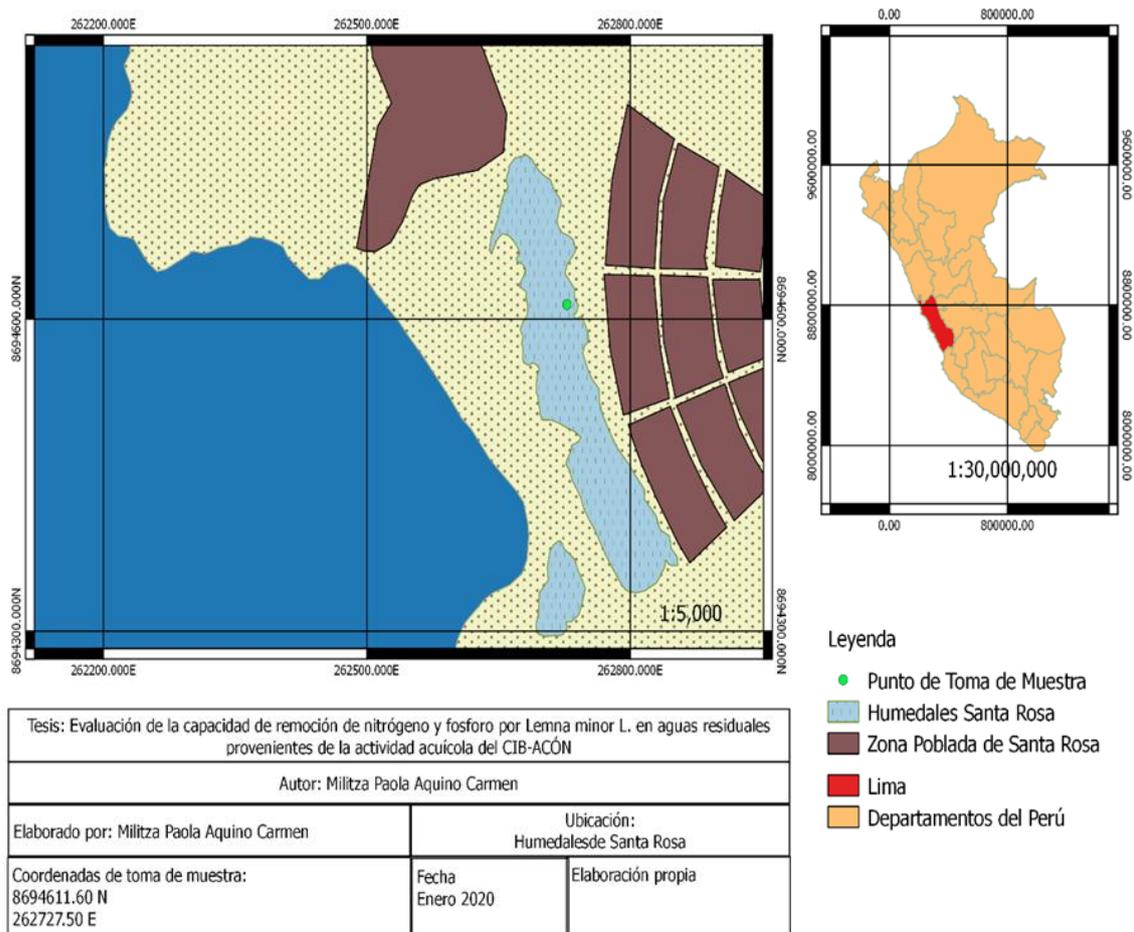


Figura 2. Zona de extracción de *Lemna minor* L. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Recolección y selección de las “lentejas de agua” *Lemna minor* en el humedal de Santa Rosa. Fuente: Elaboración propia.

Obtención del agua residual

Como se muestra en la Figura 4, se recolectó 50,0 L de agua residual del sistema acuícola del CIB-Ancón. El lugar de colecta del efluente fue la poza de engorde que alberga especies de tallas comerciales de “tilapia”, cuyo punto de muestreo se aprecia en la Figura 5. La muestra de agua residual fue trasladada en bidones estériles al Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae y conservada a 4 °C para su posterior uso.



Figura 4. Sistema acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón. (A) Lugar de la toma de muestra de aguas residuales. (B) Recolección total de las muestras. (C) Actividad acuícola en el CIB. Fuente: Elaboración propia.

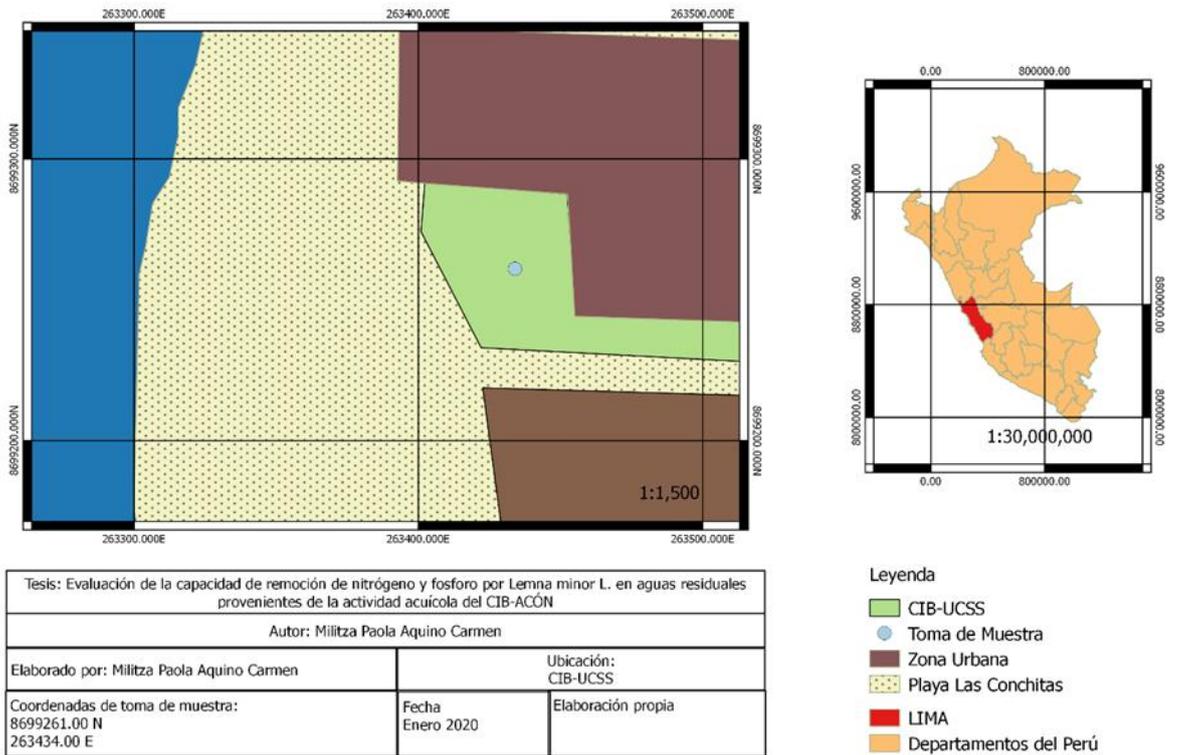


Figura 5. Punto de muestreo del agua residual. Fuente: Elaboración propia.

Caracterización de la concentración de nitrógeno y fósforo del agua residual de la piscigranja

Las mediciones de nitrógeno y fósforo totales del agua residual fueron realizadas en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la UCSS, usándose el fotómetro portátil pHotoFlex WTW® a través de la técnica de fotometría, cuyas longitudes de onda están establecidas bajo sus parámetros estándares patentados. Los resultados fueron comparados con los estándares nacionales e internacionales (APHA, 2008).

Medición de la biomasa de “lenteja de agua” *Lemna minor*

Para realizar la medición de la biomasa fueron extraídas “lentejas de agua” de las bandejas usados para su cultivo. Seguidamente, se realizó el pesaje de la “lenteja de agua” para cada unidad experimental (20 g), usando para ello una balanza analítica. La cantidad de biomasa estimada que se agregó a cada unidad experimental no cubrió toda la superficie del agua para permitir que la planta pueda lograr algún crecimiento. Al finalizar el experimento, se pesó la biomasa obtenida de cada unidad experimental.



Figura 6. Obtención de peso húmedo de biomasa de *Lemna minor*. (A) Obtención de plantas y escurriendo el exceso de agua. (B) Pesaje de la biomasa para cada unidad experimental. Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo totales

Los cálculos de absorción de fósforo y nitrógeno totales fueron realizados a partir de alícuotas (5,0 ml) retiradas a los 14 días de las unidades experimentales. A todos los cálculos de remoción se les realizaron tres mediciones siguiendo la metodología propuesta por Chung *et al.* (1996).

Para obtener el porcentaje de remoción de nitrógeno y fósforo totales, se aplicó la siguiente ecuación:

$$\% Q = \frac{C_o - C_t}{C_o} \cdot 100$$

Donde:

Q% = Porcentaje de remoción.

C_o (mg/L) = Concentración inicial.

C_t (mg/L) = Concentración en un tiempo (t).

Análisis físico químico de las aguas residuales tratadas

En la Figura 7 se muestra el análisis fisicoquímico de las muestras de aguas residuales tratadas (pH, sólidos suspendidos totales, DBO₅, conductividad y temperatura) y fue realizado después del periodo de retención del agua residual (14 días) tal como lo propone León *et al.* (2018).



Figura 7. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales tratadas en laboratorio.
Fuente: Elaboración propia.

2.1.3. Tratamientos

La **Tabla 1** muestra los componentes de los tratamientos a los que fueron sometidas las aguas residuales, las cuales fueron mantenidas a condiciones naturales de temperatura e iluminación natural, y considerando tres repeticiones.

El factor considerado en la presente investigación fue agua residual a diferentes diluciones con agua desionizada. La cantidad de lenteja de agua en cada unidad experimental fue de 20 g tal como lo propone Alvarado *et al.* (2008). El uso del agua desionizada está sustentada al no presentar iones que podrían alterar los resultados.

Tabla 1

Descripción de tratamientos del experimento

Tratamiento (T)	Descripción
T1	500 ml de agua residual + 20 g de <i>Lemna minor</i>
T2	250 ml de agua residual + 250 ml de agua desionizada + 20 g de <i>Lemna minor</i>
T3	125 ml de agua residual + 375 ml de agua desionizada + 20 g de <i>Lemna minor</i>
T4	62,5 ml de agua residual + 437,5 ml de agua desionizada + 20 g de <i>Lemna minor</i>
Control	0 ml de agua residual + 500 ml de agua desionizada + 20 g de <i>Lemna minor</i> .

