

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y AMBIENTALES



Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes*
(Mart.) Solms para la remoción de plomo en lixiviados del botadero
de la ciudad de Nueva Cajamarca

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES

Gonzalo Manchay Tocto

Alvin Muñoz Díaz

ASESOR

Denis Izquierdo Hernández

Rioja, Perú

2024

METADATOS COMPLEMENTARIOS**Datos de los Autores****Autor 1**

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

Autor 2

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

Autor 3

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

Autor 4

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

Datos de los Asesores**Asesor 1**

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

Asesor 2

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

Datos del Jurado

Presidente del jurado

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

Segundo miembro

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

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	
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 tesauro).**

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 045 - 2024/UCSS/FCAA/DI

Siendo las 11:00 a.m. del 18 de setiembre de 2024 a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- | | |
|------------------------------------|-----------------|
| 1. Elvira Teófila Castañeda Chirre | presidente |
| 2. Armando Chiclla Salazar | primer miembro |
| 3. Julián Alberto Álvarez Paredes | segundo miembro |
| 4. Denis Izquierdo Hernández | asesor(a) |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada:

Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms para la remoción de plomo en lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca

Que presentan los bachilleres en **Ciencias Ambientales**:

Gonzalo Manchay Tocto
Alvin Muñoz Díaz

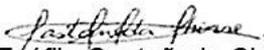
Cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

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

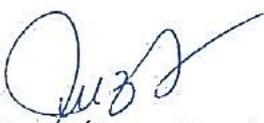
APROBAR	X
DESAPROBAR	...

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente acta al decanato de la **Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales**, a fin de que se declare EXPEDITA para conferirle el TÍTULO de INGENIERO AMBIENTAL.

Lima, 18 de setiembre de 2024.


Elvira Teófila Castañeda Chirre
Presidente


Armando Chiclla Salazar
1° miembro


Julián Alberto Álvarez Paredes
2° miembro


Denis Izquierdo Hernández
Asesor(a)

Anexo 2**CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO**

Ciudad, Lima de 23 de diciembre de 2024

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis** / informe académico/ trabajo de investigación/ trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con **título**: Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms para la remoción de plomo en lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca presentado por Alvin Muñoz Diaz con código de estudiante 2015102038 y DNI: 71663679 y Gonzalo Manchay Tocto con código de estudiante N° 2015102027 y DNI N° 76073036 para optar el **título profesional**/grado académico 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 % (poner el valor del porcentaje)**. 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,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Denis Izquierdo Hernández', is centered above a horizontal line.

Denis Izquierdo Hernández

DNI N°: 43089939

ORCID: 0000-0002-8346-6580

Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales - 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

El presente trabajo está dedicado a Dios, a nuestros padres y familiares por ser fuente de inspiración, aliento, compañía y amor incondicional para llegar a concluir nuestra carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica Sedes Sapientiae por facilitarnos los materiales de laboratorio y el área para la ejecución del presente proyecto.

Al Ing. Denis Izquierdo por apoyarnos y guiarnos durante todo el proceso de ejecución de la presente tesis.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE APÉNDICES	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	4
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Bases teóricas especializadas	13
1.2.1. Botadero	13
1.2.2. Caracterización de botaderos	13
1.2.3. Generación de lixiviados.....	14
1.2.5. Características generales de los lixiviados.....	20
1.2.6. Impacto ambiental de los lixiviados.....	21
1.2.7. Tecnologías en el tratamiento de lixiviados.....	22
1.2.8. Sistemas naturales	23
1.2.9. Clasificación de especies de flora en los humedales.....	25
1.2.10. Función de las macrófitas en los humedales construidos	27
1.2.11. Características de la <i>Eichhornia crassipes</i>	29
1.2.12. Parámetros fisicoquímicos del agua	31
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	33
2.1. Diseño de la investigación.....	33
2.2. Lugar y fecha.....	33
2.3. Descripción del experimento	36
2.5. Tratamientos	40
2.6. Unidades experimentales.....	42
2.7. Identificación de variables y su mensuración.....	43
2.7.2. Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados	44

2.7.3. Cambios fenológicos de la <i>Eichhornia crassipes</i>	45
2.8. Diseño estadístico del experimento	46
2.9. Análisis estadístico de datos	47
2.10. Materiales y reactivos	47
2.10.1. Material biológico	47
2.10.2. Material de laboratorio	47
2.10.3. Reactivos o insumos de laboratorio.....	47
2.10.4. Equipos de laboratorio.....	48
2.10.5. Materiales y herramientas.....	48
2.10.6. Equipos de protección personal.....	48
CAPÍTULO III: RESULTADOS	49
3.1. Determinación de la variación de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca en el proceso de fitorremediación	49
3.1.1. Potencial de hidrógeno (pH).....	49
3.1.2. Conductividad eléctrica	52
3.1.3. Temperatura.....	54
3.1.4. Sólidos totales suspendidos (SST).....	56
3.2. Características fenológicas del <i>Eichhornia crassipes</i> durante el periodo de experimentación	58
3.2.1. Numero de hojas viables	58
3.2.2. Variación de longitud de raíz	59
3.2.3. Variación de peso de las plantas <i>Eichhornia crassipes</i>	61
3.2.4. Cambios fenológicos de hojas de <i>Eichhornia Crassipes</i>	63
3.3. Porcentajes de plomo removido de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca sembrados con <i>Eichhornia crassipes</i>	68
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES	72
4.1. Determinación de la variación de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca en el proceso de fitorremediación	72
4.2 Evaluación de las características fenológicas del Jacinto de agua durante el periodo de experimentación	73
4.3 Determinación de los porcentajes de plomo removido de cada una de las biombras de “Jacinto de agua” <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms aplicadas a los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca.....	74
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	76

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS	78
TERMINOLOGÍA	87
APÉNDICES	89

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Caracterización físico-química de lixiviados</i>	18
Tabla 2. <i>Ventajas y desventajas de las tecnologías para el tratamiento de lixiviados</i>	23
Tabla 3. <i>Comparación de la complejidad tecnológica</i>	24
Tabla 4. <i>Taxonomía de la Eichhornia Crassipes (Mart.) Solms-Lau</i>	30
Tabla 5. <i>Tratamientos experimentales y sus respectivas biomاسas</i>	41
Tabla 6. <i>Distribución de la estructura de cada unidad experimental o réplica</i>	42
Tabla 7. <i>Identificación de variables y mensuración</i>	43
Tabla 8. <i>Parámetros fisicoquímicos evaluados</i>	45
Tabla 9. <i>Datos biométricos evaluados</i>	46
Tabla 10. <i>Resultados de datos de muestreo</i>	46
Tabla 11. <i>Cambios fenológicos del Eichhornia crassipes del tratamiento uno (T1)</i>	63
Tabla 12. <i>Cambios fenológicos del Eichhornia crassipes del tratamiento dos (T2)</i>	65
Tabla 13. <i>Cambios fenológicos del Eichhornia crassipes del tratamiento tres (T3)</i>	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Fase de la generación de lixiviados y gases	17
<i>Figura 2.</i> Clasificación del tipo de macrófitas	26
<i>Figura 3.</i> Procesos de fitorremediación de un contaminante	28
<i>Figura 4.</i> Esquema de la <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms-Lau.....	29
<i>Figura 5.</i> Ubicación del área experimental del proyecto	34
<i>Figura 6.</i> Ubicación del botadero municipal – Nueva Cajamarca	35
<i>Figura 7.</i> Esquema de la fase preliminar de la investigación.....	36
<i>Figura 8.</i> Esquema de la fase experimental de la investigación	38
<i>Figura 9.</i> Distribución de tratamientos con su respectiva estructura	42
<i>Figura 10.</i> Variación diaria pH de los lixiviados	50
<i>Figura 11.</i> Comportamiento y promedio del valor de pH de los lixiviados tratados	51
<i>Figura 12.</i> Variación promedio diaria de la conductividad, de los lixiviados tratados.....	52
<i>Figura 13.</i> Comportamiento y promedio de conductividad de los lixiviados tratados	53
<i>Figura 14.</i> Variación promedio diaria de la temperatura (°C) de los lixiviados tratados ...	54
<i>Figura 15.</i> Comportamiento y promedio de la temperatura de los lixiviados tratados	55
<i>Figura 16.</i> Variación promedio de los sólidos totales suspendidos	56
<i>Figura 17.</i> Comportamiento y promedio de solidos totales suspendidos.....	57
<i>Figura 18.</i> Variación promedio del número de hojas viables por tratamiento.....	59
<i>Figura 19.</i> Variación de la longitud de raíz por unidad experimental	60
<i>Figura 20.</i> Comportamiento y promedio de la variación de longitud de raíz	61
<i>Figura 21.</i> Variación de peso por unidad experimental	62
<i>Figura 22.</i> Comportamiento y promedio de la variación de biomasa.....	63
<i>Figura 23.</i> Porcentajes de remoción de plomo por unidad experimental.....	69
<i>Figura 24.</i> Comportamiento del porcentaje de remoción de plomo por tratamiento	70

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Valores promedios diarios de pH	89
Apéndice 2. Análisis de normalidad de pH	90
Apéndice 3. Análisis de homocedasticidad de pH	91
Apéndice 4. Análisis ANOVA de pH.....	91
Apéndice 5. Valores promedios diarios de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	92
Apéndice 6. Análisis de normalidad de conductividad	93
Apéndice 7. Análisis de homocedasticidad de conductividad.....	94
Apéndice 8. Análisis ANOVA de conductividad.....	95
Apéndice 9. Variación promedio diario de temperatura $^{\circ}\text{C}$	96
Apéndice 10. Análisis de normalidad de temperatura $^{\circ}\text{C}$	97
Apéndice 11. Análisis de homocedasticidad de temperatura $^{\circ}\text{C}$	97
Apéndice 12. Análisis ANOVA de temperatura $^{\circ}\text{C}$	98
Apéndice 13. Ensayo de análisis de plomo y solidos suspendidos totales	99
Apéndice 14. Resultados del análisis de laboratorio de solidos totales suspendidos (mg/L) y plomo (mg/L)	100
Apéndice 15. Análisis de normalidad de sólidos totales suspendidos.....	109
Apéndice 16. Análisis de homocedasticidad de sólidos totales suspendidos	110
Apéndice 17. Análisis ANOVA de sólidos totales suspendidos	111
Apéndice 18. Análisis de comparaciones múltiples	112
Apéndice 19. Evaluaciones del número de hojas viables de la <i>Eichhornia crassipes</i>	113
Apéndice 20. Variación de la longitud de raíz de las plantas de <i>Eichhornia Crassipes</i> ...	115
Apéndice 21. Variación de la longitud de raíz de la <i>Eichhornia Crassipes</i>	117
Apéndice 22. Análisis de normalidad de plomo.....	119
Apéndice 23. Análisis de homocedasticidad de plomo	120
Apéndice 24. Análisis ANOVA de plomo	121
Apéndice 25. Análisis de comparaciones múltiples	122
Apéndice 26. Cadena de custodia.....	123

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms “jacinto de agua” para la remoción de plomo en lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca – provincia de Rioja, región San Martín. La investigación presentó un enfoque cuantitativo con diseño experimental. La metodología consistió en realizar bioensayos y pruebas de respuesta del Jacinto de agua frente a la toxicidad de los lixiviados, donde se definieron 3 tratamientos con el mismo volumen de lixiviados y diferente biomasa de Jacinto de agua (T1= 0,5 kg, T2= 1,0 kg y T3= 1,5 kg); así mismo, cada tratamiento presentó 3 repeticiones. Los parámetros evaluados fueron pH, temperatura, conductividad, sólidos totales disueltos (SST) y plomo (Pb), para ello se realizaron 4 monitoreos y análisis en el laboratorio, el primer monitoreo sirvió como control y los 3 siguientes fueron realizados a los 5, 10 y 15 días durante todo el periodo en el que se desarrolló el estudio. Los valores promedios de estos parámetros al finalizar el proceso experimental fueron: pH: 8,42, conductividad: 5 816,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, temperatura: 25,97 °C, sólidos totales disueltos (SST): 339 mg/L y para el plomo (Pb): 0,017 mg/L. Los resultados obtenidos en la investigación a partir de los métodos de análisis estadísticos (ANOVA) aplicados para el parámetro de estudio, indicaron que los porcentajes de remoción de plomo al finalizar el proceso experimental, fueron estadísticamente diferentes ($p > 0,05$) en los tres tratamientos. El 46 % (0,024 mg/L) de plomo removido fue para el tratamiento T1, el 64 % (0,032 mg/L) de plomo removido para el tratamiento T2 y finalmente 86 % (0,043 mg/L) de plomo removido para el tratamiento T3. La investigación concluyó que la cantidad óptima para la remoción de plomo en lixiviados fue el tratamiento T3 con un 86 % de remoción durante todo el proceso experimental.

Palabras Clave: Biomasa, Jacinto de agua, lixiviados, plomo, remoción.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the optimum amount of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms "water hyacinth" for the removal of lead in leachates from the landfill of the city of Nueva Cajamarca - province of Rioja, San Martín region. The research presented a quantitative approach with experimental design. The methodology consisted of conducting bioassays and tests of water hyacinth response to leachate toxicity, where 3 treatments were defined with the same volume of leachate and different biomass of water hyacinth (T1= 0,5 kg, T2= 1,0 kg and T3= 1,5 kg); likewise, each treatment had 3 replicates. The parameters evaluated were pH, conductivity, total dissolved solids (TDS) and lead (Pb), for which 4 monitoring and analysis were carried out in the laboratory, the first monitoring served as control and the following 3 were carried out at 5, 10 and 15 days during the entire period in which the study was carried out. The values of these parameters at the end of the experimental process were: pH: 8,42, conductivity: 5 816,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, total dissolved solids (TDS): 722 mg/L and for Lead (Pb): 0,045 mg/L. The results obtained in the investigation from the statistical analysis methods (ANOVA) applied for the study parameter, indicated that the percentages of lead removal at the end of the experimental process were statistically different ($p > 0,05$) in the three treatments. Forty-six percent (0,024 mg/L) of lead removed was for treatment T1, 64 % (0,032 mg/L) of lead removed for treatment T2 and finally 86 % (0,043 mg/L) of lead removed for treatment T3. The investigation concluded that the optimum amount for lead removal in leachate was treatment T3 with 86 % removal during the whole experimental process.

Keywords: Water hyacinth, leachate, lead, biomass, removal.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población, es el principal factor que tiene una relación directa con la cantidad de residuos sólidos que se generan, esto influenciado por una escasa cultura ambiental, evidenciándose a través del consumismo, se ha generado un desbalance en la reincorporación natural de los residuos sólidos al medio ambiente; debido a que cada día son menos asimilables naturalmente (Chucos, 2020).

Según Kaza *et al.* (2018), la generación de residuos sólidos a nivel mundial aumenta de manera alarmante, para el año 2050 se estima que se generen 3,40 billones de toneladas anuales, casi el doble en comparación con el año 2016, donde se generó 2,01 billones de toneladas de residuos sólidos; de los cuales, el 33 % no tuvo una gestión ambientalmente adecuada en la etapa de disposición final, esta realidad se agrava en regiones de América Latina y el Caribe, donde la disposición en botaderos controlados, semicontrolados o a cielo abierto llega a representar el 69 %; por tal razón, la gestión de los residuos sólidos necesita de tecnologías y métodos eficientes que en la actualidad se carecen.