Fuente: Elaboración propia a partir de Alvarado *et al.* (2008).

2.1.4. Unidades experimentales

La investigación estuvo constituida por 15 unidades experimentales, que corresponde a cuatro tratamientos y sus repeticiones más el control. Los recipientes fueron envases de material plástico, con dimensión de 10 cm de diámetro por 7 cm de alto, con una superficie aproximada de 78,5 cm² y un volumen aproximado de 500 ml. La temperatura del agua fue la misma del laboratorio y estuvo alrededor de 21 ± 0,5 °C, la cual fue medida utilizando un termómetro (JAGER).

2.1.5. Identificación de variables y su mensuración

Las variables de estudio durante el tiempo de duración del proyecto fueron los siguientes:

Variable independiente: Concentración de nutrientes (NT y PT) del agua residual

Variable Dependiente: Variación de NT y PT por *Lemna minor* (además se evaluaron los siguientes parámetros):

- Conductividad eléctrica (CE): Para medir la CE ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) fue empleado el equipo medidor multiparámetro modelo HI 993310.
- Sólidos suspendidos totales (SST): Para medir los SST ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) fue utilizado el equipo medidor multiparámetro modelo HI 993310.
- Potencial de hidrógeno (pH): La medición del pH fue realizada de manera directa a través del uso de un pH-metro. El procedimiento consistió en obtener una muestra de agua de cada tratamiento registrando su valor. Se consideró en todo momento la calibración del pH-metro y el enjuagado con agua destilada después de cada medición.
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$): La medición de la temperatura, fue realizada con un termómetro de mercurio de laboratorio a cada estanque que contenía los tratamientos con sus repeticiones.
- DBO_5 : La medición de la DBO_5 fue realizada al inicio y final de la aplicación de los tratamientos. Para el cálculo de la DBO_5 , las muestras de agua fueron incubadas por 5 días a 21°C usándose la técnica de Winkler modificada.
- NT y PT: La medición de Ambos parámetros se realizó a través de la fotometría, usándose un fotómetro pHotoflex WTW.

2.1.6. Diseño estadístico del experimento

Para el experimento se utilizó un diseño completamente aleatorio (DCA) de efectos fijos con cuatro tratamientos más un control con tres réplicas cada uno respectivamente.

2.1.7. Análisis estadístico de datos

Los valores de los resultados obtenidos de los distintos tratamientos fueron evaluados usando el análisis de varianza (ANOVA) de una vía (Ver Apéndices); además se realizó la prueba de comparaciones medias por pares de Tukey ($p < 0,05$). Las tablas, gráficos y el análisis de contraste lineal, para poder observar la dinámica de los parámetros analizados en el experimento fueron realizadas con el programa Microsoft Excel.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1 Resultados del análisis de parámetros físico-químicos de la muestra inicial de las aguas residuales provenientes del CIB-Ancón

La Tabla 2 presenta los resultados del análisis físico-químico de la muestra inicial de las aguas residuales provenientes del CIB-Ancón. De acuerdo con los resultados obtenidos, tres de los siete parámetros evaluados (42,85 %) no cumple con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua (Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, 2017). Los parámetros que fueron superiores a la norma fueron la DBO (780 %), el fósforo total (451 %) y los sólidos suspendidos totales (203 %). Mientras el parámetro que sí cumplió con la norma fue el pH con $7,04 \pm 0,01$ (Tabla 2).

Por otro lado, no se pudo hacer comparaciones con los parámetros de conductividad eléctrica, nitrógeno total y temperatura debido a las siguientes razones:

- La conductividad eléctrica no aplica para la categoría 4 (E3: ecosistemas marinos y costeros), pero si aplica para la subcategoría E1 con $1,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ y E2 con $1,0 \text{ mS}/\text{cm}^{-1}$
- El nitrógeno total no aplica para la categoría 4 (E3: ecosistemas marinos y costeros), pero si aplica para la subcategoría E1 con $0,315 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.
- La temperatura no aplica a los ECA para agua porque no se encuentra datos actuales de monitoreo de esas aguas residuales.

Tabla 2

Valores promedio de los parámetros correspondientes al análisis físico-químico de la muestra de agua residual inicial del CIB-Ancón

Parámetros	Unidades	Resultado	ECA para agua (2017) ¹	Cumplimiento de ECA para agua
Conductividad	mS.cm ⁻¹	0,45±0,11	-----	NA
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg. L ⁻¹	78,10±1,51	10 mg/L	No
Fósforo total	mg. L ⁻¹	2,8±0,01	0,062	No
Nitrógeno total	mg. L ⁻¹	10,33±0,12	-----	NA
pH	Unidades de pH	7,04±0,01	6,50-8,50	Si
Temperatura	°C	25,00±0,01	Δ2	NA
Sólidos suspendidos totales	mg. L ⁻¹	61,0±1,20	≤ 30	No

1 Decreto Supremo 004-2017-MINAM, Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, E3: Ecosistemas costeros y marinos

Δ2: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

NA: No aplica

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis de la variación los parámetros físico-químico de las muestras de agua residual tratadas con la “lenteja de agua” *Lemna minor*

3.2.1 Variación de la conductividad eléctrica

La Tabla 3 muestra la conductividad eléctrica con valores crecientes con respecto a la medida inicial hecha para cada tratamiento. Así, T1 vario de 0,45 a 1,76 ± 0,27 mS.cm⁻¹, T2 vario de 0,330 a 1,26±0,27 mS.cm⁻¹, T3 vario de 0,199 a 0,65 ± 0,08 mS.cm⁻¹ y T4 vario de 0,144 a 0,48 ± 0,1 mS.cm⁻¹. Las remociones presentaron un valor mínimo de -2172 % para el control seguido de T3 con -425 % y el valor más alto con -242 % para T5.

Tabla 3

Valores obtenidos de la conductividad eléctrica de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” *Lemna minor*

Parámetro	Control ¹	T1 ²	T2 ³	T3 ⁴	T4 ⁵
Conductividad mS.cm ⁻¹	0,10	1,5	1,0	0,6	0,47
	0,45	1,73	1,24	0,61	0,35
	0,22	2,05	1,55	0,76	0,63
Promedio	0,25±0,17	1,76±0,27	1,26±0,27	0,65±0,08	0,48±0,1
Medida Inicial	0,011	0,45	0,330	0,199	0,144
Remoción (%)	-2172	-291	-281	-425	-242

¹Control: 500 ml agua desionizada + 20g *Lemna minor*

²T1: 500 agua residual + 20g *Lemna minor*

³T1: 250 agua residual+250 agua desionizada+ 20g *Lemna minor*

⁴T1: 125 agua residual+375 agua desionizada+ 20g *Lemna minor*

⁵T1: 62,5 agua residual+437,5 agua desionizada+ 20g *Lemna minor*

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de varianza (ANOVA) para los tratamientos como factor fijo indicó que existen diferencias significativas para la conductividad eléctrica según la combinación de tratamientos (ver Apéndice 1). El análisis post hoc de comparaciones múltiples de Tukey mostró diferencias significativas al 5 % en todas las comparaciones de conductividad con los tipos de tratamientos (ver Apéndice 2). La Figura 8 muestra la variación de la conductividad eléctrica en relación con diferentes tratamientos y la significancia según la prueba de Tukey expresada en letras.

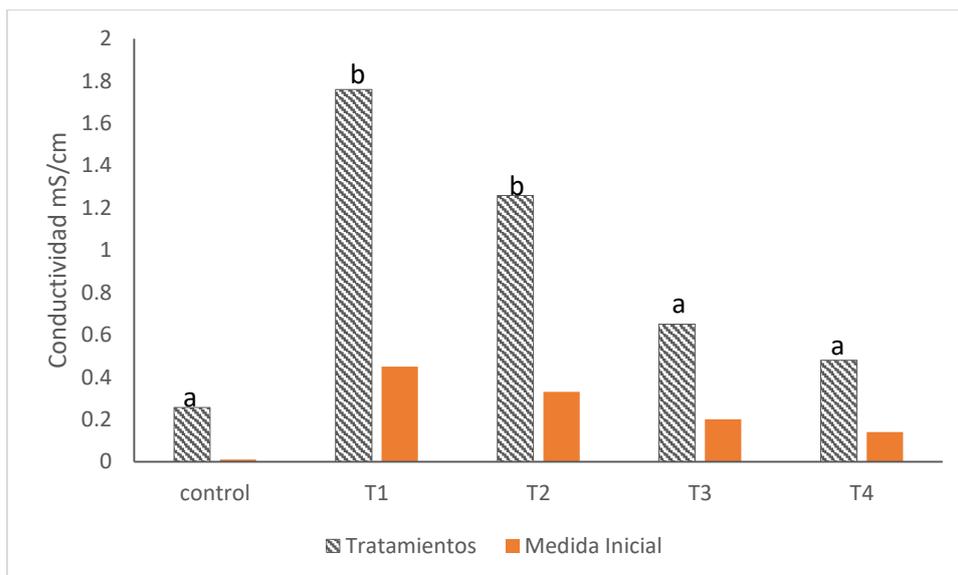


Figura 8. Resultados de la conductividad eléctrica de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos a los 14 días.

Nota: Según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Variación de la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La Tabla 4 muestra los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos con valores decrecientes. Así, T1 vario de 78,1 a $8,6 \pm 2,08$ mg. L⁻¹, T2 vario de 61,0 a $16,6 \pm 2,5$ mg. L⁻¹, T3 de 50,12 a $17,6 \pm 4,50$ mg. L⁻¹ y T4 varió de 59,20 de y $16 \pm 3,6$ mg.L⁻¹. Las remociones presentaron un valor mínimo de -80 % para el control seguido de T3 con 64,88%, siendo el valor más alto con 88,9 % para T1.

El análisis de la varianza (ANOVA) para los tratamientos como factor fijo indicó que existen diferencias significativas para la demanda bioquímica de oxígeno según la combinación de tratamientos (ver Apéndice 3). La Figura 9 muestra la variación de la DBO en relación con los tratamientos; además, se muestra la significancia según la prueba de Tukey, en la que se observa diferencias significativas al 5 % sólo en T1 y T3 (ver Apéndice 4).