El país no es ajeno de esta realidad, de acuerdo con la Resolución N° 003-2024-OEFA/DSIS (2024), que aprueba el inventario nacional de áreas degradadas por residuos sólidos municipales, nuestro país cuenta con 1 878 botaderos de residuos sólidos a cielo abierto; donde, aproximadamente se llega a disponer más del 50 % de la generación total de residuos municipales, llegando a degradar 591 851,95 m². Según la Defensoría del Pueblo (2019), la falta de rellenos sanitarios en el Perú, se ha convertido en un factor clave en el incremento de la contaminación del agua, suelo y aire.

La región de San Martín, cuenta con 74 botaderos a cielo abierto, generados producto de la mala gestión en la etapa de disposición final de dichos residuos sólidos, llegando a afectar una superficie aproximada de 50,55 ha (Resolución N° 003 de 2024 - OEFA). La inadecuada gestión de residuos sólidos en esta última etapa genera múltiples impactos, siendo la

producción de lixiviados uno de los principales impactos que afectan directamente al ecosistema edáfico (Pellón *et al.*, 2015).

Los lixiviados representan un riesgo elevado de contaminación para los cuerpos de aguas naturales adyacentes a los puntos de generación, esto debido a su fácil percolación logrando arrastrar gran variedad y concentraciones de contaminantes (Mosquera y Lara, 2012). Dichos residuos líquidos son producto de la propia descomposición de la materia orgánica, las actividades de los microorganismos y factores externos, como el agua de las precipitaciones que interaccionan con los residuos y arrastran elevadas cargas de contaminantes de carácter orgánico e inorgánico (Pozo *et al.*, 2020).

Entre los elementos contaminantes de mayor preocupación contenidos en los lixiviados provenientes de los espacios de tratamiento de residuos sólidos están los metales pesados como el plomo (Juárez *et al.*, 2006).

Los daños que causa el plomo a la salud de los ecosistemas sobre todo acuáticos son irreversibles, debido a que puede llegar a afectar a la base de la cadena alimenticia como es el fitoplancton y zooplancton, inhibiendo los procesos fotosintéticos o afectando su crecimiento y desarrollo. Debido a que no puede ser metabolizado, se va bioacumulando en los diferentes tejidos, aumentando su concentración y con ello su peligrosidad a medida que la cadena alimenticia se va acercando hacia el hombre (Lezcano, 2008).

En la provincia de Rioja existe un botadero de residuos sólidos a cielo abierto en el sector Ramiro Prialé, administrado por la municipalidad distrital de Nueva Cajamarca, donde se disponen aproximadamente 26,29 toneladas diarias de residuos sólidos de origen doméstico, comercial, de mercados y servicio de limpieza pública (Plan de Manejo de Residuos Sólidos, 2018). Al depositarse tal cantidad de residuos sólidos y debido a las constantes precipitaciones, se generan gran cantidad de lixiviados, que en la actualidad escurren por la parte baja de dicho botadero, donde son encausados por una micro cuenca del río Romero, el cual a su vez descarga sus aguas en el río Negro.

Esta situación pone en riesgo a la biodiversidad de flora y fauna que se desarrollan en los ecosistemas establecidos en el área de influencia de los ríos antes mencionados; así mismo, la población del caserío Ramiro Priale y el centro poblado El Porvenir, están expuestos a la contaminación por el plomo presente en los lixiviados, debido a que aprovechan el recurso hídrico del río Romero para sus actividades domésticas y principalmente para el cultivo de cientos de hectáreas de arroz que abastecen a los mercados locales y regionales; siendo dicho cultivo susceptible a la bioacumulación de trazas de plomo en el grano (Pozo, *et al.*, 2011).

Al tratarse de una contaminación que se desarrolla de manera muy lenta que por lo general sus efectos son percibidos muchos años después, resulta de gran importancia realizar esta investigación con el fin de determinar la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de plomo en lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca, con los resultados obtenidos se podrá proponer una alternativa de fitorremediación de lixiviados a una mayor escala, como medida de mitigación de los impactos ambientales que genera esta problemática tanto al suelo, flora, fauna, agua superficial y subterránea.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* Mart. “jacinto de agua” para la remoción de plomo en lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca a nivel de laboratorio.

Objetivos específicos

- Determinar la variación de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca durante el periodo de experimentación.
- Evaluar las características fenológicas del *Eichhornia crassipes* durante el periodo de experimentación.
- Determinar los porcentajes de plomo removido de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca sembrados con *Eichhornia crassipes*.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Internacionales

Fernández (2014) en el estudio “Tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del cantón Yantzaza mediante el proceso de fitorremediación con las especies pasto alemán (*Echinochloa polystachya*) y jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), Zamora Chinchipe, Ecuador”; tuvo como objetivo evaluar la capacidad de tratamiento de descontaminación en los lixiviados generados en el relleno sanitario del cantón Yantzaza mediante el proceso de fitorremediación. La investigación fue de tipo experimental con enfoque cuantitativo con base a una medición numérica y un diseño estadístico unifactorial por tratamientos. El estudio estuvo constituido por dos tratamientos: tratamiento 1 (T1); 15 plantas pasto alemán y tratamiento 2 (T2); 20 plantas Jacinto de agua, siendo esta última la única planta que tuvo una aclimatación de ocho días antes del inicio del proceso experimental. Cada tratamiento estuvo constituido por una piscina experimental de 0,5 m³, las cuales fueron impermeabilizadas, acondicionadas y abastecidas con un caudal continuo de 0,01 l/s de lixiviados, los tres primeros meses, el cuarto mes fijó un tiempo de ingreso de 1 hora y un periodo de retención de 2 días. Al finalizar en proceso experimental fueron tomadas tres muestras simples de lixiviados. La primera muestra fue tomada antes que los lixiviados ingresen a las piscinas experimentales, la cual actuó como testigo, la segunda y tercera muestra fue tomada a la salida de cada una de las piscinas experimentales. El análisis estadístico fue realizado a través del método estadístico no paramétrico Chi-cuadrado. Los resultados mostraron que el jacinto de agua fue más eficiente en la remoción de los parámetros de pH, sólidos totales, alcalinidad total, cloruro, nitrógeno total y sodio; sin embargo, el pasto alemán fue más eficiente en los parámetros de dureza total, DQO, DBO y hierro; para los parámetros fenoles, sulfatos, mercurio y plomo ambas especies fitorremediadoras tuvieron igual eficiencia de remoción. Concluyó que la efectividad del tratamiento de los lixiviados por el proceso de fitorremediación, si difieren entre el uso de

las dos especies vegetales, siendo el jacinto de agua el que tiene un mayor potencial de fitorremediación de lixiviados respecto al pasto alemán.

León *et al.* (2015) en el estudio “Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea, Nuevo León, México”; tuvieron como objetivo evaluar el impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal (RSM) de Linares, sobre la calidad del agua superficial y subterránea. La investigación fue de tipo experimental. Aplicaron métodos geológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos donde establecieron ocho pozos (P1, P2, P3, P4, P5, P6 P7 y P8), con una profundidad de entre 43 y 50 metros para el monitoreo. Así mismo, evaluaron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos de las aguas superficiales y subterráneas. En cada punto de muestreo realizaron mediciones *in situ* y recolectaron muestras para ser analizadas en laboratorio aplicando los métodos estándares de la normativa de SEDUE (1992). Los resultados mostraron deficiencias en el manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales (geomembrana desgarrada) y nula gestión de lixiviados (sobresaturación del RSM). La investigación concluyó que, los análisis de aguas superficiales (Presa El Cinco y arroyo de lixiviados) y subterráneas (pozos) aledaños al RSM, tuvieron altas concentraciones de NO_3^- ($> 10 \text{ mg/L}$) en los pozos P2, P3, P4 y P8; concentraciones de Pb ($> 10 \text{ } \mu\text{g/L}$) en el pozo P3; concentraciones de Mn ($>150 \text{ } \mu\text{g/L}$) en el pozo P4 y finalmente concentraciones de Fe ($> 300 \text{ } \mu\text{g/L}$) en los pozos P3, P4 y P8; cuyos valores excedían la Norma Oficial Mexicana (NOM) y la legislación de la Agencia de Protección Ambiental (US EPA).

Mera (2016) realizó una investigación denominada “Evaluación de la Bioconcentración de dos especies de macrofitas acuáticas (*Eichhornia crassipes* y *Lemna* spp.) en la fitorremediación de un medio contaminado con Plomo, Riobamba, Ecuador”. El objetivo fue determinar la eficacia de utilizar macrófitas acuáticas (*Eichhornia Crassipes* y *Lemna* spp.) en la fitorremediación de un medio contaminado con Plomo a 5 ppm. La investigación fue de tipo experimental a nivel de laboratorio, la cual tuvo un diseño estadístico unifactorial de tres tratamientos y un grupo de control. El agua que utilizo fue contaminada con nitrato de plomo con una concentración inicial de 5 ppm. La investigación inició con la construcción de un invernadero en el cual se utilizaron 6 contenedores de vidrio, una bomba de oxígeno

y las dos macrofitas acuáticas previamente seleccionadas. El proceso experimental estuvo conformado por tres tratamientos, A (*Lemna* spp.), B (*Eichhornia crassipes*) y C (*Lemna* spp. y *Eichhornia crassipes*). Diseñó 8 contenedores de vidrio con dimensiones de 50 cm de largo por 40 cm de ancho y 50 cm de altura, en los cuales vertió 19 L de agua potable y 1 L de la solución contaminante con plomo; las unidades experimentales los dividió de la siguiente manera, 6 para los tratamientos experimentales y 2 únicamente como blancos o unidades de control, los cuales contenían específicamente agua contaminada con plomo. Todo el proceso tuvo una duración de 14 días. Para el monitoreo recolectó muestras de 1 000 mL de cada uno de los contenedores. El análisis de plomo, lo realizó mediante la técnica de Absorción Atómica. Como resultados obtuvo lo siguiente: El porcentaje de remoción más eficaz fue para el tratamiento C (lenteja de agua y jacinto de agua) obteniéndose un valor máximo de 77,8 % lo cual demostró un alto poder de remoción, el porcentaje de remoción más bajo fue en el tratamiento B (lenteja de agua) registrándose un valor de 0,2 % demostrando que este tipo de macrófita acuática no es la más idónea para remover este metal. Concluyó que el tratamiento C (*Eichhornia crassipes* y *Lemna* spp.) es el que mejor desempeño demuestra con un valor del 77,8 % de remoción de plomo.

Martínez y Rojas (2018) en un estudio denominado “Diseño, construcción y puesta en marcha de un humedal a escala de laboratorio para tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la Esmeralda”, Manizales, Colombia; tuvieron como objetivo diseñar, construir y poner en marcha un humedal a escala de laboratorio para tratamiento de lixiviados del relleno sanitario la esmeralda. La investigación fue de tipo experimental, con un diseño unifactorial con 2 tratamientos; para ello construyeron dos prototipos con los cuales compararon la eficiencia de remoción entre un humedal plantado con (*Chrysopogon Zizanioides* o más conocida como Pasto Vetiver), y otro no plantado, el mismo que estuvo conformado por 5 capas de materiales de arena, grava y piedra de 15, 15, 50, 10 y 12 cm respectivamente. Para la construcción de los humedales utilizaron dos tubos de 5 pulgadas de diámetro y 110 cm de altura, abierto en la parte superior para el ingreso del lecho, la prolongación de la planta y la entrada del afluente. Por otra parte, la sección inferior fue sellada con un tapón ciego y la descarga del mismo se dio por medio de un tubo de 1 pulgada a 10 cm sobre 34 la altura cero (0). El ejemplar utilizado para la experimentación lo obtuvieron de un invernadero. El lixiviado utilizado fue obtenido de la descarga del sistema de tratamiento fisicoquímico que efectúa EMAS. Para esto utilizaron dos recipientes de 20 litros cada uno, con la finalidad de

hacer circular el lixiviado por los dos humedales, y adaptar a la planta. A los tanques alimentadores adhirieron una venocllisis en la parte inferior para la regulación del caudal de entrada a los humedales. Los parámetros evaluados fueron DQO (demanda química de oxígeno) y cromo (Cr), para la recolección de muestras tomaron 100 ml a la salida de cada humedal, los cuales fueron refrigerados a 3 °C y posteriormente realizar el análisis de laboratorio. El método que utilizaron para el análisis del DQO fue el “Standard Methods 5220C y para el Cr fue mediante espectrometría de absorción atómica. Como resultados obtuvieron para el parámetro DQO que inicio con un 4 475 mL/L y terminó con 681,44 mL/L; para el parámetro Cromo inició 0,70 mL/L y terminó con 0,50 mL/L; obteniendo así un 84 y 36 % de remoción respectivamente. La investigación concluye que la eficiencia del humedal plantado es alta, con un 84 % de remoción en DQO, mientras que del humedal no plantado se tuvo una eficiencia media (40 %) y demostró un buen trabajo de adaptación de la planta, y buena utilización de parámetros de diseño.

Miguel-Barrera *et al.* (2020) en el estudio “Modelo de biorremediación de plomo con lirio acuático, Puebla, México”; tuvieron como objetivo evaluar la eliminación de plomo (Pb) utilizando el lirio de agua como bioacumulador en un proceso de biorremediación. La investigación fue de tipo experimental, con diseño unifactorial mediante la utilización de 3 tratamientos. Así mismo, utilizaron una metodología, con ensayos a nivel de laboratorio con 2 evaluaciones periódicas antes y después del proceso experimental. Iniciaron con la recolección de 20 plantas de lirio de agua y una pre-adaptación que duró 4 días. El proceso experimental duró 15 días, donde establecieron 3 tratamientos: tratamiento Control con 1,5 L de agua de llave y planta de lirio acuático; el tratamiento de control positivo 1,5 L de agua de la laguna de oxidación a una concentración de 2 ppm de Pb y el tratamiento de bioacumulación 1,5 L de agua de la laguna de oxidación a una concentración de 2 mg.L⁻¹ de Pb más planta de lirio, únicamente el tratamiento control y de bioacumulación fueron realizadas por triplicado. El análisis estadístico que utilizaron fue el ANOVA con un nivel de significancia de $p < 0,05$ %. Los resultados que obtuvieron determinaron que el agua de la llave no presentó plomo, el agua de laguna tuvo una concentración de 0,025 mg.L⁻¹ y el agua control con plomo tuvo una concentración de 3,14 mg.L⁻¹ de plomo, teniendo una remoción final del 13,05 % en las muestras de bioacumulación. El lirio contenía un valor significativo de plomo al iniciar el ensayo de 0,127 mg.kg⁻¹, con la adición de plomo en el inicio del experimento dio un valor de 0,169 mg.kg⁻¹, la cual obtuvo al final del proceso

experimental un valor de $0,284 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, indicando un incremento en el contenido de plomo del 91,84 % en 15 días. El estudio demostró la capacidad de bioacumulación del lirio acuático en un periodo de 15 días logrando bioacumular 91,84 % del valor inicial reafirmando el valor descontaminante de esta planta acuática.

Carreño (2020) en la investigación “Buchón de agua (*Eichhornia crassipes*): impulsor de la fitorremediación, Bogotá, Colombia”; tuvo como objetivo determinar la eficacia del sistema de fitorremediación a escala piloto con jacinto de agua para la remoción de contaminantes en aguas residuales industriales (curtiembre). La investigación fue de tipo experimental, con diseño estadístico unifactorial por tratamientos. Para ello montaron nueve (9) sistemas de tratamiento con tres repeticiones para todo el proceso experimental. El tratamiento uno presentó un 20 % de agua residual de curtiembre (2a, 2b y 2c), tratamiento dos con 40 % de agua residual de curtiembre (4a, 4b y 4c) y tratamiento tres con 60 % de agua residual de curtiembre (6a, 6b, 6c), todas las unidades experimentales fueron completadas hasta un volumen del 100 % equivalente a 10 litros, con agua destilada a excepción del tratamiento control. Cada unidad experimental fue conformada en un recipiente de plástico resistente de 45 cm de largo, 15 cm de alto y 15 cm de ancho, la cantidad de buchón de agua utilizado fue de 180 g equivalente a dos platas en cada una de las unidades. Durante el proceso experimental monitorearon los parámetros de pH, cromo hexavalente y cromo adherido a las raíces de la macrófita. Los resultados que obtuvo en los tres tratamientos para el pH fue una tendencia a disminuir la acidez del medio estabilizándose en 4,2. Para el cromo (VI) los resultados de remoción que obtuvo en los tres tratamientos determinaron una continua disminución del metal estabilizándose después de las primeras 24 horas, para el tratamiento uno el buchón de agua removió un 68 %, para el tratamiento dos removió un 59 % y para el tratamiento tres removió un 50 % del cromo inicial. La acumulación de cromo (VI) en la estructura de la planta fue de 23,33; 22,33 y 34,33 mg de cromo por gramo de buchón de agua para los tratamientos uno, dos y tres respectivamente. El estudio concluyó que el buchón de agua presenta una gran capacidad de remoción de contaminantes como metales pesados en aguas residuales de tipo industrial.

Nacionales

Quispe *et al.* (2017) en el estudio “Eficiencia de la especie macrófita *Eichhornia crassipes* “jacinto de agua” para la remoción de parámetros fisicoquímicos, metal pesado (Pb) y la evaluación de su crecimiento en función al tiempo y adaptación al medio en una laguna experimental, Lima, Perú”; tuvieron como objetivo valorar la eficiencia en la remoción de los parámetros fisicoquímicos y metales pesados de la especie macrófita *Eichhornia crassipes*. Dicha investigación fue de tipo experimental con un diseño estadístico unifactorial mediante sistemas. Para ello realizó una pre-adaptación de las plantas de jacinto de agua por un periodo de 2 semanas, posteriormente diseñaron cinco sistemas flotantes con un área 1,82 m² cada uno, donde colocaron 15 plantas de jacinto de agua las cuales fueron dispuestas en la laguna artificial de la Universidad Peruana Unión. Los monitoreos fueron realizados dos veces por semana, por un periodo de dos meses, en el caso de los parámetros DBO₅, DQO, fosfato y plomo fueron monitoreados antes y después del periodo experimental. Los resultados mostraron una eficiencia de -4, -1, -2 y -50 % para los parámetros de temperatura (°C), conductividad (uS/cm), sólidos totales (mg/L) y turbiedad (UNT) respectivamente, en cambio para los parámetros de pH, oxígeno disuelto (ppm), DBO₅ (mg/L), DQO (mg/L), sulfatos (mg/L) y plomo total (mg/L) tuvieron una eficiencia de 95, 71, 55, 50, 63 y 87 %. El estudio concluyó que la macrófita presentó una eficiencia del 31 % en la remoción de parámetros fisicoquímicos conductividad (µs/cm), oxígeno disuelto (mg/L), sólidos totales (mg/L), turbiedad (UNT), pH, temperatura (°C), DBO₅ (mg/L), DQO (mg/L) y fosfato (mg/L), asimismo, demostraron que el jacinto de agua es una planta que posee una rápida adaptabilidad a medios con concentraciones elevadas de parámetros fisicoquímicos.

Madueño y Orellano (2021) en su investigación “Efecto fitorremediador de las especies *Myriophyllum quitense* y *Elodea densa* en la remoción de contaminantes del lixiviado del relleno sanitario Cepasc – Concepción, 2021”; tuvieron como objetivo determinar el efecto fitorremediador de las especies *Myriophyllum quitense* y *Elodea densa* en la concentración de contaminantes del lixiviado del relleno sanitario CEPASC. La investigación fue de tipo experimental puro, con diseño estadístico unifactorial. La metodología utilizada inició con la recolección de muestras del pozo de lixiviado previa caracterización de un volumen total de 4,5 litros en bruto el cual fue diluido a diferentes condiciones 2; 3,3 y 5 %. Luego

procedieron con la recolección y preparación de las macrofitas. Cada unidad experimental estuvo conformada por un recipiente con una medida de alto: 16,8 cm, ancho: 32 cm y profundidad: 42 cm, un total de 10 plantas 5 de cada una de las macrofitas utilizadas y un volumen uniforme de 10 litros codificadas según la dilución de los lixiviado al 2; 3,3 y 5 %. Esto dividido en tres condiciones y un testigo, cada uno con tres replicas resultado un total de 12 unidades experimentales. Los monitoreos lo realizaron a los 8, 15 y 30 días, evaluando los parámetros químicos, Pb, Cu y Zn. Para el análisis estadístico de los datos utilizaron la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, T de Student y la prueba no paramétrica de Wilcoxon. Los resultados de la investigación indican que no existe un efecto fitorremediador por parte de las especies *Myriophyllum quitense* y *Elodea densa* en depurar los metales pesados como se muestra en el análisis realizado a los 30 días, donde el tratamiento de cobre a diferentes diluciones como al 2; 3,3 y 5 % se obtuvo una concentración de $< 0,001$; así mismo en plomo a diferentes diluciones de 2; 3,3 y 5 % obtuvo una concentración de $< 0,001$ y a diferencia del zinc en dilución de 2% tuvo una concentración de 0,091; para 3,3 % una concentración de 0,0083 y para 5 % una concentración de 0,009. La investigación concluyó que a un nivel de confianza del 95 % el efecto fitorremediador de las especies *Myriophyllum quitense* y *Elodea densa* fueron significativas en la concentración del DQO y DBO5, mientras que para el potencial de hidrógeno y metales pesados (Pb, Cu y Zn) a nivel estadístico no hay evidencias para afirmar que existen diferencias significativas en el periodo de 8, 15 y 30 días evaluadas.

Mena (2021) realizó un estudio “Propiedades del *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua), *Schoenoplectus coliformicus* (Junco), y el *Phragmites australis* (Carricillo), Lima, Perú”, con el objetivo de determinar la capacidad de remoción de metales pesados de las siguientes especies: *Eichhornia crassipes*, *Schoenoplectus coliformicus*, y *Phragmites australis*. La metodología inició con la construcción de tres estanques de madera impermeabilizados con las siguientes dimensiones: 0,30 m de ancho x 0,40 m de alto y 1,60 m de largo, cuyo volumen fue de 0,192 m³. En cada uno de los estanques sembró una de las tres variedades de plantas, para el junco y el carricillo colocaron una base de agregado de 5 cm de espesor y seguidamente compost y tierra negra hasta un espesor de 10 cm aproximadamente, para el del jacinto solo agregó el agua residual. Además, instaló tuberías para que el agua residual de la vivienda ingrese a cada estanque de manera ininterrumpida, el proceso experimental duró 90 días, que al finalizar tomaron muestras puntuales de agua para su análisis en el

laboratorio. Para la evaluación de significancia estadística de los resultados aplicó la prueba no paramétrica de Wilcoxon, para comparar muestras relacionadas, con un valor de confianza del 95 %. Los resultados indicaron que las tres especies asimilaron los tres metales analizados en los porcentajes que se describen: *Schoenoplectus coliformicus* removió níquel en un 83,00 %, plomo 61,23 % y cadmio 51,90 %; *Phragmites australis* removió níquel al 79,90 %, plomo 60,23 % y cadmio 29,11 % y la más eficiente en el proceso de remoción fue *Eichhornia crassipes* con 94,73 % para níquel, 84,36 % para plomo, y 78,48 % para cadmio. Así mismo, según los análisis realizados mostraron que la remoción de metales pesados de manera general para cada especie fue la siguiente: 57,00 % para el Jacinto de agua, 42,00 % para el junco y 37,00 % para el carricillo. El estudio concluyó que de los tres tipos de vegetales estudiados el Jacinto de agua es el más eficiente, por lo tanto, es recomendable para remoción de metales pesados de las aguas residuales ya sean domésticas o industriales.

Locales

Díaz (2019) en la investigación “Evaluación sobre la contaminación del suelo por lixiviados del botadero municipal del distrito de San Pablo, Tarapoto, Perú”; tuvo como objetivo evaluar la contaminación del suelo afectado por lixiviados del botadero municipal. La investigación fue de tipo descriptiva no experimental con un enfoque cuantitativo, donde determinó como variable dependiente: la contaminación del suelo y como variable independiente: lixiviados del botadero municipal de San Pablo. Los metales pesados evaluados fueron: cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo VI (Cr) y cromo total (Cr total). Para ello inicio con la ubicación de tres puntos de muestreo que fueron establecidos de la siguiente manera: punto P1 parte baja del botadero, punto P2 parte central del botadero y punto P3 zona aledaña o punto de control. El muestreo fue no probabilístico, la muestra de suelo tomada para la evaluación fue de 1 kg por cada parámetro, con la finalidad de determinar la concentración del cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo VI (Cr⁺⁶) y cromo total en cada punto de muestreo los mismos que fueron comparados con los (ECA) para suelo agrícola, establecido según el D. S N° 002-2013 MINAM. Los resultados que obtuvo indicaron que el punto P1, presentó concentraciones de 18,752 mg.kg⁻¹ y 16,255 mg.kg⁻¹ de Pb y Cd respectivamente, siendo estas las más elevadas en comparación que los puntos P2 y P3. El estudio concluyó que las concentraciones de cadmio, plomo y cromo total en los tres puntos evaluados a excepción del cromo VI superaron el valor establecido por las ECA.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Botadero

Se denomina botadero al espacio donde se confinan los residuos sólidos generados por las diferentes actividades del hombre. Es un método de disposición final de residuos sólidos, de manera rápida y de muy bajo costo, que presentan muchas desventajas. Por ejemplo, se convierten de manera rápida en focos de proliferación de enfermedades que pone en riesgo la salud pública, además de la generación de múltiples impactos ambientales (Sillero, 2012).

Los botaderos, es uno de los métodos más arcaicos para la gestión de los residuos sólidos en su última etapa. En la actualidad se sigue utilizando, produciendo la degradación del paisaje y la contaminación del aire a través de la generación de gases de efecto invernadero como: el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), entre otros. El suelo y agua son los recursos naturales que reciben un mayor impacto negativo por la generación de lixiviados, esto debido a la facilidad de transporte y propagación de contaminantes en grandes áreas y volúmenes de agua ya sea superficial o subterránea (Cabildo *et al.*, 2008).

1.2.2. Caracterización de botaderos

Botaderos de residuos peligrosos

Según Cabildo *et al.* (2008), en este tipo de botaderos se realiza la disposición final de los residuos que presentan un elevado grado de contaminación, principalmente biológico y químico, los lixiviados que se generan tienen un elevado riesgo para la calidad del medio ambiente y la salud de la población.

Botaderos de residuos no peligrosos

Los residuos sólidos urbanos son los que confinan este tipo de botaderos (Cabildo *et al.*, 2008). Según Vilar (2015), los lixiviados que se producen en este tipo de botadero se caracterizan por poseer una composición variable, los parámetros que llegan a tener mayor representatividad y permiten determinar la edad de los lixiviados son: la demanda

bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT), compuestos nitrogenados, sales y una gran variedad de metales pesados.

Botaderos de residuos inertes

Según Cabildo *et al.* (2008), debido a las características de estos residuos, los lixiviados que se generan en este tipo de botadero no representa ningún peligro para el medio ambiente, por su naturaleza de los residuos confinados, no presentan procesos biológicos de descomposición o reacciones químicas alguna con el agua.

1.2.3. Generación de lixiviados

Los lixiviados se generan como resultado del exceso de humedad, proveniente de dos fuentes. La primera es producto de la propia humedad de los residuos, generados en la dinámica de descomposición de la fracción de materia orgánica; la segunda fuente de generación es el agua que entra o percola al botadero, ya sea producto de precipitaciones pluviales, escorrentías superficiales o de aguas nacientes de la capa freática (López, 2017).

Según Madera *et al.* (2014) establece que la carga de contaminantes de los lixiviados es producto de la descomposición de los residuos sólidos en combinación con el agua, que, mediante reacciones físicas, químicas y microbiológicas, transfieren los contaminantes al medio líquido, dando como resultado un líquido altamente peligroso y contaminante para los ecosistemas.

Según Morales *et al.* (2024), señalan que la generación de lixiviados está relacionada directamente con la biodegradabilidad de los desechos sólidos y materia orgánica presente en los residuos, lo cual se da mediante un conjunto de procesos aerobios y anaerobios los mismos que se detallan a continuación (Figura 1):

- a. Fase inicial o aerobia:** Caracterizada por ser la primera fase del proceso el cual inicia con la disposición de residuos, la oxigenación natural y la actividad biológica los cuales

en conjunto conllevan a una serie de reacciones químicas que dan como resultado la generación del lixiviado los cuales son:

- Inicio de la descomposición de la materia orgánica debido a la acción de microorganismos. Lo cual origina ácidos orgánicos, aminoácidos y azúcares.
 - Durante la descomposición de los desechos se generan gases como dióxido de carbono, metano, sulfuro de hidrógeno y compuestos orgánicos volátiles los cuales se disuelven con el agua presente en los desechos sólidos, contribuyendo en la generación de lixiviados.
 - La descomposición de la materia orgánica genera una gran cantidad de ácidos que contribuyen a la acidez del lixiviado, afectando a la movilidad y disponibilidad de ciertos elementos presente en los desechos sólidos.
 - Los residuos orgánicos descompuestos liberan nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, que pueden estar presentes en forma de compuestos orgánicos e inorgánicos. Estos nutrientes pueden disolverse en el agua y contribuir a la carga de nutrientes en el lixiviado.
 - Algunos componentes inorgánicos presentes en los residuos, como metales pesados y compuestos inorgánicos, pueden reaccionar con los ácidos y otros productos de descomposición orgánica, formando complejos químicos solubles en agua.
- b. Fase intermedia, de transición o anaerobia:** Fase crucial en la que se observan cambios en las condiciones químicas, físicas y biológicas. En esta etapa debido a la limitada e inexistente disponibilidad de oxígeno, empiezan a prosperar y sobrevivir los microorganismos anaerobios utilizando compuestos como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono como aceptores de electrones en lugar de oxígeno. La descomposición anaeróbica genera una variedad de gases como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) como subproductos.
- c. Fase de acidogénesis:** En esta fase la actividad microbiana anaerobia presenta una aceleración generando con ello ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas

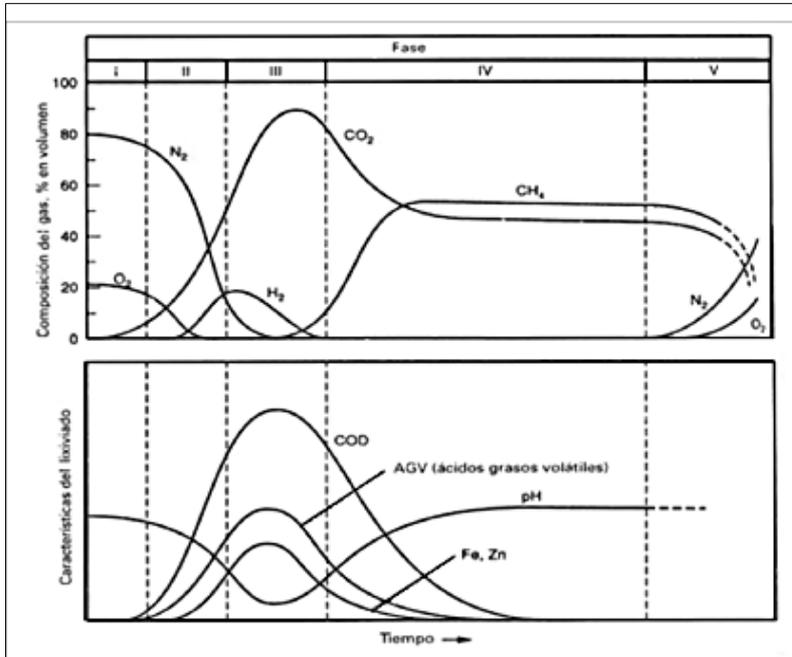
hidrogeno. Así mismo, los microorganismos mediante el proceso de fermentación y degradación anaerobia, generan ácidos orgánicos simples, como el ácido acético, el ácido propiónico y el ácido butírico, junto con otros compuestos solubles en agua. Estos ácidos pueden incluir ácidos débiles y fuertes, lo que reduce el pH del lixiviado y puede tener implicaciones en términos de corrosión de infraestructuras y toxicidad para el medio ambiente.