Tabla 4

Valores obtenidos de la demanda bioquímica de oxígeno de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” *Lemna minor*

Parámetro	Control	T1	T2	T3	T4
DBO ₅	9	8	17	22	15
(mg. L ⁻¹)	10	11	14	18	20
	8	7	19	13	13
Promedio	9±1	8,6±2,08	16,6±2,5	17,6±4,50	16,0±3,6
Medida inicial	5,04	78,1	61,0	50,12	59,20
Remoción (%)	-80	88,9	72,78	64,88	79,12

Fuente: Elaboración propia.

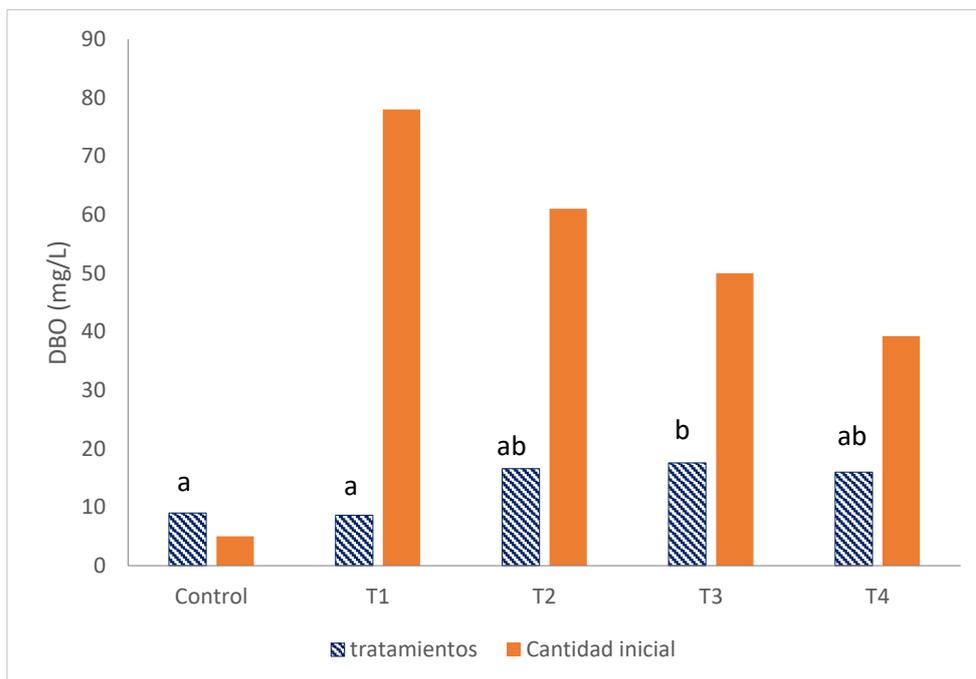


Figura 9. Resultados de la Demanda bioquímica de oxígeno de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes.

3.2.3 Variación del fósforo total

En la Tabla 5 se observan los resultados del fósforo total (PT) de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos. Así, T1 vario de 2,8 a $1,86 \pm 1,07$ mg. L⁻¹, T2 vario de 2,01 a $2,73 \pm 0,4$ mg.L⁻¹, T3 de 1,45 a $2,1 \pm 0,49$ mg.L⁻¹ y T4 de 1,21 a $0,72 \pm 0,68$ mg.L⁻¹. Las remociones del PT presentaron un valor mínimo de -80,0 % para el control, seguido del T3 con -44,82 % y el valor más alto con 40,49 % para T4.

Tabla 5

Valores del fósforo total de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor

Parámetro	Control	T1	T2	T3	T4
Fósforo total	0,14	1,1	2,8	1,9	1,5
(mg. L ⁻¹)	0,06	3,1	3,2	1,8	0,22
	0,09	1,4	2,5	2,7	0,44
Promedio	$0,09 \pm 0,04$	$1,86 \pm 1,07$	$2,73 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,49$	$0,72 \pm 0,68$
Medida inicial	0,05	2,8	2,01	1,45	1,21
Remoción (%)	-80,0	33,5	-35,82	-44,82	40,49

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de varianza (ANOVA) para los tratamientos como factor fijo indicó que existen diferencias significativas para el fósforo total según la combinación de tratamientos (ver Apéndice 5). La Figura 10 muestra la variación del fósforo total en relación con los tratamientos; además, se muestra la significancia según la prueba de Tukey, en la que se observa diferencias significativas al 5 % sólo en T2 (ver Apéndice 6).

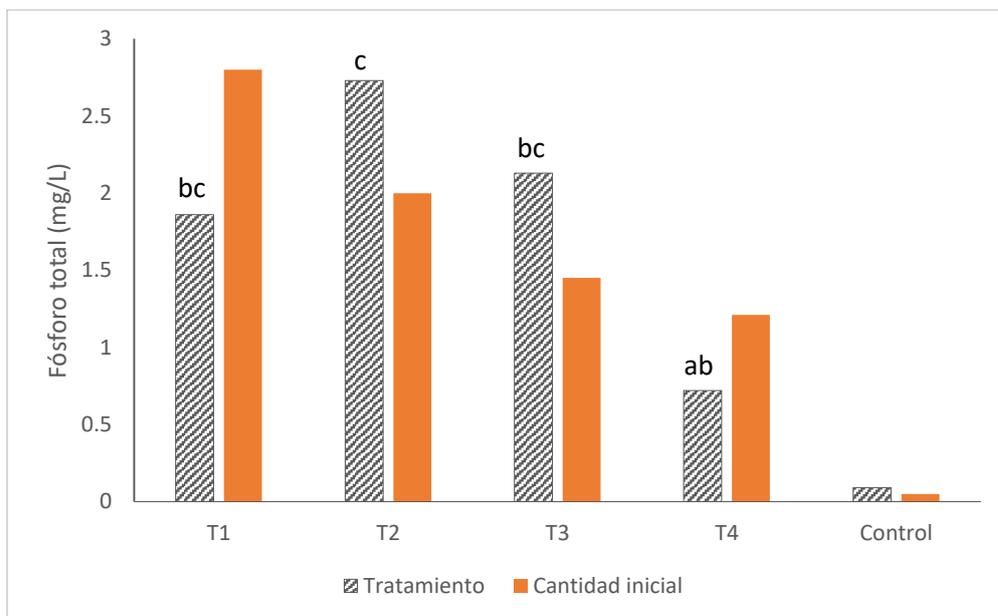


Figura 10. Resultados del fósforo total de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes.

3.2.4 Variación del nitrógeno total

La Tabla 6 muestra los resultados de la variación de nitrógeno total (NT) de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos. Así, para T1 vario de 10,33 a $3,4 \pm 0,72$ mg. L⁻¹, para T2 vario de 7,88 a $5,7 \pm 0,26$ mg. L⁻¹, para T3 vario de 5,33 a $8,0 \pm 0,26$ mg. L⁻¹ y T4 vario de 3,01 a $8,5 \pm 0,15$ mg. L⁻¹. Las remociones presentaron un valor mínimo de -466 % para el control, seguido de T4 con -182,39 y el más alto con 67,08 % para T1 (**Tabla 6**).

El análisis de varianza (ANOVA) para los tratamientos como factor fijo indicó que existen diferencias significativas para el nitrógeno total según la combinación de tratamientos (ver Apéndice 7). La Figura 11 muestra la variación del NT en relación con los tratamientos; además, se muestra la significancia según la prueba de Tukey, en la que se observa diferencias significativas al 5 % sólo en T1 y T2 (ver Apéndice 8).

Tabla 6

Valores del nitrógeno total de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua”
Lemna minor

Parámetro	Control	T1	T2	T3	T4
Nitrógeno total	0,55	4,2	5,4	8,2	8,4
(mg. L ⁻¹)	0,65	2,8	5,9	7,7	8,6
	0,33	3,2	5,8	8,1	8,7
Promedio	0,51±0,16	3,4±0,72	5,7±0,26	8,0±0,26	8,5±0,15
Medida Inicial	0,09	10,33	7,88	5,33	3,01
Remoción (%)	-466	67,08	27,66	-50,94	-182,39

Fuente: Elaboración propia.

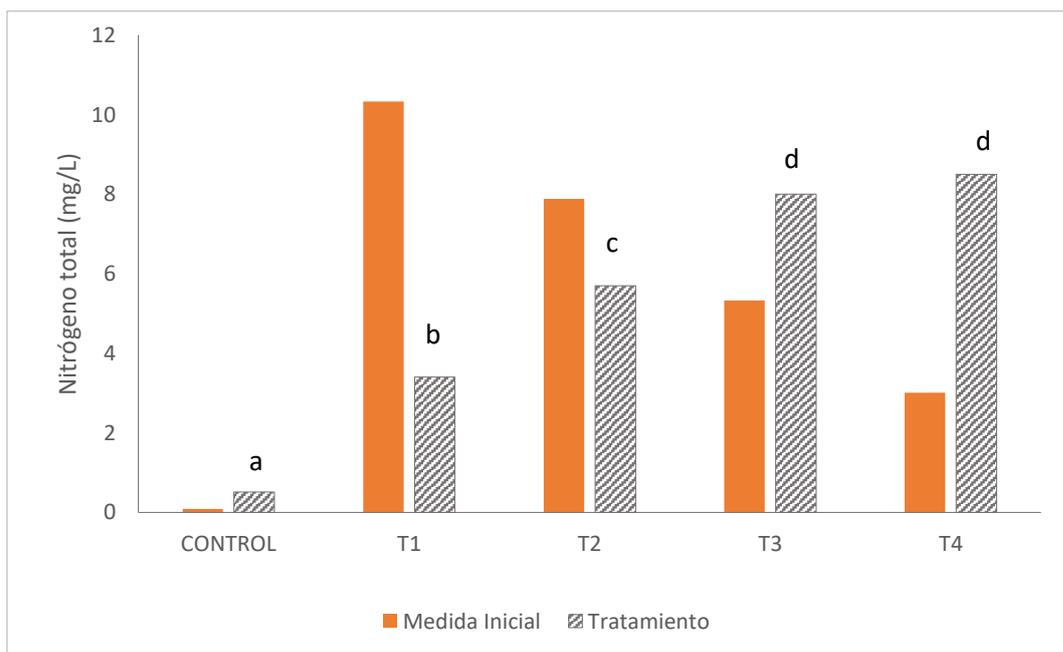


Figura 11. Resultados del nitrógeno total de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes.