- d. Fase de metanogénesis:** Esta fase se caracteriza por la elevada producción de metano debido a la acción anaerobia. En esta fase, los microorganismos metanogénicos, principalmente arqueas, descomponen los productos intermedios de la descomposición de la materia orgánica, como los ácidos grasos volátiles, para producir metano y dióxido de carbono.

- e. Fase de maduración:** Es la etapa final donde los residuos han experimentado un grado significativo de descomposición y transformación. Durante la fase de maduración, los residuos sólidos experimentan una disminución en la actividad microbiana y una estabilización de sus características físicas, químicas y biológicas. La descomposición de la materia orgánica ha avanzado considerablemente, lo que resulta en una disminución en la producción de gases y lixiviados.

Figura 1

Fase de la generación de lixiviados y gases



Nota. Morales *et al.* (2024).

1.2.4. Factores que afectan la calidad y cantidad de los lixiviados

Según Cabildo *et al.* (2008), la variedad y el grado de concentración de los diferentes contaminantes presentes en los lixiviados, dependen de factores tanto externos como propios de los residuos:

- La naturaleza y la cantidad de residuos
- La climatología de la zona
- El grado de compactación
- La cobertura y el tratamiento previo de los residuos

El botadero a cielo abierto de la municipalidad de Nueva Cajamarca, es un espacio en el cual se realiza la disposición final de residuos sólidos de gestión municipal en celdas sin ninguna medida de control y/o tratamiento, como por ejemplo las superficies de las celdas no reciben ningún tipo compactación o aislamiento con geomembranas, falta de cobertura del área esto asociado a los 1 410,70 milímetros de precipitaciones anuales que recibe la región de San

Martin (Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2020) influyen directamente en el volumen y características de lixiviados que se generan.

De acuerdo con Rivera *et al.* (2013), la edad de los lixiviados, tienen una influencia significativa respecto a la concentración de los diferentes contaminantes, ya que tienden a disminuir al aumentar la edad. En la Tabla 1 se muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de un lixiviado joven (< 5 años), un lixiviado intermedio (5 a 10 años) y un lixiviado maduro (> 10 años).

Tabla 1

Caracterización físico-química de lixiviados

Parámetro	Unidad	Lixiviado Joven	Lixiviado Intermedio	Lixiviado Maduro
- pH	Unidad	7,77-8,26	7,55-8,29	8,18-8,58
- AGV`s	meq L ⁻¹	70-295	70-100	45-62
- Conductividad	mS Cm ⁻¹	27,1-35,3	19,7-22,7	6,5-11,6
- Alcalinidad (HCO ₃ ⁻)	mg CaCO ₃ L ⁻¹	14 562-19 122	8 787-10 296	1 742-4 230
- Dureza total	mg CaCO ₃ L ⁻¹	2 373-4 324	1 106-1 863	882-577
- Dureza cálcica	mg CaCO ₃ L ⁻¹	1 026-1 569	360-393	48-196
- DQO	mg O ₂ L ⁻¹	9 181-25 455	4 295-6 638	1 106-1 794
- DBO ₅	mg O ₂ L ⁻¹	9 306-13 391	670-992	88-103
- DBO ₅ /DQO	-	0,53-0,55	0,15-0,16	0,05-0,09
- COD	mg. L ⁻¹	7 051-7 035	1 310	455
- Nitrógeno total	mg. L ⁻¹	2 184-2 492	1 736 -2 016	476-706
Kejhdal				
- Nitrógeno orgánico	mg. L ⁻¹	224-588	196-420	74-224
- NH ₃ tot	mg. L ⁻¹	1 904-1 988	1 540-1 694	252-632
- NH ₃ no-ionizado	mg L ⁻¹	65-198	30-184	53
- NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	1 762-1 923	1 501-1 510	199-579
- NH ₃ no-ionizado/NH ₃ tot	mg L ⁻¹	0,03-0,10	0,02-0,11	0,08-0,21
- Nitritos	mg L ⁻¹	3,7-5,3	2,7-8,6	0,4-4,4
- Nitratos	mg L ⁻¹	371-451	223-325	62-73
- PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	3,2-47,5	8,9-31,7	1,8-10,5
- Sólidos totales (ST)	mg L ⁻¹	22 418-33 796	12 893-17 950	5 472-9 345

– Solidos suspendidos totales (SST)	mg L ⁻¹	247-981	97-288	90-160
– Solidos disueltos totales (SDT)	mg L ⁻¹	22 171-33 228	12 796-17 775	5 382-9 185
– Solidos suspendidos volátiles (SSV)	mg L ⁻¹	136-884	61-162	56-69
– Cl ⁻	mg L ⁻¹	2 266-4 200	1 398-1 928	241
– Ca ⁺²	mg L ⁻¹	411-629	144-157	19-79
– Mg ⁺²	mg L ⁻¹	323-715	179-353	127-165
– Sulfatos	mg L ⁻¹	26,8	73,8	20,1
– Fe	mg L ⁻¹	33,59	5,78	4,32
– Mn	mg L ⁻¹	2,730	0,397	<0,368
– Cd	mg L ⁻¹	< 0,041	< 0,041	<0,041
– Pb	mg L ⁻¹	< 0,053	< 0,053	< 0,053
– Ni	mg L ⁻¹	0,115-0,190	0,287-0,300	0,102-0,145
– Zn	mg L ⁻¹	0,597-0,698	0,307-0,406	0,086-0,119
– Al	mg L ⁻¹	1,072-1,272	< 0,644	1,870-3,298
– Fenoles	mg L ⁻¹	4,82-10,09	6,68	< 0,012
– BTEX	mg L ⁻¹	<0,0001	< 0,0001	< 0,0001
– HAP's	mg L ⁻¹	<0,0001	< 0,0001	< 0,0001

Nota. Rivera *et al.* (2013). <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/276257/364167>

De acuerdo con Reyes (2015) un espacio de disposición final de residuos sólidos, como un botadero, puede generar los tres tipos de lixiviados al mismo tiempo; esto debido a, los largos periodos de uso de estos espacios. Por tal razón, existirá zonas del botadero que producirán lixiviado joven; otra parte, lixiviados intermedios y, finalmente, los residuos que lleven confinados más de diez años producirán lixiviado maduro.

La muestra utilizada en el proceso experimental de la presente investigación se considera un lixiviado debido a que se formó como resultado de pasar o “percolarse” el agua de lluvia a través de un sólido y/o los sólidos propios del residuo. El líquido fue arrastrando distintas partículas de los sólidos que atravesó, lo cual dio como resultado un líquido marrón o grisáceo denominado lixiviado el cual presentó una amplia gama de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Morales *et al.* 2024).

1.2.5. Características generales de los lixiviados

Las concentraciones de contaminantes en los lixiviados son muy variables en cuanto al tipo y el grado de concentración, los cuales confieren a los lixiviados las características de un potencial contaminante, como la presencia de microorganismos patógenos, una elevada carga de materia orgánica, metales pesados y elementos como el nitrógeno y el fósforo (Reyes, 2015).

Los contaminantes presentes en los lixiviados de un vertedero de residuos sólidos se pueden clasificar en cuatro grupos (Naveen *et al.*, 2017):

Materia orgánica

La carga de materia orgánica que posee un lixiviado depende de la edad del mismo; ya que, los lixiviados jóvenes se caracterizan por presentar un elevado valor de los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), presentando una mayor biodegradabilidad en comparación con los lixiviados maduros, que es muy baja o nula. Debido a ello, los tratamientos biológicos se deben realizar en lixiviados jóvenes para obtener una mayor eficiencia (Vilar, 2015).

Metales pesados

Según Jerez (2013), los metales pesados al igual que otros contaminantes presentes en los lixiviados, pueden variar significativamente respecto a las concentraciones. Los contaminantes de esta naturaleza más recurrentes en los lixiviados son: el cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), zinc (Zn) y níquel (Ni). Los lixiviados jóvenes presentan concentraciones más elevadas respecto a los lixiviados intermedios y maduros, generando problemas de toxicidad en caso de que se quiera utilizar sistemas biológicos para su tratamiento (Reyes, 2015).

Compuestos inorgánicos

La concentración de sales en los lixiviados, son un grupo de contaminantes, que debido a su naturaleza actúan como agentes incrustantes en los diferentes sistemas de tratamiento. Se encuentran en un mayor porcentaje en los lixiviados jóvenes respecto a los lixiviados intermedios y maduros, los contaminantes de esta naturaleza más comunes son: anión cloruro (Cl^-), ion sulfato (SO_4^{2-}), ion amonio (N-NH_3), ion calcio (Ca^{2+}), ion magnesio (Mg^{2+}), ion sodio (Na^+) y ion potasio (K^+) (Reyes, 2015).

Compuestos orgánicos xenobióticos

Jerez (2013) menciona que los compuestos xenobióticos encontrados frecuentemente en los lixiviados son hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs o PAHs.), hidrocarburos alifáticos, pesticidas y plastificantes como bifenoles policlorados (BPCs), dioxina, entre otros.

1.2.6. Impacto ambiental de los lixiviados

Aguas superficiales y subterráneas

Uno de los impactos más significativos de los lixiviados sobre el ambiente, es la contaminación de aguas superficiales y subterráneas como: ríos, lagos, lagunas, quebradas, pozos y manantiales, debido a la elevada cantidad y variedad contaminante que posee, lo que constituye un peligro para la vida silvestre y la salud humana (Valderrama, 2018).

El proceso de contaminación de aguas superficiales empieza por la disposición de residuos sólidos en los botaderos no controlados que, a consecuencia de las precipitaciones en el área, generan una escorrentía que arrastra todos tipos de contaminante, tanto orgánicos como inorgánicos. Mientras que la contaminación de aguas subterráneas ocurre por percolación, escorrentía, migración directa de los lixiviados a través del suelo que se encuentra por debajo de la masa de residuos y el intercambio entre acuíferos. La contaminación de las aguas superficiales se manifiesta por la incorporación de materia orgánica y sustancias tóxicas (Valderrama, 2018).

Suelos

Quintero *et al.* (2017) concluyen que la alta carga contaminante de los lixiviados que se genera en los botaderos no controlados produce cambios significativos en las propiedades físicas, químicas, estructurales y mecánicas de suelo. Asimismo, mencionan que el mayor impacto negativo, es sobre las propiedades químicas del mismo, debido a la gran cantidad de nitrógeno orgánico y amoniacal, elevada presencia de metales pesados como: cadmio (Cd), níquel (Ni), zinc (Zn) y plomo (Pb), elevados valores de demanda bioquímica de oxígeno (DQO) y salinidad; así mismo, determinaron un elevado cambio y aumento en los elementos base del suelo como aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na), los cuales causan que el suelo se vuelva inerte.

Flora y Fauna

Según Valderrama (2018) afirma que los botaderos de residuos sólidos generan un gran impacto negativo sobre la flora y fauna que se encuentra dentro o circundante a dichos espacios, debido a la producción lixiviados y gases contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), los cuales provocan un desplazamiento del oxígeno, ocasionando en la flora ahogamiento de las raíces y, por ende, la muerte de las plantas. Sucede lo mismo para el caso de la fauna; ya que, la contaminación provoca cambios de los hábitats, migración de especies nativas, y en el peor de los casos, muerte por consumo de agentes tóxicos contaminantes procedentes de la descomposición de residuos sólidos.

1.2.7. Tecnologías en el tratamiento de lixiviados

De acuerdo con Giraldo (2014) existen diferentes tecnologías que se pueden aplicar al tratamiento de lixiviados, como procesos anaerobios, aerobios, evaporización, recirculación, sistemas de membranas, plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) o sistemas naturales. En la Tabla 2 se muestran la comparación de ventajas y desventajas de dichas tecnologías, como el costo de implementación, operación y mantenimiento, que, asociados al contexto donde se aplican, determinan la elección de una de ellas. Los sistemas naturales es una de las tecnologías que poseen una gran atracción por la sencillez y simplicidad en su aplicación, siendo idónea para países en vías de desarrollo, donde la complejidad afecta a la sostenibilidad.

Tabla 2*Ventajas y desventajas de las tecnologías para el tratamiento de lixiviados*

Problema con	Tecnologías						Tratamiento PTAR
	Aerobias	Anaerobias	Evaporización	Recirculación	Membranas	Sistemas naturales	
Formación de Precipitados	++	+++	+	++	+++	+	No
Toxicidad a los microorganismos	++	++	No	No	No (1)	+	Potencial
Formación de espumas	+++	+	++	+(1)	Variable (2)	No	Baja
Emisión de COV	+++	+	++	+	Variable (2)	+	Baja
Sensibilidad a variaciones de caudal	++	++	+	+	+	No	No
Producción y manejo de lodos	+++	+	+	No	+		No
Requerimientos de área	baja	baja	Muy baja	baja	baja	alta	no

Nota. Giraldo (2014). <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>

(1) Pueden formarse en los tanques de almacenamiento.

(2) Si los sistemas son aeróbicos la problemática puede ser alta.

(+) Una cruz significa como afecta negativamente la característica al proceso en cuestión, entre más cruces más negativamente lo afecta.

1.2.8. Sistemas naturales

Según García y Corzo (2008), los sistemas naturales son resultado de una interacción natural, entre los factores bióticos y abióticos de un determinado medio. En este caso, están conformado por microorganismos, plantas y el medio donde se desarrollan; es decir, suelo, agua o combinación de ambos, que dan como resultado los humedales naturales. Producto de dicha interacción, se desarrollan diferentes procesos complejos, como la fitorremediación que pueden ser aprovechados en la fijación, aislación y concentración de ciertos compuestos deseados. Siendo esta tecnología un mecanismo no convencional de tratamiento de agua. En la Tabla 3 se muestra la comparación de la complejidad de diferentes tecnologías en el tratamiento de lixiviados.

Tabla 3*Comparación de la complejidad tecnológica*

Problema con	Tecnologías						Sistemas naturales	tratamiento PTAR
	Aerobias	Anaerobias	Evaporización	Recirculación	Membranas			
Necesidad de insumos químicos	+++ (1)	+++ (1)	++ (2)	-	+++ (1)	-	-	
Necesidad de insumos operacionales (v. gr. membranas)	++	+	+	+	+++	-	-	
Necesidad de suministro de partes	++	-	+	+	+++	-	+	
Suministro de Energía Eléctrica	+++	+(4)	(5)	+	+++	+(3)	+	
Complejidad Operacional	+++	+	++	+	+++	-	-	

Nota. Giraldo (2014). <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>

(1) Requiere un extenso pretratamiento

(2) Puede requerir pretratamiento, algunos sistemas usan sustancias para control de pH, espumas.

(3) Puede requerir si hay necesidad de bombear el lixiviado. Usualmente no requiere.

(4) Puede requerir en el sistema de pretratamiento

(5) Puede llegar a ser autosuficiente. Algunas tecnologías así están diseñadas.

(-) No aplica

Humedales naturales

La Secretaría de la Convención de Ramsar (2013) define a un humedal, como un espacio geográfico caracterizado por presentar un estado saturado o inundado por aguas superficiales o subterráneas poco profundas, manteniendo una frecuencia y duración necesaria, para mantener y permitir el desarrollo idóneo de las especies vegetales predominantes adaptadas a estos medios. Cuando estos sistemas son replicados por el hombre se les conoce como humedal artificial o contruidos, diseñados específicamente para el tratamiento de efluentes líquidos. Estos sistemas tienen por objetivo emular de manera controlada los múltiples procesos de naturaleza física, química o biológica que se llevan a cabo de manera natural en un humedal, a través de los cuales permite depurar el agua contaminada logrando así mejorar su calidad (Montalvan *et al.*, 2015).

Estos sistemas presentan diferentes componentes, siendo los principales:

- Agua. Es el efluente para tratar, su composición puede ser variada, ya que es agua residual.
- Sustrato o medio de soporte. Se utiliza principalmente grava o arena de diferentes granulometrías, y sirve como medio de soporte para las especies vegetales y las diferentes poblaciones de microorganismos.
- Vegetación. Son las plantas que están adaptadas a un humedal, encargadas de algunas funciones como la adsorción, fijación y almacenamiento de un determinado contaminante.
- Microorganismos. Conformado por diferentes poblaciones de organismos unicelulares como las bacterias, encargadas de diferentes procesos biológicos el tratamiento del efluente.

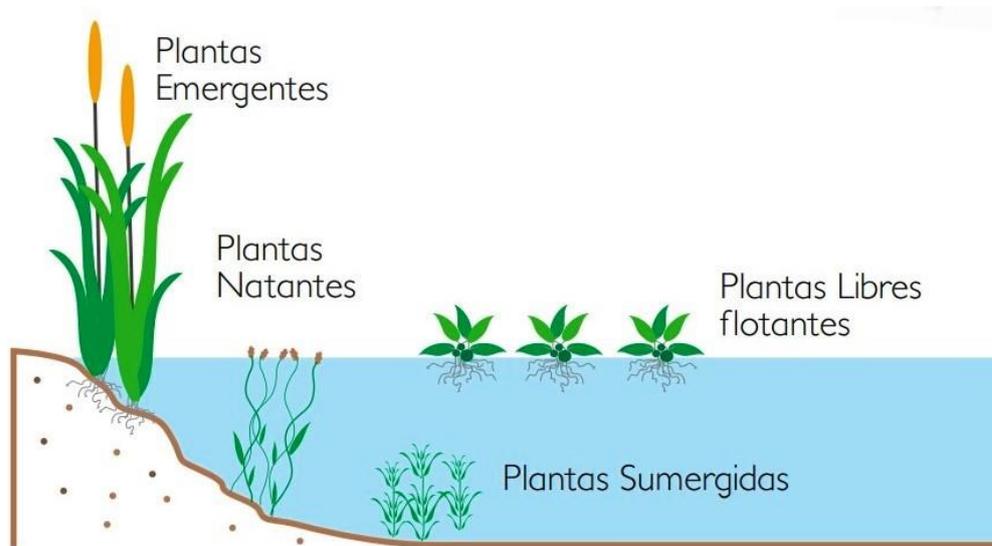
Según Vidal y Hormazábal (2018), los humedales construidos se pueden clasificar de acuerdo al recorrido que realiza el flujo de agua a través de sustrato o por el tipo de macrófita que se utiliza, lográndose determinar humedales con macrófitas flotantes, emergente, sumergida y de hoja flotante.

1.2.9. Clasificación de especies de flora en los humedales

En un humedal natural existe una gran variedad de especies de macrófitas, pertenecientes al reino vegetal, caracterizadas por desarrollar todo su ciclo de vida en espacios anegados o saturados como: ríos, lagos, arroyos o humedales. En un humedal las macrófitas se encuentran distribuidas en una secuencia de crecimiento, como se muestra en la Figura 2. Esto se genera a partir de la profundidad del cuerpo de agua, permitiendo su clasificación, en cuatro grupos de acuerdo con su morfología en macrófitas emergentes, nadantes, flotantes libres y sumergida (Vidal y Hormazábal, 2018).

Figura 2

Clasificación del tipo de macrófitas



Nota. Vidal y Hormazábal (2018). <http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1779>

Las plantas sumergidas se caracterizan por mantener toda su estructura vegetativa inmerso en el agua, siendo la oxigenación de la columna de agua una de las principales ventajas, esto es producto del proceso de fotosíntesis que realiza la planta. Así mismo, algunas especies de hidrófitas presentan una variación con la exposición de hojas que flotan sobre la lámina de agua conociéndose como macrófitas nadantes. Estos dos tipos de macrófitas se encuentran arraizadas en el sustrato (Fernández *et al.*, 2014).

Las macrófitas emergentes son plantas que se caracterizan por presentar enraizamiento en el sustrato, parte de su estructura vegetal sobresale por encima de la lámina de agua, permitiendo actuar como filtro ayudando a los procesos de floculación y sedimentación. Además, su estructura sumergida sirve como medio de soporte para las poblaciones de microorganismos. Mientras que las macrófitas flotantes no tienen un enraizamiento fijo en el sustrato, sus raíces están suspendidas en el medio acuático y sus órganos asimiladores flotan sobre la lámina de agua (Fernández *et al.*, 2014).

De acuerdo con Vidal y Hormazábal (2018), todas las especies de macrófitas no presentan la misma capacidad de tolerancia o eficiencia en la remoción de un determinado

contaminante; además, esta puede variar según el tipo de efluente a tratar y las condiciones ambientales en las que se encuentra. Por lo tanto, es necesario evaluar estas características *in situ* antes de seleccionar una macrófita para humedal construido.

1.2.10. Función de las macrófitas en los humedales construidos

Las macrófitas son uno de los principales componentes de los humedales construidos, ya que permiten llevar a cabo los procesos de fitorremediación, gracias a diversos factores tales como su acelerada actividad metabólica que se evidencia por el aumento de biomasa. Además, facilita la oxigenación del efluente potenciando el crecimiento de diversas poblaciones de microorganismos aeróbicos, que a través de una relación simbiótica dan como resultado un aumento en la cantidad y velocidad de eliminación de contaminantes (Vidal y Hormazábal, 2018).

Según Delgadillo *et al.* (2011), la fitorremediación es un tipo de tecnología, a través de la cual, se aprovecha algunos procesos fisiológicos propios de determinadas especies vegetales, como la transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición.

Reyes (2015) afirma que, la fitorremediación es una tecnología sustentable que permite transformar los contaminantes en menos biodisponibles, reduciendo así su peligrosidad y previniendo su erosión o lixiviación del contaminante. En la Figura 3 se muestra los diferentes mecanismos de fitorremediación que puede seguir un contaminante, dentro o fuera de la especie vegetal, mediante los siguientes procesos:

Fitoextracción. También conocida como bioacumulación; proceso mediante el cual una especie vegetal secuestra un determinado compuesto, a través del área de contacto, como por ejemplo las raíces y lo acumula dentro de sus tejidos (Delgadillo *et al.*, 2011).

Fitodegradación. De acuerdo con Delgadillo *et al.* (2011) define a la fitodegradación como un “Proceso mediante el cual una especie vegetal degrada un compuesto de carácter orgánico dentro de su estructura a través de procesos enzimáticos, pudiendo mineralizarlos hasta CO₂ y H₂O” (p.661).

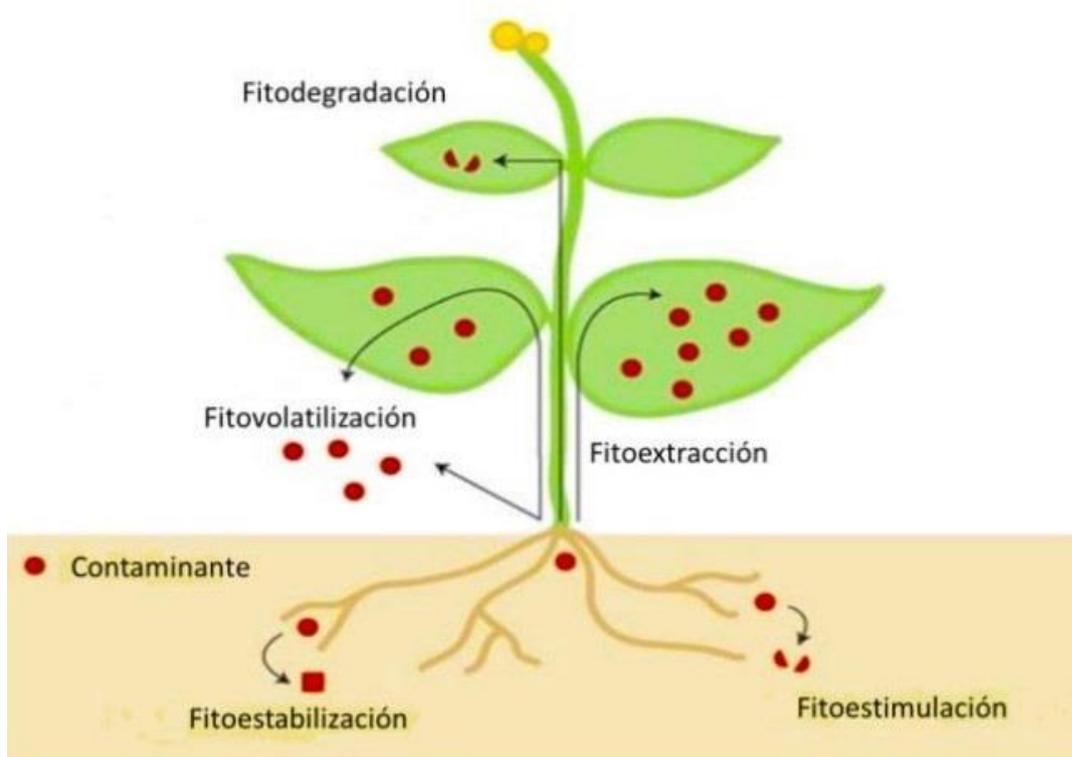
Fitovolatilización. Proceso por el cual una especie absorbe un compuesto, ya sea de carácter orgánico e inorgánico y los transforma biológicamente en compuestos gaseosos, los cuales son liberados a la atmósfera (Vara y de Olivera, 2003).

Fitoestabilización. Es un proceso que tiene como objetivo la inactivación de un contaminante ya sea de manera física, química o ambas, sirviendo como medio preventivo para disminuir las vías de exposición al contaminante (Vara y de Olivera, 2003).

Fitoestimulación. También conocida como rizodegradación, la planta a través de exudados radiculares crea relaciones simbióticas con microorganismos determinados que permiten la degradación del contaminante (López *et al.*, 2005).

Figura 3

Procesos de fitorremediación de un contaminante



Nota. Reyes (2015). <http://hdl.handle.net/10251/56763>

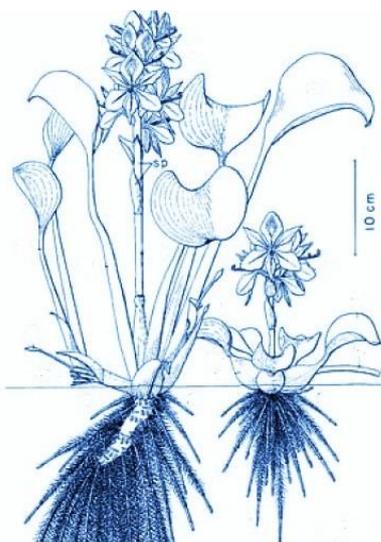
1.2.11. Características de la *Eichhornia crassipes*

Es una macrófita flotante, que tiene como características principales su gran capacidad de resiliencia a diferentes condiciones ambientales y su velocidad de reproducción, características que la convierten en una especie invasora que actualmente se puede encontrar en todos los trópicos y subtrópicos de los continentes de Europa, Asia, África, América y Australia (Albano, 2012). Es originaria de América del sur, específicamente de la cuenca Amazónica donde es conocida como Jacinto de agua, lirio o buchón de agua, pero su nombre científico es *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laub (Carreño, 2020).

En la Figura 4 se puede observar la estructura del *Eichhornia crassipes*, la cual presenta una conformación en forma de roseta, con hojas redondeadas, sostenidas por peciolo que presentan una estructura muy aerenquimatoso (llenos de aire), brindándole la capacidad de flotar en el agua. En cuanto a sus raíces, presenta una gran cantidad de raíces secundarias que le dan una apariencia de melena, variando de color blanco cuando son jóvenes y negro-violácea cuando son adultas (Cirujano *et al.*, 2014).

Figura 4

Esquema de la *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Lau.



Nota. Albano (2012). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=180803>

En la Tabla 4 se muestra la clasificación taxonómica de la *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Lau, según Khatun *et al.* (2006), esta macrófita perenne, presenta variaciones en su morfología dependiendo del hábitat y condiciones donde se encuentre, diferenciándose principalmente en la longitud de los peciolos. Según Cirujano *et al.* (2014), el jacinto de agua se puede encontrar en cuerpos de agua lénticos, como lagos o charcas. Sin embargo, a pesar de ser una macrófita flotante, también se encuentra en cuerpos de agua lóticos con poca corriente, como riveras de río, humedales, canales, etc.

Tabla 4

Taxonomía de la Eichhornia Crassipes (Mart.) Solms-Lau.