3.2.5 Variación del pH

En la Tabla 7 se observa los resultados del pH de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos con valores promedios de $6,8 \pm 0,85$ para T1, $6,4 \pm 0,66$ para T2, $6,5 \pm 1,5$ para T3 y $6,8 \pm 0,15$ para T4. Los tratamientos T1 y T4 cumplen con el ECA para agua (categoría 4, subcategoría 3; pH: 6,8-8,5).

Tabla 7

Valores del pH de las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” Lemna minor

Parámetro	Control	T1	T2	T3	T4
pH	7,0	7,7	7,2	6,4	6,7
	7,4	6,9	5,9	5,1	6,8
	7,2	6,0	6,3	8,1	7
Promedio	$7,2 \pm 0,2$	$6,8 \pm 0,85$	$6,4 \pm 0,66$	$6,5 \pm 1,5$	$6,8 \pm 0,15$
Medida inicial	7,01	7,12	7,02	7,10	7,20

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de varianza (ANOVA) para los tratamientos como factor fijo indicó que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) para el pH según la combinación de tratamientos (ver Apéndice 9). La Figura 12 muestra la variación del pH en relación con los tratamientos; además, se muestra la significancia según la prueba de Tukey, en la que se observa diferencias significativas al 5 % en todos los tratamientos y en el control (ver Apéndice 10).

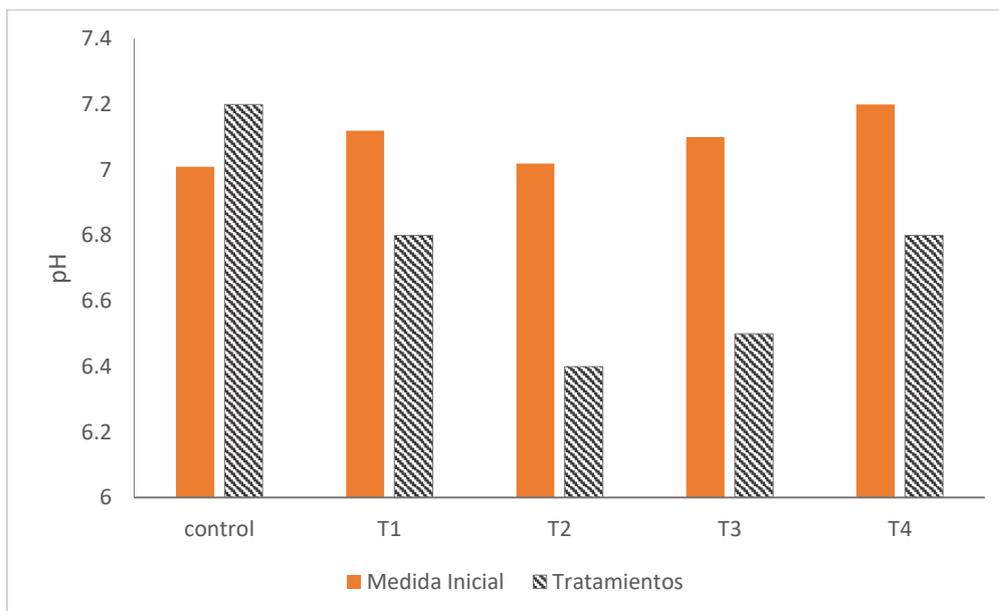


Figura 12. Resultados del pH de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos.
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes.

3.2.6 Variación de Sólidos suspendidos totales

En la Tabla 8 se observa los resultados de sólidos suspendidos totales de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos con valores promedios de $38,66 \pm 5,0$ para T1, $26,0 \pm 1,0$ para T2, $21,3 \pm 1,52$ para T3 y $20,83 \pm 5,2$ para T4. Los tratamientos T2, T3 y T4 cumplen con el ECA para agua (categoría 4, subcategoría 3; $< 30 \text{ mg. L}^{-1}$). Los tratamientos T1, T2, T3 y T4 presentaron remociones significativas, siendo el valor máximo para T3 (49,96 %), seguida de T2 (48,51 %), T1 (37,7 %) y T4 (37,31%).

El análisis de varianza (ANOVA) para los tratamientos como factor fijo indicó que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) para sólidos suspendidos totales según la combinación de tratamientos (ver Apéndice 11). La Figura 13 muestra la variación del SST en relación con los tratamientos; además, se muestra la significancia según la prueba de Tukey, en la que se observa diferencias significativas al 5 % en todos los tratamientos y en el control (ver Apéndice 12).

Tabla 8

Valores de los sólidos suspendidos totales en las muestras de agua residual tratada con “lenteja de agua” *Lemna minor*

Parámetro	Control	T1	T2	T3	T4
	1,2	38,0	27	20	25
SST	0,9	44,0	26	21	22,5
	0,6	34,0	25	23	15
Promedio	0,9±0,3	38,66±5,0	26,0±1,0	21,3±1,52	20,83±5,2
Muestra inicial	0,10	61,0	50,55	42,57	33,23
Remoción (%)	-800	37,70	48,51	49,96	37,31

Fuente: Elaboración propia.

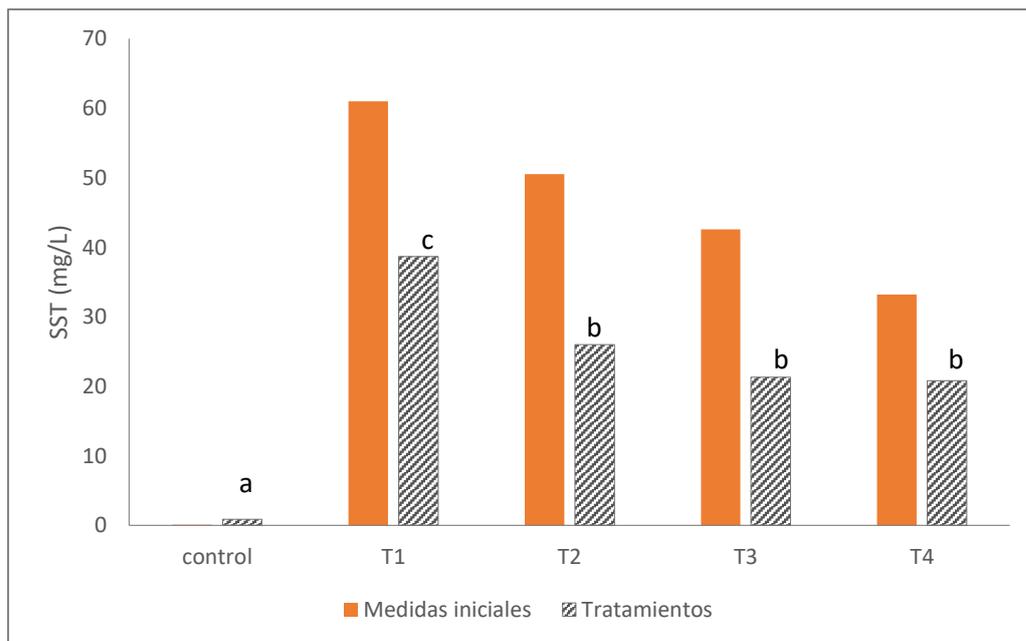


Figura 13. Resultados de los sólidos suspendidos totales de la muestra de agua residual en los diferentes tratamientos. Fuente: Elaboración propia.

Nota: Según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes.

3.4 Efecto de las diferentes diluciones de agua residual en la variación de la biomasa de *Lemna minor*

La Tabla 9 muestra la variación de la biomasa húmeda de *Lemna minor* por las diferentes concentraciones de NT y PT en el agua residual proveniente de la piscigranja del CIB-Ancón con valores promedio de 26,7±1,5 g para T1, 21,46±1,6 g para T2, 20,6±1,52 g para T3 y 19,73±1,48 g para T4. Se muestra el porcentaje de incremento de la biomasa de la “lenteja de agua”, siendo el valor de 33,5 % para el T1, 7,3 % para T2, 3,0 % para T3 y -3,6% para T4. La Figura 14 muestra el porcentaje de remoción de NT y PT versus el porcentaje (%) incremento de biomasa de *Lemna minor*.

Tabla 9

Variación de la biomasa húmeda de Lemna minor en el agua residual proveniente de la piscigranja del CIB-Ancón al término del experimento

	Biomasa Húmeda (g)				
	Control	T1	T2	T3	T4
	17	25	23,2	19	18,1
	16,2	28	21,2	21	21
	18,0	27,3	20,0	22	20,1
Promedio	17,06±0,9	26,7±1,5	21,46±1,6	20,6±1,52	19,73±1,48
% incremento	-----	33,5	7,3	3,0	-3,6

Nota: Todos los tratamientos iniciaron con 20 g.

Fuente: Elaboración propia

El análisis de la varianza (ANOVA) fue realizado para los tratamientos como factor fijo y como variables dependientes a los porcentajes de remoción de NT, PT y el porcentaje de incremento de la biomasa, indicando que existen variaciones significativas ($p < 0,05$) entre ellos (ver Apéndice 13).

En cuanto a la remoción de nitrógeno total versus tipo de tratamiento, la prueba de rango múltiple de Tukey mostró diferencias significativas al 5 % en todos los tratamientos y el

control. El análisis post hoc de Tukey aplicado al porcentaje (%) de remoción de PT versus tipo de tratamiento mostró diferencias al 5 % sólo en el T2 y el control (ver Apéndice 14).

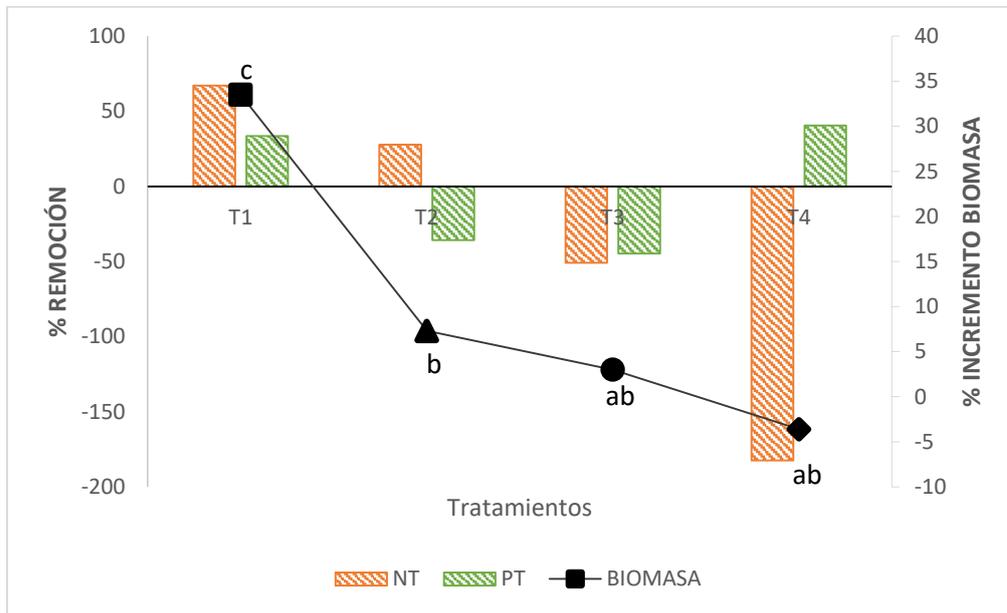


Figura 14. Porcentaje de remoción de NT y PT vs % incremento de biomasa de *Lemna minor*. Fuente: Elaboración propia.