Taxonomía de <i>Eichhornia crassipes</i>	
Reino	Vegetal
Subreino	Fanerógama
Tipo	Angiosperma
Clase	Monocotiledónea
Subclase	Super ovárica
Serie	Periantanas
Familia	Pontederiácea
Género	<i>Eichhornia</i>
Especie	<i>Eichhornia crassipes</i>

Nota. Castillo (1990). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5678790>

Reproducción y crecimiento

La capacidad de reproducción del Jacinto de agua es sexual como asexual, siendo la primera la menos eficiente, debido a la baja tasa de polinización, caracterizada por la floración de entre 8 y 15 flores de color violeta, al finalizar dicha etapa puede llegar a producir hasta 20 frutos conteniendo cada uno de 3 a 450 semillas (Albano, 2012). La reproducción asexual de esta macrófita lo realiza a través de la división de estolones, permitiendo cubrir de manera rápida, grandes espejos de agua, en estaciones y condiciones favorables (Carreño, 2020).

1.2.12. Parámetros fisicoquímicos del agua

La calidad del agua se determina mediante la caracterización de su estado, a partir de la evaluación de diferentes parámetros de carácter biológicos, organolépticos y fisicoquímicos, dicha calidad está determinada de acuerdo con la necesidad de uso del recurso hídrico, los valores máximos permitidos para cada parámetro son establecidos por normativa (Raffo, 2013).

Sólidos totales

Los sólidos pueden encontrarse en dos formas en un cuerpo de agua; ya sea, sedimentados o suspendidos, la diferencia que caracteriza a cada uno es su granulometría. Los sólidos suspendidos son menores a 1 000 milimicrómetros y principalmente influyen en el color y olor del agua, mientras que los sólidos sedimentables tiene una granulometría mayor a 1 000 milimicrómetros e influyen de manera directa sobre la turbidez, dichos sólidos pueden determinarse a través de un proceso de decantación; si bien, la composición química de estos contaminantes no puede ser estimada a través de pruebas analíticas, su análisis se centra específicamente en sus propiedades físicas y comportamientos semejantes a ciertas condiciones ambientales (Barrenechea, 2004).

Temperatura

Es un parámetro físico fundamental, sus variaciones está sujeta principalmente a las condiciones ambientales, teniendo influencia directa sobre diversas características de un determinado cuerpo de agua, como la solubilidad de sustancias, los sólidos disueltos y la aceleración o desaceleración de la actividad biológica, su determinación se recomienda que sea realizada “*in situ*” a través de termometría (Fernández y Volpedo, 2020).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica indica la capacidad de un cuerpo de agua para conducir la corriente eléctrica, expresándose los resultados en el Sistema Internacional de unidades en siemens por metro (S/m) o microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$), siendo las concentraciones

de sales disueltas las responsables de transportar la corriente eléctrica a través de los iones libre que se encuentran en el medio (Solís *et al.*, 2018).

Potencial de hidrógeno (pH)

Indica la concentración de iones libres de hidrógeno (H^+), en base a la concentración de los iones hidroxilo (OH^-) presentes en una solución acuosa, determinándose mediante la siguiente formula: $pH = -\log[H^+]$. La importancia de este parámetro radica en que ciertas reacciones químicas y procesos biológicos se ven favorecidas o anuladas bajo ciertos valores de acidez ($pH > 7$), neutralidad ($pH = 7$) y alcalinidad ($pH < 7$), teniendo un rango de valoración de 0 a 14 (Raffo, 2013).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

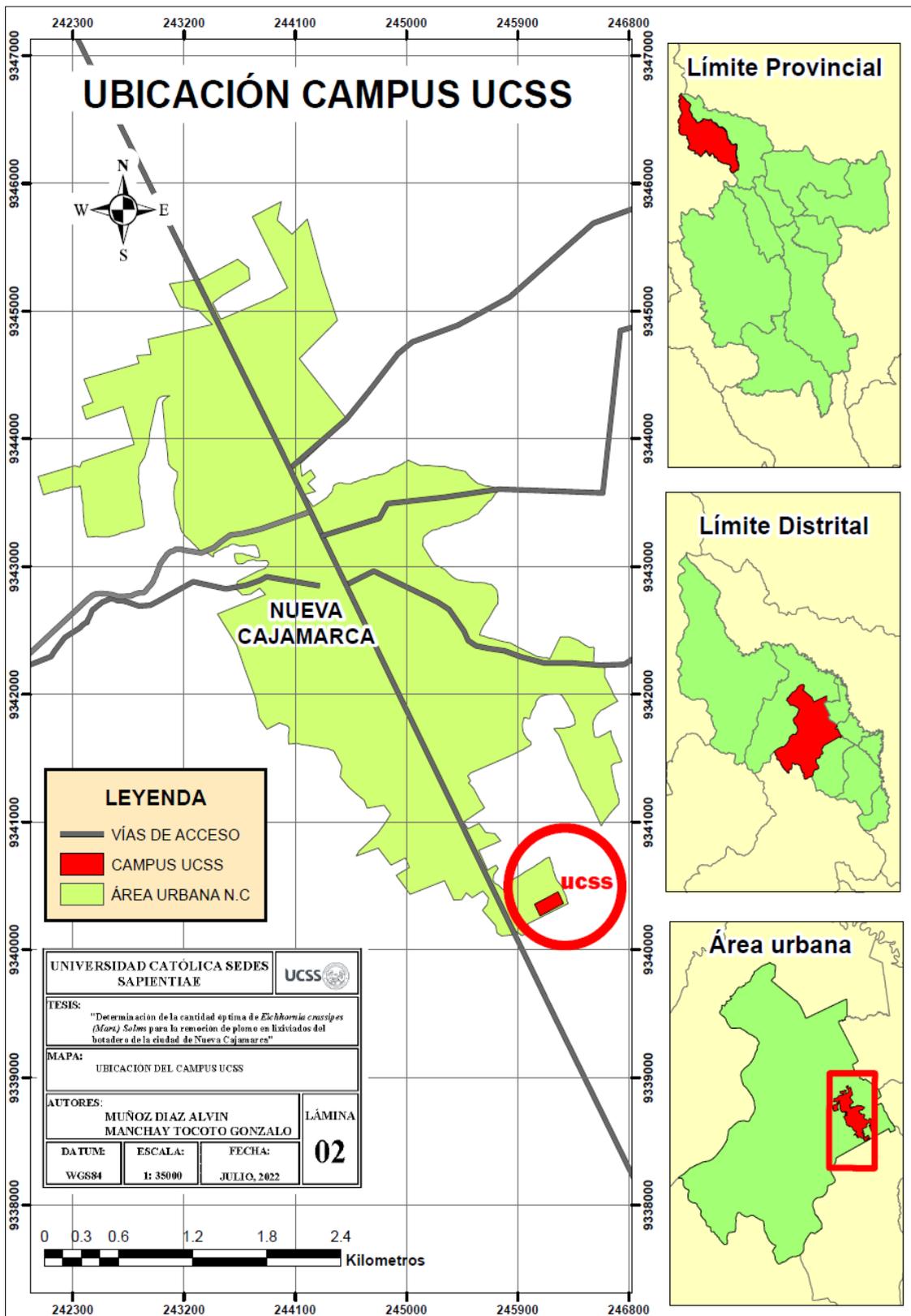
La presente investigación fue de tipo experimental puro, esto debido a que existe una manipulación intencional de la variable independiente y la medición del efecto que causa sobre la variable dependientes. Además, caracteriza por presentar “grupos de comparación” y “equivalencia de grupos”, teniendo un enfoque mixto con un diseño estadístico unifactorial (Hernández *et al.*, 2014).

2.2. Lugar y fecha

El presente estudio se desarrolló en el distrito de Nueva Cajamarca, provincia de Rioja, región de San Marín en el campus de la universidad Católica Sedes Sapientiae Filial Rioja: Nueva Cajamarca, ubicada en la Calle Santa Cruz cuadra 4 s/n – sector Nuevo Edén. Específicamente en el área de hidroponía con coordenadas este: 246109 y norte: 9340491 durante los meses de julio - diciembre del año 2020 y enero - marzo del 2021, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

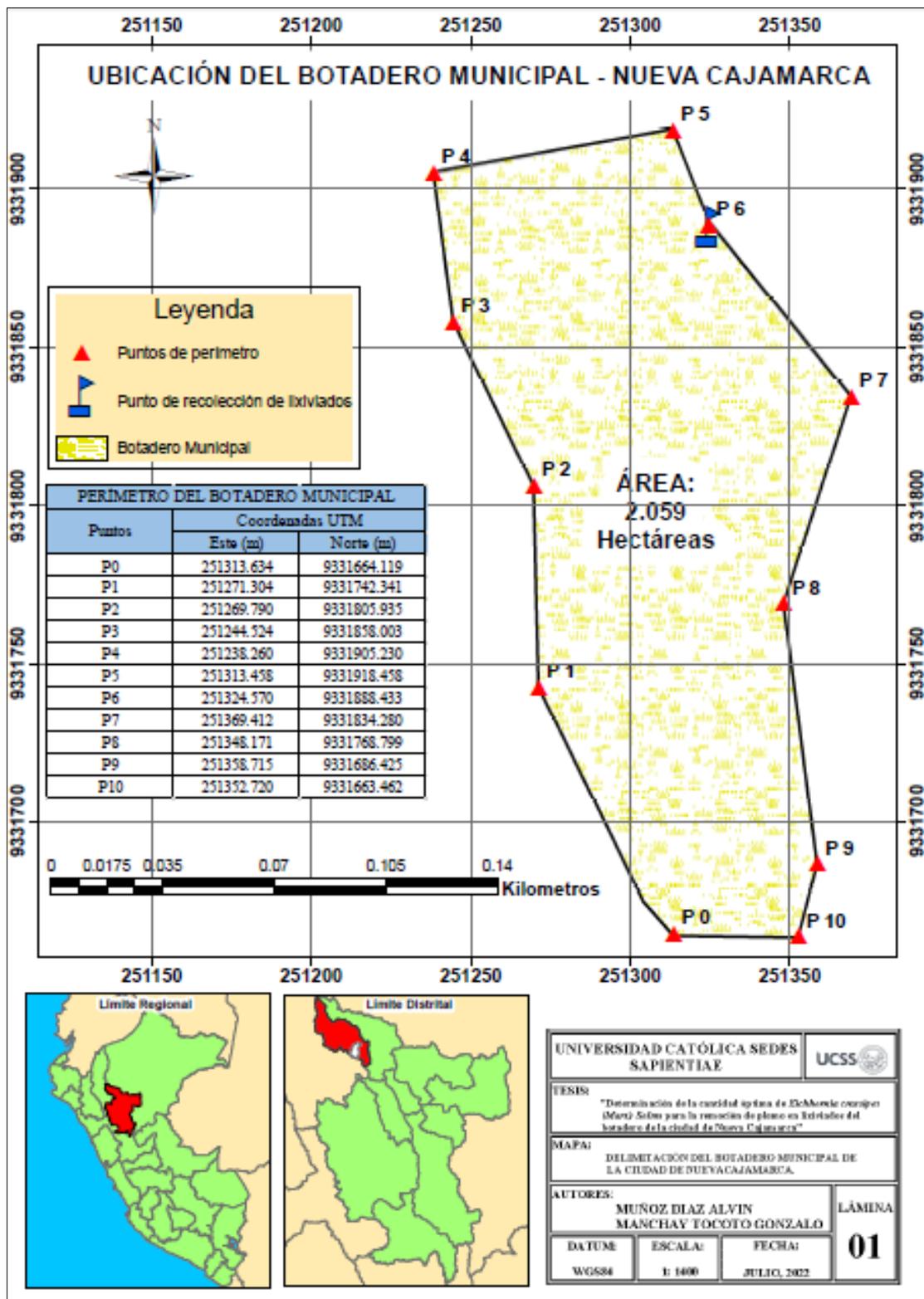
Ubicación del área experimental del proyecto



Nota: Elaborado a partir del programa ArcGIS 10.8

Figura 6

Ubicación del botadero municipal – Nueva Cajamarca



Nota: Elaborado a partir del programa ArcGIS 10.8

2.3. Descripción del experimento

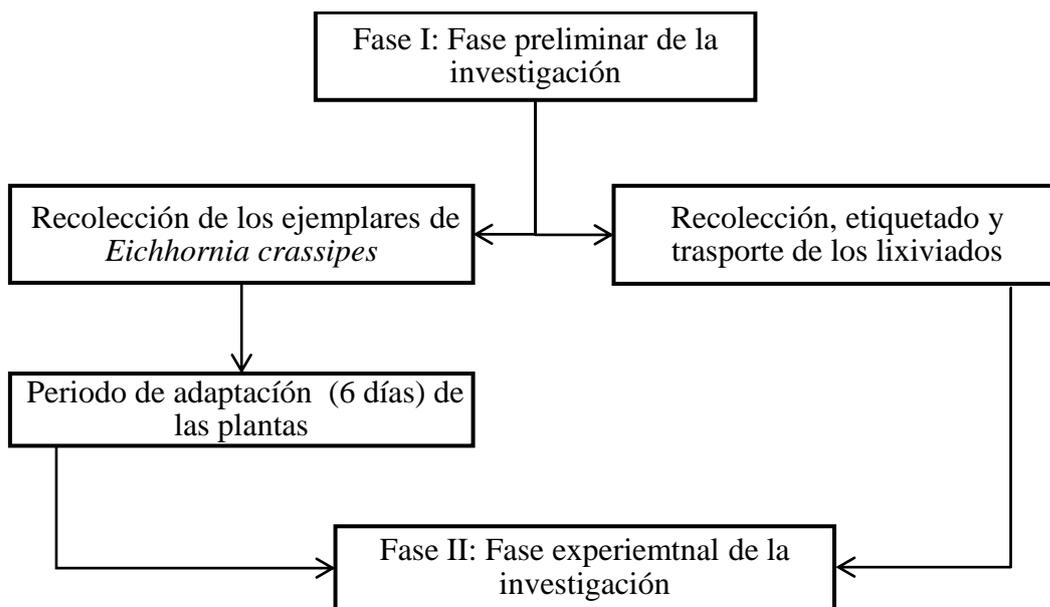
El desarrollo y ejecución de la presente investigación fue dividido en tres fases preliminar, fase experimental y fase final o de gabinete.

Fase preliminar

Es la primera fase del proceso experimental donde se habilitaron todos los materiales, equipos, insumo e implementos necesarios por el inicio de la fase experimental, la cual se describe y esquematiza en la Figura 7.

Figura 7

Esquema de la fase preliminar de la investigación



La fase preliminar de la investigación se inició con la recolección de las plantas de *Eichhornia crassipes* del río Tioyacu ubicado en distrito de Elías Soplin Vargas, provincia de Rioja, el punto de muestreo registró las siguientes coordenadas este: 248784,18 y norte: 9336540,14. Para la selección de las plantas se tuvo en cuenta que todas presentaran uniformidad en cuanto al tamaño, raíz, color de hojas y peso. La población seleccionada fue de 100 unidades las cuales fueron trasladadas al área de estudios utilizando bolsas de polietileno de baja densidad de 115 x 150 cm.

El periodo de adaptación de las plantas de *Eichhornia crassipes* fue realizada en el área de hidroponía del campus de la Universidad Católica Sedes Sapientiae Filial Rioja: Nueva Cajamarca, en el cual previamente fue habilitado un área aproximada de 50 m² donde se dispusieron las plantas en bandejas con agua del mismo río de donde fueron extraídas. Al finalizar los 6 días que duró el periodo de adaptación, ninguna de las plantas de *Eichhornia crassipes* presentó lesiones de necrosis, cambio de coloración de las hojas, tallos, raíces u otros indicadores que hicieran presumir de su inadaptación. La duración de esta etapa fue determinada en base a las metodologías de investigaciones utilizadas por Mera (2016) y Miguel-Barrera *et al.* (2020) donde establecieron periodos de adaptación de la *Eichhornia crassipes* de 4 y 5 días respectivamente, para estudio de investigación con la especie a nivel de laboratorio.

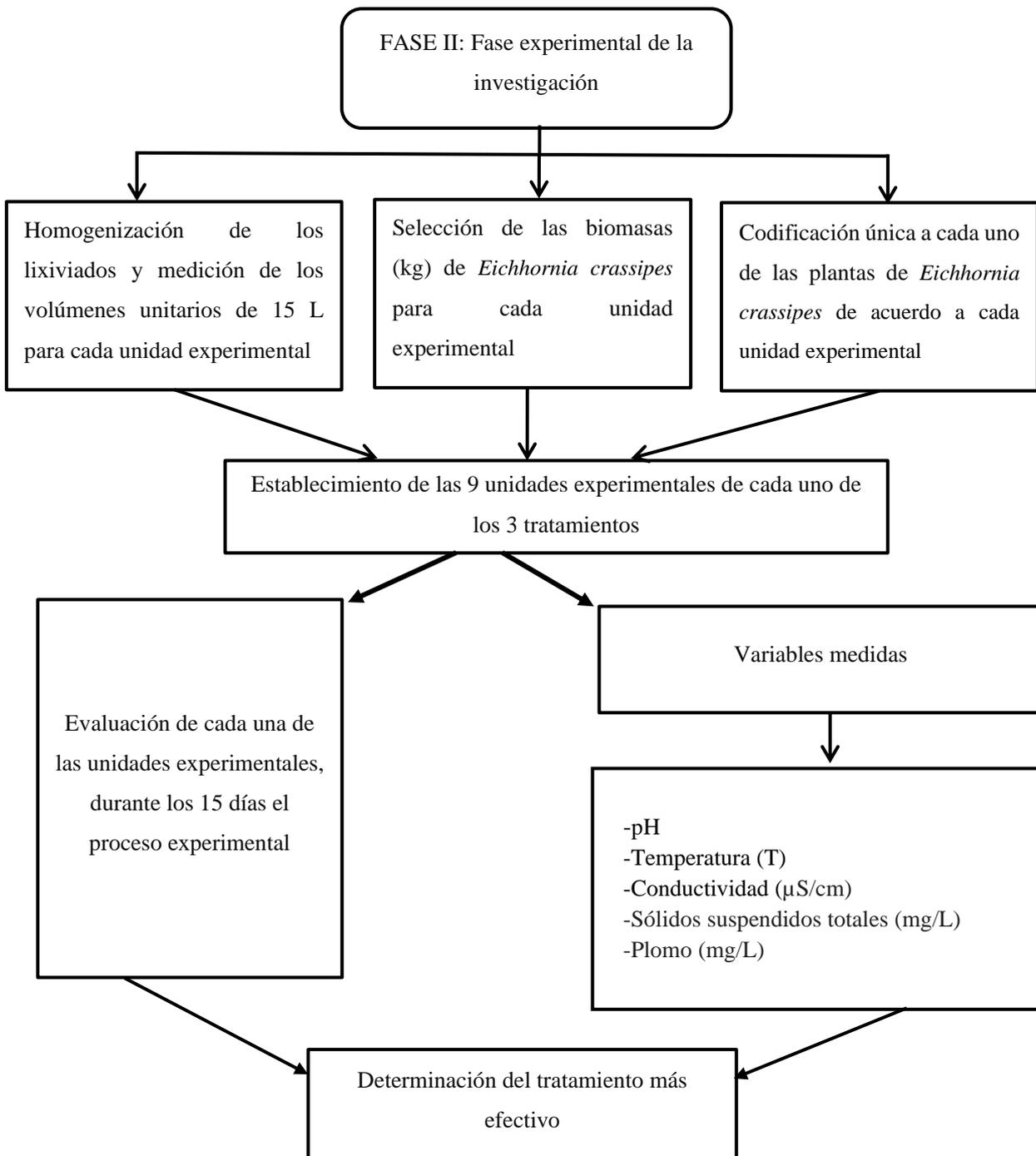
Para la recolección de los lixiviados como primera actividad se solicitó el permiso de acceso a la municipalidad de Nueva Cajamarca, entidad que administra el botadero a cielo abierto ubicado en el sector el Ramiro Priálé perteneciente a la provincia de Rioja. Esto se realizó con el objetivo de reconocer, verificar y determinar in situ las coordenadas exactas del punto de recolección de los lixiviados, siendo ubicado en la parte más baja entre las coordenadas este: 251324,56 y norte: 9331888,43; tal como se observa en la Figura 6. El proceso de recolección, etiquetado y transporte de los 150 L de lixiviados requeridos para la fase experimental fue realizado mediante un muestro simple, siguiendo el protocolo de monitoreo de la calidad de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (Resolución Ministerial N° 273-2013-Vienvienda, 2013) (ver Apéndice 26). Con la finalidad de determinar si los lixiviados generados en el botadero municipal de Nueva Cajamarca contenían el plomo suficiente para realizar la investigación, se recogió una muestra de lixiviados la cual fue enviada al Laboratorio Anaquímicos Servicios Generales EIRL para su análisis de caracterización teniendo los siguientes resultados 0,05 mg/L para plomo (Pb) y 734 mg/L de sólidos totales suspendidos (ver Apéndice 13). Según Rivera *et al.* (2013), los lixiviados que presenten parámetros dentro de los valores descritos anteriormente pueden ser categorizados como lixiviados jóvenes, es decir fueron producidos en un tiempo no mayor a 5 años.

Fase experimental

La fase experimental de la investigación se describe y explica detalladamente en las Figuras 8. Así mismo, la estructura del experimento y la metodología utilizada, tienen como base las investigaciones y metodologías aplicadas por Miguel-Barrera *et al.* (2020) y Carreño (2020).

Figura 8

Esquema de la fase experimental de la investigación



Distribución el volumen de lixiviados

Una vez homogenizada el volumen total de los lixiviados (150 L), se procedió a realizar la distribución de 15 L a cada una de las bandejas de manera uniforme, para ello se utilizaron jarras medidoras. El uso de sistemas discontinuos o por lotes fue seleccionado en base a las metodologías de investigación utilizadas por Aguilar (2019); Carreño (2020); Miguel-Barrera *et al.* (2020) y Mera (2016), donde evaluaron el potencial biorremediador de la *Eichhornia crassipes* y otras especies vegetales acuáticas a diferentes contaminantes como los metales pesados, validando dicha metodología.

Durante el periodo experimental no se tomó en cuenta la variable de pérdidas del volumen de los lixiviados tratados por la evapotranspiración (ET) de las plantas de *Eichhornia crassipes*. Esto debido, a que las condiciones experimentales fueron de un invernadero la cual tuvo un techo de malla rashel al 95 %, las pérdidas del volumen de lixiviados por ET no fueron significativas esto debido al asilamiento de los principales factores ambientales que presentan una relación directa como es la radiación solar directa y la temperatura (Serna, 2011).

Muestro de las plantas *Eichhornia crassipes*

Una vez cumplido el pedido de datación de las plantas de *Eichhornia crassipes*, se procedió a la selección la cual fue realizado mediante un muestreo aleatorio simple, donde fueron seleccionadas 51 plantas para los tres tratamientos objeto de estudio en la presente investigación. De acuerdo con Silva (2022), una muestra del 25 % de la población será suficientemente representativa, es decir si la población tiene 100 elementos o unidades experimentales, entonces la muestra debe de estar conformada como mínimo por 25 unidades experimentales o ejemplares de estudio. Así mismo, Corral *et al* (2015), consideran que una muestra de 30 % de la población es suficientemente representativa, para muestras aleatorias (al azar).

Codificación y distribución de plantas *Eichhornia Crassipes*

Posterior a la selección cada una de las plantas de *Eichhornia crassipes* se le asignó un código único (Apéndice 19, 20 y 21), esto con la finalidad de realizar la trazabilidad de los cambios fenológicos de las plantas como; el cambio de coloración de las hojas, el número de hojas viables, la variación de la longitud de raíz y variación de peso. Además, se registraron las características fenológicas iniciales de cada planta.

La distribución de las plantas de *Eichhornia crassipes* cada una de las bandejas se realizó después de su pesaje y la medición de la longitud de la raíz la cual se realizó con una balanza analítica y una regla como se muestra en la Figura 9. El periodo de evaluación fue de 15 días, la cual fue determinado en base a las metodologías de investigación usadas por Aguilar (2019); Carreño (2020) y Miguel-Barrera *et al.* (2020) donde determinaron periodos similares o iguales de sobrevivencia o de saturación de la *Eichhornia crassipes* a metales pesados como el plomo.

Fase final o gabinete

Una vez concluida la fase experimental de la investigación, se inició con la fase de gabinete la cual consistió principalmente en el procesamiento y análisis de la información, la cual fue realizada principalmente a través de los programas R.Studio 8.0 y Excel versión 2016 como herramientas principales.

2.5. Tratamientos

Para la presente investigación se estableció tres tratamientos, cada uno con tres réplicas. El establecimiento de estos tratamientos fue realizado en base a la metrología de investigación realizada por Carreño (2020), en la cual evaluó la eficiencia de fitorremediación de la *Eichhornia crassipes*. Cada tratamiento se caracterizó por tener diferentes cantidades de biomasa (kg) de *Eichhornia crassipes* en un volumen uniforme de lixiviados a tratar. La estructura de los tratamientos se conformó de la siguiente manera:

- a. El tratamiento uno (T1) estuvo compuesto por una biomasa total de 1,5 kg de *Eichhornia crassipes* + 45 L de lixiviado; la distribución se realizó de manera igualitaria para las tres unidades experimentales o réplicas. La primera unidad experimental codificada como; “T1 – A”, se agregó 0,5 kg de *Eichhornia crassipes* + 15 L de lixiviado, la segunda unidad experimental codificada “T1 – B”, se agregó 0,5 kg de *Eichhornia crassipes* + 15 L de lixiviado y finalmente para la tercera unidad experimental codificada “T1 – C”, se agregó 0,5 kg de *Eichhornia crassipes* + 15 L de lixiviado.
- b. El tratamiento dos (T2), estuvo compuesto por una biomasa total de 3 kg de *Eichhornia crassipes* + 45 L de lixiviado, la cual fue distribuida de manera igualitaria en sus tres réplicas o unidades experimentales T2 – A, T2 – B y T2 – C tal como se detalla para el tratamiento uno (T1).
- c. El Tratamiento tres (T3), estuvo compuesto por una biomasa total de 4,5 kg de *Eichhornia crassipes* + 45 L de Lixiviado, la distribución se realizó de manera igualitaria en sus tres réplicas T3 – A, T3 – B y T3 – C tal como se detalla para el tratamiento uno (T1).

Así mismo, en la Tabla 5 y Figura 9 se presenta la conformación de cada tratamiento con sus respectivas biomasa utilizadas en cada una de las unidades experimentales:

Tabla 5

Tratamientos experimentales y sus respectivas biomasa

Repeticiones	Biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i> (kg)		
	T1 (0,5 kg)	T1 (1 kg)	T3 (1.5 kg)
1	T3 - A	T2 - A	T1 - A
2	T3 - B	T2 - B	T1 - B
3	T3 - C	T2 - C	T1 - C
Tiempo de exposición	15 días		

Figura 9

Distribución de tratamientos con su respectiva estructura



2.6. Unidades experimentales

Para la presente investigación tuvo un total nueve unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo representada por una bandeja con un volumen uniforme de 15 L de lixiviados como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6

Distribución de la estructura de cada unidad experimental o réplica

Tratamiento	Réplica	Biomasa (kg) <i>Eichhornia crassipes</i> + Volumen de lixiviado (L) por cada réplica
T1	T1 - A	0,5 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
	T1 - B	0,5 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
	T1 - C	0,5 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
T2	T2 - A	1 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
	T2 - B	1 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
	T2 - C	1 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
T3	T3 - A	1,5 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
	T3 - B	1,5 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado
	T3 - C	1,5 kg de <i>Eichhornia crassipes</i> + 15 L de lixiviado

- Todas las bandejas tuvieron una misma capacidad de 20 L cada una.
- El volumen de lixiviado a tratar fue uniforme para todas las unidades experimentales de 15 L en cada unidad.
- Las condiciones climáticas fueron de invernadero, para todas las unidades experimentales y proceso experimental.

2.7. Identificación de variables y su mensuración

Las variables de estudio evaluadas en la presente investigación se muestran de manera detallada en la Tabla 8.

Tabla 7

Identificación de variables y mensuración

Variables	Parámetro	Unidad	Mensuración
Independiente	Biomasa de <i>Eichhornia crassipes</i>	kg	Gravimetría
	Tiempo de exposición	días	
Dependiente	% de remoción plomo	mg/L	Espectrofotometría
	Potencial de hidrógeno	pH	pH-metro
	Conductividad eléctrica	μS/cm	Conductímetros
Interviniente	Temperatura	°C	Electrodo de temperatura
	Sólidos totales suspendidos	mg/L	Gravimetría
	Número de hojas viables	Unidad	Medición directa
Dependientes	Variación de longitud de raíz	cm	Medición directa
	Variación de peso	g	Gravimetría
	Cambios fenológicos de las hojas	Descriptivo	Descriptivo

2.7.1. Porcentaje de remoción plomo

La determinación de los porcentajes de remoción de plomo de cada uno de las unidades experimentales se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica por el método

de (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0,00 005 Part 3 030 k, 3 125 B, 23 rd Ed 2017). Las actividades de muestreo, etiquetado y transporte de las muestras al laboratorio “Anaquímicos Servicios Generales EIRL” se realizó siguiendo el protocolo de monitoreo de la calidad de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (Resolución Ministerial N° 273-2013-Vienvienda, 2013). Los muestreos fueron realizados a los 5, 10 y 15 día del periodo experimental. La determinación de los porcentajes removidos fue realizado a través de la siguiente formula:

$$Pr = \frac{Ci - Cf}{Ci} * 100$$

Donde

Pr: Porcentaje de remoción

Ci: concentración inicial de plomo mg/L

Cf: concentración final de plomo mg/L

2.7.2. Parámetros fisicoquímicos de los lixiviados

Durante el periodo experimental se realizó el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados que se muestran en la tabla 7. Para la mensuración de los parámetros de Ph, temperatura y conductividad eléctrica fue realizado in situ mediante el equipo multiparamétrico PH/CE/TDS/°C de la marca HANNA, modelo HI 9811-5, pertenecieron al laboratorio de ciencias básicas I y II de la Universidad Católica Sedes Sapientiae Filial: Rioja -Nueva Cajamarca.

La evolución de los sólidos totales suspendidos fue realizada mediante gravimetría por el método (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2 540 C, 23 rd Ed 2017). Las actividades de muestreo, etiquetado y transporte de las muestras al laboratorio “Anaquímicos Servicios Generales EIRL” se realizó siguiendo el protocolo de monitoreo de la calidad de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (Resolución Ministerial N° 273-2013-Vienvienda, 2013). Los muestreos fueron realizados al 5, 10 y 15 día del proceso experimental.