Nota: según la prueba de Tukey, los tratamientos que no comparte una letra son significativamente diferentes

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1 Análisis de parámetros físico-químicos de la muestra inicial de las aguas residuales provenientes del CIB-Ancón

La actividad acuícola genera un flujo continuo de aguas residuales, asociado a una intensa producción de peces. Durante esta producción se generan una gran cantidad de residuos en suspensión y disueltos que van a permitir su caracterización para poder realizar el correcto tratamiento de sus aguas. El nitrógeno total y el fósforo total son parámetros que están asociados a las excretas, en este sentido Luna-Imbacuán *et al.* (2016) evaluaron aguas residuales de piscigranjas reportando un valor promedio de NT de $4,7 \pm 2,13 \text{ mg. L}^{-1}$ y PT de $0,6 \pm 0,24 \text{ mg. L}^{-1}$. Žaltauskaite *et al.* (2014), realizaron la evaluación de la toxicidad de los efluentes municipales obteniendo $88,34 \text{ mg. L}^{-1}$ y $19,38 \text{ mg. L}^{-1}$ de NT y PT respectivamente; de la misma manera Ozengin y Elmaci (2007) realizaron una investigación del contenido de nutrientes en aguas residuales e industriales, teniendo como valor inicial de NT con $45,8 \text{ mg. L}^{-1}$ y PT con $36,8 \text{ mg. L}^{-1}$. En la presente investigación fue obtenida una mayor concentración de NT y PT con valores de $10,33 \pm 0,12 \text{ mg. L}^{-1}$ y $2,8 \pm 0,01 \text{ mg. L}^{-1}$, respectivamente. En los estudios de investigación de Luna-Imbacuán *et al.* (2016) y el presente informe mantuvieron un flujo discontinuo de 72 horas. En los cuatro estudios se determinó que el NT se encuentra en mayor proporción que el PT, lo cual es congruente, ya que estos estudios reportan que del total de la fracción sólida de nutrientes suministrada en el alimento y aportada por la fuente superficial, el 41 % de nitrógeno y el 26 % de fósforo es retenido y acumulado en los estanques tal como lo refiere Hoyos (2011). Además, estos nutrientes, por la cantidad reportada, podrían generar anoxia y alteraciones negativas a la calidad del agua de los estanques, perjudicando la crianza de los peces.

En relación con la carga orgánica, a través del parámetro DBO₅, la Alianza Global de Acuicultura (GAA) (2015) adoptó inicialmente un límite de DBO₅ de 30 mg. L⁻¹ para estanques acuícolas, valores menores son considerados adecuados para una operación convencional. Las aguas evaluadas del CIB-Ancón presentaron valores altos (78,10±1,5 mg. L⁻¹) para DBO₅, no adecuados para este tipo de actividad acuícola. Lo mismo fue reportado por Sarango y Sánchez (2016), quienes obtuvieron como resultado inicial 11076 mg. L⁻¹ para la DBO₅ siendo considerado por los autores como cargas no aptas para la actividad acuícola.

Los SST son aportados por el alimento no consumido, heces y material particulado de la fuente de suministro. Respecto a este parámetro Luna-Imbacuán *et al.* (2016) determinaron un aporte promedio de 128±71,79 mg. L⁻¹, este valor es alto si se compara con los valores recomendados por Hernández *et al.* (2017) con 80 mg. L⁻¹ como valor máximo para SST en aguas de estanques continentales. Asimismo, Alvarado (2017) para un tratamiento con una masa de 100 g de *Lemna minor*, reportó una concentración promedio de SST inicial de 124 mg. L⁻¹. En la presente investigación se ha obtenido un valor promedio de SST para el agua residual inicial de 61,0±1,20 mg. L⁻¹ menor a lo recomendado por Hernández *et al.* (2017). Por lo descrito de las aguas residuales, se puede establecer que este efluente presenta concentraciones importantes en materia orgánica, sólidos en suspensión y nutrientes que perjudicarían la crianza de organismos acuáticos en los estanques.

4.2 Análisis de la variación de los parámetros físico químicos de las muestras de agua residual tratadas con la “lenteja de agua” *Lemna minor*

En cuanto a la conductividad eléctrica, Coronel (2016) reportó una reducción de la conductividad de 1,22 a 0,33 mS.cm⁻¹ por la actividad de *Lemna minor* en el tratamiento de aguas residuales por un periodo de 10 días de exposición, esta variación de la conductividad influenciada por la “lenteja de agua” se ha visto en algunos casos incrementada. Así, Rodríguez *et al.* (2010) reportaron un aumento de la conductividad eléctrica para aguas residuales domésticas tratadas con *Lemna minor* por un periodo de 7 días de 0,050 a 0,40 mS.cm⁻¹. En la presente investigación la conductividad eléctrica presentó un incremento máximo significativo ($p < 0,05$) en 425 % (de 0,199 a 0,65 mS.cm⁻¹

¹⁾ para T3, lo que podría mostrar que un periodo de 14 días *L. minor* no es eficiente en la remoción de la conductividad eléctrica.

En lo referente a la DBO₅, Guerrero y Jibaja (2019), reportaron remociones de la DBO₅ en un 77,44 % para aguas tratadas con *Lemna*, de la misma manera estudios realizados en el tratamiento de aguas residuales por Coronel (2016) y Alvarado (2017) mostraron remociones del 85,53 % y 57,95 % respectivamente en la DBO₅. De igual forma Sarango y Sánchez (2016) comunicaron en su investigación con aguas residuales que alcanzaron un porcentaje máximo de remoción de la DBO₅ de 73,36 %. En la presente investigación la DBO₅ presentó una reducción significativa ($p < 0,05$) en el T1, que fue reducido de 78,10 a 8,6 mg. L⁻¹ logrando un porcentaje de remoción de 88,9 % por lo que los resultados muestran el potencial de la *Lemna minuta* en la remoción de DBO₅ en el tratamiento de aguas residuales. Además, se debe considerar que García (2012) refiere que estos altos valores de remoción de DBO₅ se deben principalmente, a que las densas raíces de las plantas acuáticas proporcionan más sitios de adhesión para las colonias bacterianas degradadoras de materia orgánica y actúan como filtros de material particulado.

En relación con el fósforo total (PT), Cheng *et al.* (2002) reportaron valores de remoción de fósforo total de 79,1 % en aguas residuales conteniendo nutrientes y tratadas con *Lemna minor* en condiciones de laboratorio. De la misma manera Sarango y Sánchez (2015) lograron remociones de 62,89 % de fósforo total (PT) en aguas residuales de la Extractora Río Manso con la macrofitas *Lemna minor*; así como, 81,88 % de remoción empleando lechuguín (*Eichhornia crassipes*) en el mismo lapso. Similares resultados fueron obtenidos en la presente investigación, donde se logró una disminución significativa ($p < 0,05$) del PT de 1,21 hasta 0,72 mg. L⁻¹ (T4), logrando una remoción máxima de 40,49 %. Estas tasas de remoción del fósforo son favorecidas por la asimilación de este nutriente por la macrofitas durante su crecimiento. Además de la absorción de lenteja de agua, la eliminación de fosfato también puede haber ocurrido por asimilación microbiana, tal como lo refiere Cheng *et al.* (2002) al experimentar la remoción fósforo a diferentes concentraciones de agua residual.

Sobre el nitrógeno total (NT), Núñez *et al.* (2007), reporta una disminución de NT de 14,83 a 4,61 mg. L⁻¹, con una remoción total de 67 % en aguas residuales tratadas con *Lemna sp.* Sarango y Sánchez (2015) reportaron un porcentaje de remoción de NT por lenteja de agua (*Lemna minor*) durante la segunda semana de tratamiento de 67,38 %. Similar resultado fue obtenido en la presente investigación, donde se logró una reducción significativa ($p < 0,05$) del NT de 10,33 a 3,4 mg. L⁻¹(T1), logrando una remoción total de 67,08 %. Estos resultados muestran un alto potencial de remoción de NT por *Lemna*, que podría deberse a una alta actividad biológica, como el proceso de nitrificación y volatilización mediada por microorganismos (bacterias y algas), relacionadas con la “lenteja de agua” y el tiempo de retención de las aguas en el sistema, tal como lo sugiere Prystay y Lo (2001). Por otro lado, León y Chávez (2010) atribuyen la remoción de nitrógeno a la captura que *Lemna* realiza directamente de este nutriente a través de sus raíces y frondas, en porcentajes de 34 a 99 %, e indirectamente a través de su superficie que permite ser sustrato para microorganismos como las algas y bacterias, que generan biopelículas donde se desarrollan procesos de nitrificación y desnitrificación.

Respecto al pH, Castillo (2017) logró obtener valores de pH de 7,37 a 7,52 en tiempos de retención de aproximadamente 30 días para aguas residuales tratadas con *Lemna sp.* Similar aumento del pH fue reportado por Núñez *et al.* (2007), con valores de 7,45 a 7,68 en el tratamiento de aguas residuales con *Lemna*. En la presente investigación el efluente presentó un valor inicial de 7,04 con una reducción significativa ($p < 0,05$) a 6,8 (T1). Esta disminución de pH puede estar relacionada a la acción de los ácidos producidos por la acción bacteriana del sistema y por los exudados liberados por las macrófitas a través de las raíces tal como lo refiere Coleman *et al.* (2001). Además, se observó que los tratamientos mantuvieron su valor de pH entre 6,4 a 6,8 durante todo el experimento, lo que indica que el agua residual presentó una fuerte capacidad de amortiguación. Esta característica es importante para mantener el crecimiento de la lenteja de agua, porque el crecimiento de la macrófita tiende a disminuir el valor de pH de los medios rápidamente sin un tampón, tal como lo expresa Cheng *et al.* (2002)

En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST), León y Lucero (2009) reportaron una reducción del 91,20 % en aguas residuales domésticas tratadas con *Lemna gibba*. Similar

reducción ($p < 0,05$) de los SST de 22,58 a 4,71 mg. L⁻¹, con una remoción total de 78,92 % fue reportada por Coronel (2016) en aguas residuales. Por otro lado, Alvarado *et al.* (2020) reportaron remociones significativas ($p < 0,05$) de SST de un 61,0 % influenciados por *Lemna minor* en 10 días de exposición, en el tratamiento de efluentes industriales. En la presente investigación los SST pudieron ser reducidos significativamente ($p < 0,05$) con una eficiencia máxima de 49,96 % (T3) a 14 días de exposición. Este parámetro que mide la contaminación orgánica logro ser reducida por *Lemna minor*, una especie que puede ser considerada como una alternativa para su uso en el tratamiento biológico

4.3 Efecto de las diferentes diluciones de agua residual en la variación de la biomasa de *Lemna minor*

El crecimiento y adaptación de *Lemna minor* fue continuo y homogéneo en toda su estructura en la mayoría de los tratamientos, excepto el T4 que presentó una disminución de la biomasa ($p > 0,05$) (Apéndice 12) al igual que el T0. En la presente investigación no hubo necesidad de incrementar nutrientes en el cuerpo de agua para lograr el máximo desarrollo, tal como lo refiere Poma y Valderrama (2014), en cuya investigación se mejora la captación de nutrientes para el óptimo desarrollo de esta especie, obteniendo resultados positivos en ambos casos; mientras Sarango y Sánchez (2016) expresa que *L. minor* es una macrofita con una alta eficiencia en la remoción de estos nutrientes que los incorpora con facilidad a su actividad metabólica.

En relación con el desarrollo de *Lemna minor*, este fue mayor, presentando un crecimiento significativo ($p < 0,05$) de la biomasa vegetal en aguas con altos contenidos de nitrógeno total, ya que el nitrógeno amoniacal, ion amonio y nitratos son los nutrientes preferidos por esta especie tal como señala Fang *et al.* (2007) y García (2012). En la presente investigación se ha observado una alta remoción (67,08 %) de este nutriente atribuido a una alta absorción por *L. minor* con un incremento de la biomasa (33,5 %). Además, por la captación de este nutriente en la biopelícula adherida a la planta, tal como lo refiere Ozengin y Elmaci (2007).

Sobre la presencia del fósforo, Ozengin y Elmaci (2007) manifiestan que la remoción de este nutriente de sistemas acuáticos debe principalmente a la absorción de plantas, microorganismos inmovilizados en el tejido vegetal, retención por el sedimento subyacente y por las precipitaciones en la columna de agua. Por otro lado, Cheng *et al.* (2002) manifiesta que las reducciones de este nutriente aumentan cuando están en mayor concentración en los cuerpos de agua, lo que a su vez permite un mayor incremento de biomasa de *Lemna*. En la presente investigación, la disminución de fósforo de las aguas residuales no presentó un patrón en la reducción de este parámetro en los tratamientos, a diferencia del incremento de la biomasa que presentó una reducción moderada en todos los tratamientos. Por lo que, la evaluación del nutriente fósforo no podría considerarse como referente para justificar el incremento de la biomasa en condiciones de laboratorio.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Se establece que las aguas residuales iniciales de la actividad acuícola del CIB-Ancón presentan concentraciones importantes en materia orgánica ($DBO_5=78,10\pm 1,5 \text{ mg. L}^{-1}$) y nutrientes ($NT=10,33\pm 0,12 \text{ mg. L}^{-1}$, $PT=2,8\pm 0,01 \text{ mg. L}^{-1}$) lo que podría dificultar el desarrollo de especies acuícolas destinadas a la acuicultura.
2. Se determinó la eficiencia de la fitorremediación de *Lemna minor* en el agua residual, la cual presentó los mejores valores de remoción en los parámetros que miden la contaminación orgánica como la DBO_5 (T1) y SST (T3); así como los nutrientes PT (T4), NT (T1) y con valores de remoción de 88,9 %, 49,96 %, 40,49 % y 67,08 % respectivamente.
3. En la presente investigación el aumento de la biomasa de *Lemna minor* fue significativa ($p<0,05$) en T1 y T2, estando relacionadas principalmente a aguas residuales con alto contenido de nitrógeno y carga orgánica (DBO_5), por lo tanto, a menor dilución del agua residual hay un mayor incremento de la biomasa de *L. minor* por lo que ésta macrofita en estas condiciones es una buena alternativa para la depuración de aguas residuales de la actividad acuícola, pudiendo eliminar grandes cargas de materia orgánica (expresada en DBO_5) y de nutrientes como el nitrógeno y fósforo.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Se recomienda establecer un sistema de remoción de aguas residuales usando *Lemna minor* en condiciones de campo, para establecer el comportamiento y adaptabilidad de la planta a estas condiciones ambientales, verificando la eficiencia de esta macrofita en el tratamiento de estas aguas,
2. Se recomienda usar *Lemna minor* para otros ensayos con contaminantes para comprobar las características bioacumuladoras de esta planta.
3. En la presente investigación se realizó la fitorremediación en un sistema discontinuo sugiriéndose utilizar en posteriores estudios el empleo de sistemas continuos que son los que se desarrollan en la actividad acuícola.
4. Se recomienda tratar las aguas residuales de piscigranjas antes de ser vertidas a los cuerpos receptores de agua, empleando diversos métodos de biorremediación que sean accesibles y de fácil manejo.

REFERENCIAS

- Agustín D. (2011). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*, E.T.S. Arquitectura (UPM), Madrid.
- Alianza Global de Acuicultura (GAA) (2015). *Normas BAP de plantas de procesamiento*. (4): 1
- Alvarado, K. (2018). *Influencia del uso de Lemna minor en el tratamiento de la contaminación orgánica de los efluentes industriales de Cotexsur, Lurin, 2017*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Huánuco. Perú.
- Alvarado, K., Esenarro, D., Rodríguez, C., y Vasquez, W. (2020). Lemna minor influence in the treatment of organic pollution of the industrial effluents. 3C Tecnología. *Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 9(3), 77-97. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2020.v9n3e35.77-97>
- Alvarado, S., Guédez, M., Lué-Merú, M., Graterol, N., Anzalone A., Arroyo, C. y Gyula, Z. (2008). Arsenic removal from waters by bioremediation with the aquatic plants Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and Lesser Duckweed (*Lemna minor*). *Bioresource Technology* 99, 8436–8440.
- APHA, (1998). *Standards methods for the examination of water and wastewater*. 19th Edition American Water Works Association, Washington DC.
- APHA, AWWA, WEF. (2008). *Standard Methods for examination of water and wastewater*. 22 nd ed. Washington: American Public Health Association. U.S.A.
- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias. Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 07 de julio de 2017, pp. 10-19.
- Arroyave, M. (2004). La lenteja de agua (*Lemna minor* L.): una planta acuática promisoriosa. *Revista EIA*, (1): 33-38
- Axtell, N., Sternberg, S. y Claussen, K. (2003). Lead and nickel removal using *Microspora* and *Lemna minor*. *Bioresource Technology*. 89(1), 41-48.

- Ballard, M. y Pandya, M. (2003). *Conocimientos Básicos en Educación Ambiental. Base De Datos para la Elaboración de Actividades y Programas*. Barcelona: Graó. España.
- Barragán, J., Boy, A., Carballo, A., Colina, A., Doménech, J., Juanes, J., Rodríguez, J., Sardá, R., Villasante, C. (2009) *Gestión integrada de zonas costeras*. Madrid: AENOR Ediciones. España.
- Castillo, E. (2017). *Eficiencia de Lemna sp y Eichhornia crassipes, en la remoción de nutrientes del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales en Celendín*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Centeno, L.M., Burgos, L. C. y Becerra L. (2004). *Determinación de la densidad del agua Tipo I ASTM utilizada en el CENAM con patrones sólidos de densidad*. En: Simposio de Metrología 2004. Oct. 25-27; Santiago de Querétaro, México: CENAM.
- Cheng, J., Landesman, L., Bergmann, B. A., Classen, J. J., Howard, J. W., y Yamamoto, Y. T. (2002). Nutrient removal from swine lagoon liquid by *Lemna minor* 8627. *Transactions of the ASAE*, 45(4), 1003
- Chung, Y.C., Huang, C. y Tseng, C.P. (1996). Biodegradation of hydrogen sulde by a laboratory-scale immobilized *Pseudomonas putida*Ch11 biofilter. *Biotechnology Progress* 12, 773-778.
- Coleman, J., Hench, K., Garbutt, K., Sexstone, A., Bissonnette, G. y Skousen, J. (2001) Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 128: 283-295.
- Córdoba, Z., Mendiola, R., Cerrilla, M., Jiménez, O., Sánchez-Torres, M., Herrera, J. y Becerril, M. (2010). Utilización de la lenteja agua (Lemnaceae) en la producción de Tilapia (*Oreochromis* spp.). *Arch. Zootec.*, 59, 133–155.
- Coronel, E. (2016). *Eficiencia del Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) y Lenteja de agua (Lemna minor) en el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas - Chachapoyas, 2015*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Toribio Rodríguez de Mendoza, Chachapoyas, Perú,
- Curt, M. (2010). *Macrófitas de interés en fitodepuración*. Madrid, España. Capítulo 7.

- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia.
- Escobar, J. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. ONU-División de Recursos Naturales e Infraestructura. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aidis-ar/lc11799e.pdf>.
- Espigares, M y Pérez, J. (2003). *Aguas residuales, composición*. Centro de Investigación y desarrollo Tecnológico del Agua. 22p. http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf.
- Espigares, M. y Pérez, J. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Universidad de Granada.
- Fang, Y., Babourina, O., Rengel, Z., Yang, X. y Pe I. I.P. (2007). Ammonium and Nitrate Uptake by the Floating Plant *Landoltia punctata*. *Annals of Botany*. 99,365–370.
- Fernández, J., De Miguel Beascochea, E., De Miguel Muñoz, J., y Curt Fernández de la Mora, M. D. (2015). *Manual de fitodepuración*. Filtros de macrofitas en flotación. (J. Fernández Gonzalez, Ed.) Madrid.
- Figueroa, J. (2018). *Biofiltros con Furcraea andina y Eucalyptus globulus para mejorar la calidad del efluente de la piscigranja de Acopalca - Ancash - 2018*. (Tesis de licenciatura). Universidad Cesar Vallejo. Lima, Perú.
- Garay, I. (2017). *Eficacia de las macrófitas jacinto y lenteja de agua para disminuir la concentración del boro, en las aguas minerotermales de la Laguna la Milagrosa Chilca, 2017*. (Tesis de grado). Universidad Cesar Vallejo. Lima, Perú.
- García, T. Z. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Guerrero, J. y Jibaja, F. (2019). *Tratamiento del afluente de la laguna de oxidación mediante fitorremediación del Eichhornia crassipes y Lemna minor; en Jaén, Cajamarca*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- Hernández, D., Aguayo, C., Lara, G., Encina, F., Nimptsch, J., Esse, C., Aguayo, F. y Holgge, C. (2017). *Evaluación y análisis de los posibles parámetros ambientales a*

ser incorporados en las normas de emisión y/o de calidad de aguas fluviales y lacustres, destinados a centros de cultivo ubicados en tierra. Temuco, Chile: Universidad Católica de Temuco.

Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación* (5ta ed.). McGraw-Hill: Interamericana. México D.F.

Hidalgo-Nicho, E. y Iannacone, J. (2020). Toxicidad de la mezcla binaria de los plaguicidas Metomilo y Rotenona en la lenteja de agua *Lemna minor* (Linnaeus, 1758). *Biotempo*, 17(1),97-125.

Hoyos, E. (2011). *Evaluación del impacto de la retención de sólidos suspendidos en los estanques de cultivo de trucha sobre la calidad fisicoquímica del agua para la producción de peces.* Universidad del Valle. Cali, Colombia.

Jaramillo, M., y Flores, E. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor y Eichornia crassipes en aguas residuales producto de la minería.* (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.

Karlsson J, Bystrom P, Ask J, Ask P, Persson L y Jansson M. (2009). Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems. *Nature* 460:506–509.

Landolt, E. (1986). *Biosystematic investigations in the family of duckweeds (Lemnaceae). II: The family of Lemnaceae: a monographic study. 1.* Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH. Zurich, Alemania

León, G. (1992). *Acuicultura con aguas residuales.* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

León, B. y Chávez, D. (2010). Tratamiento de residual vacuno utilizando microalgas, la lenteja de agua *Lemna aequinoctiales* y un humedal subsuperficial en Costa Rica. *Latinoam Biotecnol Amb Algal*.1(2):155-177.

León, M y Lucero, A. M. (2009). *Estudio de Eichornia crassipes, Lemna gibba y Azolla filiculoides en el tratamiento biológico de aguas residuales domesticas en sistemas comunitarios y unifamiliares del Canton Cotacachi.* (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.

- León, R., Pernia, B., Sigencia, R., Franco, S., Noboa, A. y Cornejo, X. (2018). Potencial de plantas acuáticas para la remoción de coliformes totales y en aguas servidas. *Enfoque UTE*. 9(4) 131-144.
- Londoño, C. y Marín V. (2009). *Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en Humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética*. (Tesis de grado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Luevano, J. (2016). *Propuesta metodológica para reducir la concentración de nutrientes (PO_4 , NH_4^+ , NO_3^-) en bioensayos a la intemperie con Spirodela polyrhiza*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Altamira, México.
- Luna-Imbacuán, M., Campos-Bermúdez, F. y Medina-Gutiérrez, O. (2016). Evaluación de las aguas residuales del lavado de estanques multipropósito con cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 191–202
- McLay, C.L. (1976). The effect of pH on the population growth of three species of duckweed: *Spirodela oligorhiza*, *Lemna minor* and *Wolffia arhyza*. *Freshwater Biol.*, 6: 125-136
- Mohedano, R., Costa, R., y Belli Filho, P. (2016). Efectos de la concentración de CO₂ en la absorción de nutrientes y la acumulación de almidón por la lenteja de agua utilizada para el tratamiento de aguas residuales y la producción de bioetanol. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 7 (1), 1-12.
- Núñez, M., Carmen, H., Cárdenas de Flores, Ramírez, Y., Rincón, L. y Morales, E. (2007). Remoción de nitrógeno en aguas residuales a través de la planta *Typha dominguensis* y *Lemna* sp. *AIDIS de Ingeniería y ciencias ambientales e investigación, desarrollo y práctica*. 1(2): 198-204.
- Olguín, E.J. y Sánchez-Galván, G. (2010). Aquatic phytoremediation: novel insights in tropical and subtropical regions. *Pure Appl. Chem.* 82 (1): 27–38.
- Oron, G., Porath, D. y Cansen, H. (1987). Performance of duckweed species *Lemna gibba* on municipal wastewater for effluent renovation and protein production. *Biotechnol. Bioeng.*, 29: 258-268.
- Oyarzo, M. (2007). *Precipitación química del fósforo mediante la adición de sulfato de aluminio en plantas de tratamiento de aguas*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Magallanes. Punta Arenas, Chile.

- Ozengin, N. y Elmaci, A. (2007). Performance of Duckweed (*Lemna minor* L.) on different types of wastewater treatment. *Journal of Environmental Biology*. 28(2), 307-314. http://jeb.co.in/journal_issues/200704_apr07/paper_30.pdf
- Palomares, A. (2013). Contaminación del agua por nitratos y técnicas para su tratamiento. Instituto de Tecnología Química (UPV-CSIC). <http://www.esferadelagua.es/agua-y-tecnologia/contaminacion-del-agua-por-nitratos-y-tecnicas-para-su-tratamiento>.
- Pescod, M.B. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture*. FAO irrigation and drainage paper 47. Roma, Italia: FAO.
- Plaza, C. J. (2012). *Remoción de metales pesados empleando algas marinas*. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de la Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Poma, V. y Valderrama, A. (2014) Estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (II) y mercurio (II) con la especie *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 80(3), 164-173.
- Ponce, J.T. y Fitz, M. (2004). *Azolla mexicana* como alimento suplementario en el policultivo de juveniles de tilapia (*Oreochromis hornorum*) y carpa barrigona (*C. C. rubrofuscus*) bajo condiciones semicontroladas. En: I Congreso Nacional de Acuicultura SEPESCA. Pachuca, Hidalgo. México.
- Prystay, W. y Lo, V. (2001). Treatment of greenhouse wastewater using constructed wetlands. *J. Environ. Sci. Health*, 36 (3):341-353
- Ramírez, L. y Sierra, L. (2010). Evaluación de la utilización del duckweed como alternativa de pos-tratamiento de aguas residuales domesticas en efluentes de lagunas de oxidación. *Nova*, 8(13), 44-53. <https://doi.org/10.22490/24629448.438>.
- Rodríguez, J., Gómez, E., Garavito, L., y López, F. (2010). Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y Ciencias del agua*, 1(1), 59-68.
- Romero, J. (2000). "Tratamiento de aguas residuales". Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

- Rosique, M. (2013). *Bioadsorción de cadmio por biomasa de opuntia*. (Tesis de Grado). Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia.
- Sarango, O. y Sánchez, J. (2016). *Diseño y construcción de 2 biofiltros con Eichhornia crassipes y Lemna minor para la evaluación de la degradación de contaminantes en aguas residuales de la extractora Río Manso EXA S.A. "Planta la Comuna"*. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4930#sthash.mc7yJFWW.dpuf>
- Silva, S. y Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo. Revisión de su normativa y Posibilidades de su regulación económica. *Semestre Económico*, 12, No. 23, pp. 13-34 - ISSN 0120-6346 – Colombia.
- Thomaz, S.M., Esteves F.A., K.J Murphy, A.M dos Santos, A. Caliman, y Guariento R.D. (2008). *Aquatic macrophytes in the tropics: ecology of populations and communities, impacts of invasion and humane use*. En Human Impact on Tropical Ecosystems. Oxford: EOLSS Publications.
- Von Sperling, M. (2012). *Principios del Tratamiento Biológico de Aguas Residuales. "Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales"*. Editorial Universitaria, Universidad de Nariño. Colombia.
- Wetzel, R. (1981). *Limnología*. Omega. Barcelona, España
- Žaltauskaite, G. Sujetoviene, A. Čypaite, y A. Aužbikavičiūte (2014). *Lemna minor as a tool for wastewater toxicity assessment and pollutants removal agent*. En 9th International Conference, Environmental engineering. Vilnius, Lithuania.

TERMINOLOGÍA

- **Agua desionizada.** Agua muy tratada de alta resistividad y sin compuestos orgánicos que contempla la eliminación total de impurezas (Centeno *et al.*, 2004).
- **Bioabsorción.** La bioadsorción o biosorción consiste en el mecanismo por el cual se permite la captación de diversas especies químicas por una biomasa (viva o muerta) a través de mecanismos fisicoquímicos o el intercambio iónico, o metabólicos, cuando se utiliza biomasa viva (Rosique, 2013).
- **Bioacumulación.** Hace referencia a la acumulación neta, con el paso del tiempo, de metales u otras sustancias en un organismo a partir de fuentes bióticas y abióticas (Plaza, 2012).
- **Biomasa:** Es la masa total de organismos que conforma una población, comunidad u otra unidad específica. En los ecosistemas naturales, factores abióticos como la calidad del sustrato, el agua el aire y la luz solar, y factores bióticos como la competencia y la tasa de reproducción, influyen en la producción de biomasa (Ballard y Pandya, 2003).
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno.** Es la cantidad de oxígeno requerida, para estabilizar la materia orgánica contenida en aguas contaminadas o aguas industriales residuales, que pueden descomponerse por la acción de microbios aéreos (Espigares y Pérez, 2003).
- **Efluente:** Fluidos de naturaleza acuosa liberado desde un foco emisor (Agustín, 2011).
- **Eutrofización.** Es un proceso que implica el incremento de nutrientes principalmente en cuerpos de agua y que se puede dar de forma natural, pero que puede estar también provocado por la acción antrópica, mediante vertidos ricos en fósforo y nitrógeno. La naturaleza de estos nutrientes se encuentra, principalmente, en las excretas y los

detergentes, aunque las escorrentías agrícolas pueden ser una de las causas de la presencia de estos compuestos (Espigares y Pérez, 2003).

- **Macrófitas Acuáticas:** el término macrofitas acuáticas, se refiere a las formas macroscópicas de vegetación acuática y comprende las macroalgas, las escasas especies de pteridofitos y las verdaderas angiospermas (Wetzel, 1981).
- **Remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno:** La Demanda bioquímica del oxígeno se presenta de manera particulada siendo eliminada por filtración y sedimentación; mientras que la DBO soluble es disminuida por microorganismos que se desarrollan en la superficie de los soportes usados para su reducción; así como en las raíces de las plantas (Londoño y Marín, 2009).
- **Residuo:** Generalmente, sustancia producida por actividades productivas del hombre y que podría acumularse en el ambiente (Silva y Correa, 2009).

APÉNDICES

Apéndice 1

Análisis de la varianza de la conductividad y los tratamientos

Tabla 10

Análisis de la varianza ANOVA de la conductividad

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	4,551	4	1,138	26,868	0,000
Dentro de grupos	0,423	10	0,042		
Total	4,975	14			

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 2

Prueba de Tukey del tratamiento y la conductividad

Tabla 11

Prueba HSD Tukey^a de la conductividad

Tratamiento	N°	Sub conjunto para alfa = 0.05	
		1	2
Control	3	0,2567	
Tratamiento 4	3	0,4833	
Tratamiento 3	3	0,6567	
Tratamiento 2	3		1,2633
Tratamiento 1	3		1,7600
Sig.		0,198	0,084

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 3

Análisis de la varianza de la DBO y los tratamientos

Tabla 12

Prueba de efecto inter sujetos. Variable dependiente DBO₅

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	231,600 ^a	4	57,900	6,433	0,008
Interceptación	2774,400	1	2774,400	308,267	0,000
Tratamiento	231,600	4	57,900	6,433	0,008
Error	90,000	10	9,000		
Total	3096,000	15			
Total corregido	321,600	14			

a. R al cuadrado = ,720 (R al cuadrado ajustada = ,608)

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4

Prueba de Tukey del tratamiento y DBO₅

Tabla 13

Prueba HSD Tukey^{a,b}. DBO₅

Tratamiento	N	Subconjunto	
		1	2
Tratamiento 1	3	8,6667	
Control	3	9,0000	
Tratamiento 4	3	16,0000	16,0000
Tratamiento 2	3	16,6667	16,6667
Tratamiento 3	3		17,6667
Sig.		0,052	0,956

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 9,000.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = .05.

Fuente: Elaboración propia

Apéndice 5

Análisis de la varianza de Fosforo y los tratamientos

Tabla 14

Análisis de la varianza ANOVA de Fosforo

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	14,660	4	3,665	9,162	0,002
Dentro de grupos	4,000	10	0,400		
Total	18,660	14			

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 6

Prueba de Tukey del tratamiento y Fosforo

Tabla 15

Prueba HSD Tukey^a- Fósforo

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Control	3	0,0967		
Tratamiento 4	3	0,7200	0,7200	
Tratamiento 1	3		1,8667	1,8667
Tratamiento 3	3		2,1333	2,1333
Tratamiento 2	3			2,8333
Sig.		0,748	0,117	0,389

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 7

Análisis de la varianza de Nitrógeno y los tratamientos

Tabla 16

Análisis de la varianza ANOVA. - Nitrógeno

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	133,963	4	33,491	235,806	0,000
Dentro de grupos	1,420	10	0,142		
Total	135,383	14			

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 8

Prueba de Tukey del tratamiento y Nitrógeno

Tabla 17

Prueba HSD Tukey^a. - Nitrógeno

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Control	3	0,5100			
Tratamiento 1	3		3,4000		
Tratamiento 2	3			5,7000	
Tratamiento 3	3				8,0000
Tratamiento 4	3				8,5667
Sig.		1,000	1,000	1,000	0,404

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 9

Análisis de la varianza de pH y los tratamientos

Tabla 18

Análisis de la varianza ANOVA. - pH

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	1,037	4	0,259	0,371	0,024
Dentro de grupos	6,987	10	0,699		
Total	8,024	14			

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 10

Prueba de Tukey del tratamiento y pH

Tabla 19

Prueba HSD Tukey^a. - pH

Tratamientos	N	Subconjunto para alfa = 0.05
		1
Tratamiento 2	3	6,4667
Tratamiento 3	3	6,5333
Tratamiento 4	3	6,8333
Tratamiento 1	3	6,8667
Control	3	7,2000
Sig.		0,815

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 11

Análisis de la varianza de sólidos suspendidos totales y los tratamientos

Tabla 20

Análisis de la varianza ANOVA. - SST

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	10438,127	4	2609,532	375,616	0,000
Dentro de grupos	69,473	10	6,947		
Total	10507,600	14			

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 12

Prueba de Tukey del tratamiento y sólidos suspendidos totales

Tabla 21

Prueba HSD Tukey^a. - SST

		SST		
HSD Tukey ^a				
		Subconjunto para alfa = 0.05		
Tratamientos	N	1	2	3
control	3	0,9000		
tratamiento 4	3		20,8333	
tratamiento 3	3		21,3333	
tratamiento 2	3		26,0000	
tratamiento 1	3			38,666
Sig.		1,000	0,379	1,000

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 13

Anova de los tratamientos vs. Peso húmedo vs. Porcentaje de remoción de NT y PT

Tabla 22

Análisis de la varianza ANOVA de los tratamientos vs peso húmedo y remoción (NT y PT)

Peso húmedo	Entre grupos	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
	Entre grupos	151,683	4	37,921	18,184	0,000
Tratamien tos	Dentro de grupos	20,853	10	2,085		
	Total	172,536	14			
	Entre grupos	133,963	4	33,491	235,806	0,000
Nitrógeno	Dentro de grupos	1,420	10	0,142		
	Total	135,383	14			
	Entre grupos	13,902	4	3,475	8,518	0,003
Fósforo	Dentro de grupos	4,080	10	0,408		
	Total	17,982	14			

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 14

Prueba de Tukey aplicado al porcentaje de incremento de la biomasa vs. Tipo de tratamiento

Tabla 23

Prueba HSD Tukey^{a,b}. - Peso húmedo

Tratamientos	N	Subconjunto		
		1	2	3
Control	3	17,0667		
Tratamiento 4	3	19,7333	19,7333	
Tratamiento 3	3	20,6667	20,6667	
Tratamiento 2	3		21,4667	
Tratamiento 1	3			26,7667
Sig.		0,072	0,601	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 2,085.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = .05.

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 15

Registro Fotográfico



Fotografía 1. Recolección de la “lenteja de agua” *Lemna minor* del humedal de Santa Rosa-Chancay, Lima.



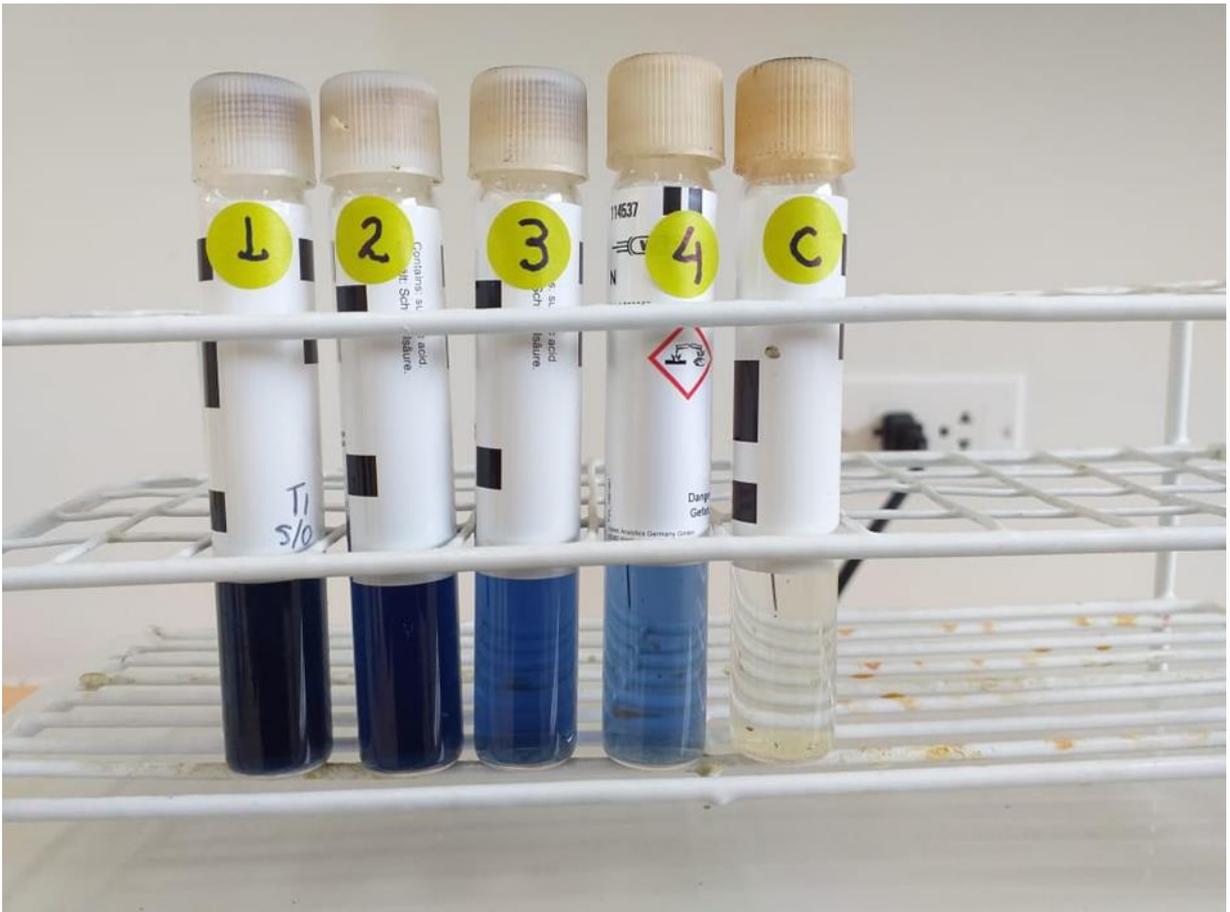
Fotografía 2. Pesaje de la “lenteja de agua” - *Lemna minor* mediante balanza analítica para luego ser colocados en los recipientes de cada unidad experimental.



Fotografía 3. Unidades experimentales de la investigación más el control.



Fotografía 4. Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales tratadas en laboratorio.



Fotografía 5. Análisis de fósforo de las muestras de agua. 1= Tratamiento 1, 2= Tratamiento 2, 3=Tratamiento 3, 4=Tratamiento 4 y C=control.