Tabla 8*Parámetros fisicoquímicos evaluados*

Parámetros	Unidad	Frecuencia de evaluación
- Potencial de hidrógeno	-	Diario
- Temperatura	°C	Diario
- Conductividad eléctrica	µS/cm	Diario
- Sólidos totales suspendidos	mg/L	Cada 5 días

2.7.3. Cambios fenológicos de la *Eichhornia crassipes*

Los cambios fenológicos y frecuencia de evaluación se muestran en la Tabla 8.

- Cambio de coloración hojas, se realizó de manera descriptiva en la cual se describieron el estado de marchites de las plantas, cambio de coloración de hojas, crecimiento de nuevas hojas, brotes y floración.
- Número de hojas viable, se realizó a través de un conteo de hojas por planta de la cual solo se tomaron en cuenta las hojas que no presentaran lesiones de necrosis, amarillamiento o marchitez de cada una de las unidades experimentales.
- Tamaño de raíz, se registró la longitud de la raíz de cada una de las plantas al inicio y final del proceso experimental
- Variación de peso, se registró al inicio y final del proceso experimental con la ayuda de una balanza analítica.

Tabla 9*Datos biométricos evaluados*

Cambios fenológicos	Unidad	Frecuencia de evaluación
Cambio de coloración	Descriptivo	Cada tres días
Número de hojas viables	Unidad	Cada tres días
Tamaño de raíz	cm	Al inicio y final del periodo experimental
Variación de peso	g	Al inicio y final del periodo experimental

2.8. Diseño estadístico del experimento

El presente estudio aplicó un Diseño Completamente al azar (DCA) en el que fue evaluado el efecto de diferentes biomásas de *Eichhornia crassipes* sobre la remoción de plomo presentes en los lixiviados del botadero municipal de la ciudad e Nueva Cajamarca. Los datos y/o resultados fueron agrupados como se muestra en la Tabla 9, mediante la estimación de los porcentajes de remoción o promedios diarios de los parámetros evaluados.

Tabla 10*Resultados de datos de muestreo*

Tiempo de muestro (días)	Biomásas de <i>Eichhornia crassipes</i> (kg)		
	0,5	1	1,5
5	X ₁	Y ₁	Z ₁
	X ₁	Y ₁	Z ₁
	X ₁	Y ₁	Z ₁
10	X ₂	Y ₂	Z ₂
	X ₂	Y ₂	Z ₂
	X ₂	Y ₂	Z ₂
15	X ₃	Y ₃	Z ₃
	X ₃	Y ₃	Z ₃
	X ₃	Y ₃	Z ₃

2.9. Análisis estadístico de datos

El análisis estadístico de los datos y/o resultados de las variables cuantitativas, fue realizada utilizando los siguientes modelos estadísticos. Para la verificación de la distribución y Homocedasticidad de varianza se utilizaron el test de Shapiro-Wilk y Levene, posterior a ello se utilizó el Análisis de varianza (ANOVA) mediante el test de Kruskal – Wallis o Chi – squared. Finalmente, para la comparación de grupos fue realizado a través de un análisis de comparaciones múltiples mediante el test de Wilcoxon o Tukey a un nivel de significancia de $p < 0,05\%$. Para la aplicación de las estadísticas se utilizó los programas R-Studio 8.0. y Excel versión 2016.

2.10. Materiales y reactivos

2.10.1. Material biológico

- Plantas de *Eichhornia crassipes*
- Volumen de Lixiviados 150 L

2.10.2. Material de laboratorio

- Pipeta
- Pizeta
- Probeta de 1 L
- Frascos de 500 ml de polietileno de alta densidad
- Cooler
- Vaso de precipitados de 50 y 500 mL
- Jarra medidora de 1 L

2.10.3. Reactivos o insumos de laboratorio

- Agua destilada
- Solución de Calibración de Conductividad 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hi7031 HANNA
- Solución de Calibración Hi7007 pH 7,01 HANNA

2.10.4. Equipos de laboratorio

- Balanza analítica
- Medidor multiparamétrico PH/CE/TDS/°C. HANNA HI 9811-5
- pHmetro HI98129 Modelo: HI98129 Marca: HANNA
- Regla

2.10.5. Materiales y herramientas

- Bandejas de 20 L
- Bidones de 50 L
- Cilindro de 150 L
- Escobas
- Manguera
- Palana
- Tubo de 2”
- Bolsas de polietileno de baja densidad

2.10.6. Equipos de protección personal

- Mascarillas descartables
- Guantes
- Botines de seguridad
- Gafas de seguridad

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Determinación de la variación de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca en el proceso de fitorremediación

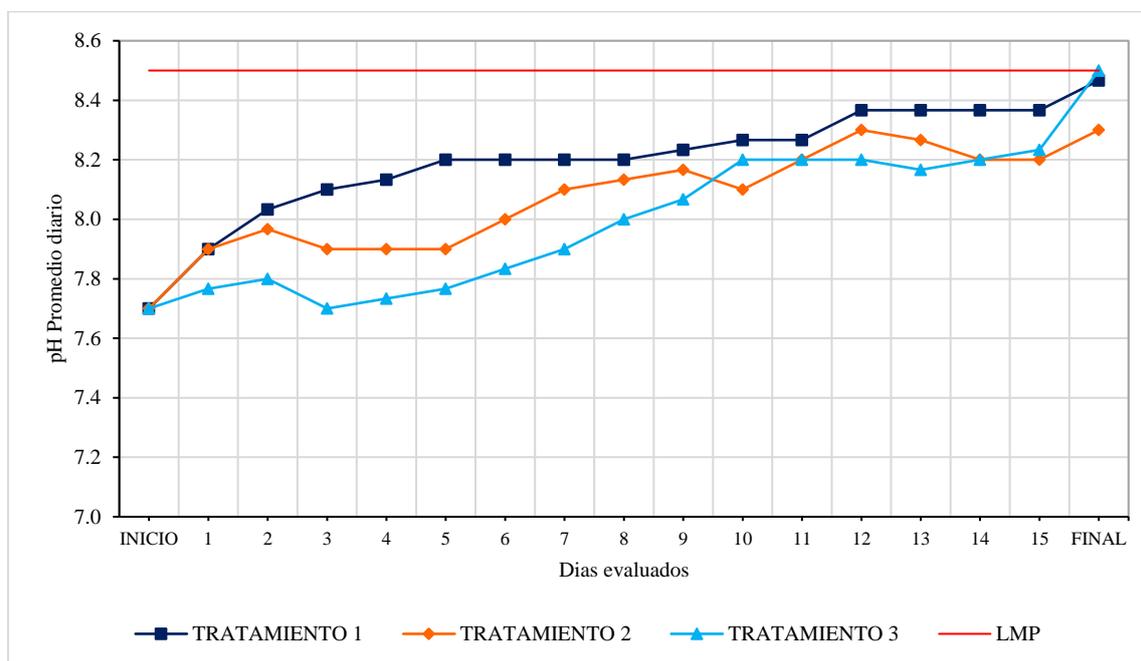
3.1.1. Potencial de hidrógeno (pH)

En la Figura 10 y Apéndice 1, se puede observar la variación promedio diario de los valores de pH de los lixiviados tratados, por tratamiento. El proceso experimental, inició con un valor del pH de 7,7 en los tres tratamientos. Todos los tratamientos presentaron una tendencia a aumentar la alcalinidad de los lixiviados, dicha variación tiende a ser más lenta a medida que la cantidad de biomasa de *Eichhornia crassipes* se incrementa, siendo más notable hasta el noveno día del proceso experimental.

Al final del proceso los valores promedios diarios fueron; el tratamiento uno con las réplicas T1 – A, T1 – B y T1– C y el tratamiento tres con las réplicas T3 – A, T3 – B y T3– C, alcanzaron un mismo valor de pH promedio diario de 8,5. Finalmente, el tratamiento dos con sus réplicas T2 – A, T2 – B y T2 – C, alcanzó un valor de pH promedio diario de 8,3, siendo el más bajo.

Figura 10

Variación diaria pH de los lixiviados



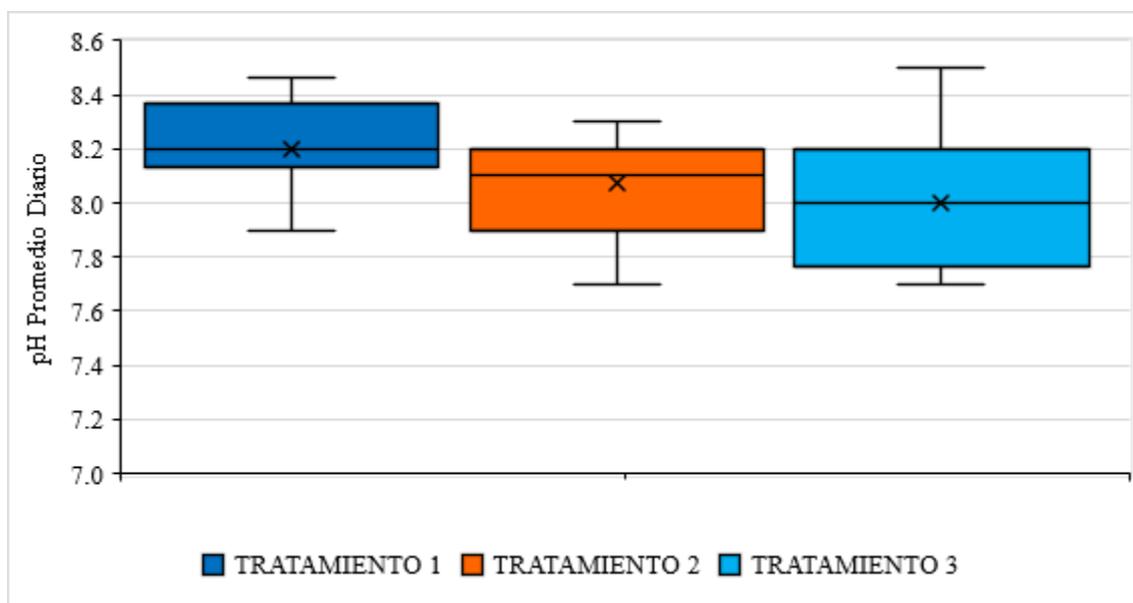
Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

Los valores iniciales y finales de pH de las unidades experimentales de los tres tratamientos, que son objeto de estudio de la presente investigación, se encontraron dentro del límite máximo permisible (LMP) para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N° 003- 2010 - MINAM, donde se establece un rango para el parámetro de pH de 6,5 a 8,5.

El valor pH promedio de cada uno de tres tratamientos aplicados son muy similares, sin embargo, como se aprecia en la Figura 11, los tratamientos uno (T1) y dos (T2) alcanzaron un valor promedio de pH 8.2 y 8.07 respectivamente, siendo estos mayores en comparación al tratamiento tres (T3) el cual alcanzo un valor promedio del pH de 8. Sin embargo, este último tratamiento presentó una mayor dispersión de los datos.

Figura 11

Comportamiento y promedio del valor de pH de los lixiviados tratados



Nota. Elaborado a partir del programa R-Studio 8.0.

Los resultados del análisis de normalidad realizada con la prueba de Shapiro – Wilk, como se muestra en el Apéndice 2, se obtuvo como resultado de la data obtenida para el parámetro de pH no se aproxima a una distribución normal ($p < 0,05$); además, respecto al análisis de homocedasticidad de varianza realizada a través de la prueba de Levenne, tal como se detalla en el Apéndice 3, según los resultados la varianza de pH es similar ($p > 0,05$) en cada uno de los tres tratamientos empleados.

Los resultados del análisis ANOVA realizada a través de la prueba de la suma de rango de Kruskal – Wallis, tal como se muestra en el Apéndice 4. Según los resultados las medias de pH son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$) en al menos uno de las tres cantidades de *Eichhornia crassipes* o tratamientos aplicados, para determinar dicha diferencia se empleó el método de comparaciones por pares utilizando la prueba de suma de rangos de Wilcoxon con corrección de continuidad, permitiendo establecer que existe diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre las medianas del pH del tratamiento uno (T1) frente al tratamiento dos (T2), así como las medianas del tratamiento uno (T1) frente al tratamiento tres (T3).

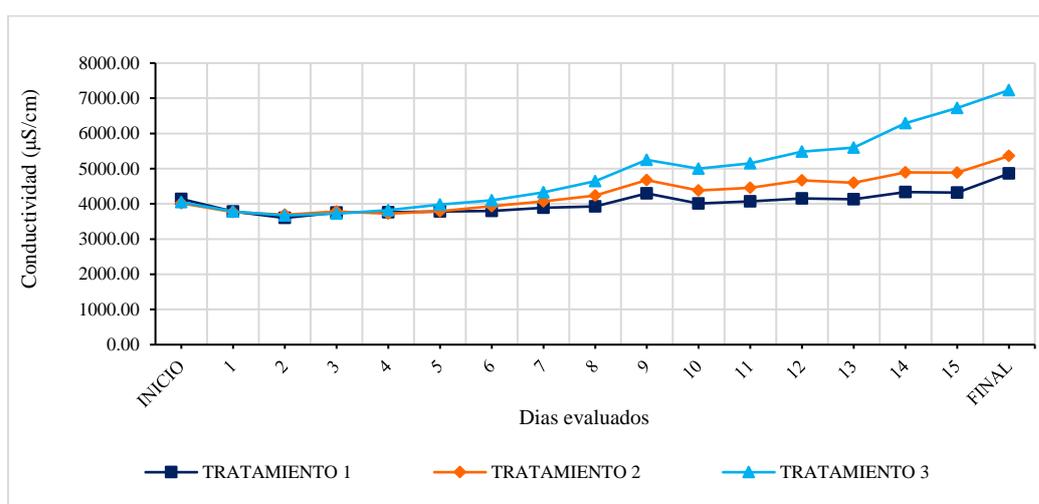
3.1.2. Conductividad eléctrica

En la Figura 12, así como en el Apéndice 5, se puede observar la variación promedio diaria de la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de los lixiviados tratados, por tratamiento. El proceso experimental inició con una conductividad promedio de 4 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 4 040 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 4 050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el tratamiento uno (T1), dos (T2) y tres (T3) respectivamente. Hasta el cuarto día del proceso experimental los valores promedios diarios de conductividad disminuyeron; sin embargo, a partir del quinto día se puede evidenciar, que a medida que se incrementó la cantidad de biomasa de *Eichhornia crassipes*, también aumenta el valor del parámetro de conductividad.

Al final del proceso experimental, el tratamiento tres (T3) en sus réplicas T3 – A, T3 – B y T3 – C, alcanzó un valor de conductividad promedio de 7 230 $\mu\text{S}/\text{cm}$; siendo el más elevado, en comparación con el tratamiento dos (T2) que alcanzó un valor de conductividad promedio, en sus réplicas T2 – A, T2 – B y T2 – C de 5 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido del tratamiento uno (T1), que alcanzó un valor de conductividad promedio, en sus réplicas T1 – A, T1 – B y T1 – C de 4 860 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 12

Variación promedio diaria de la conductividad, de los lixiviados tratados



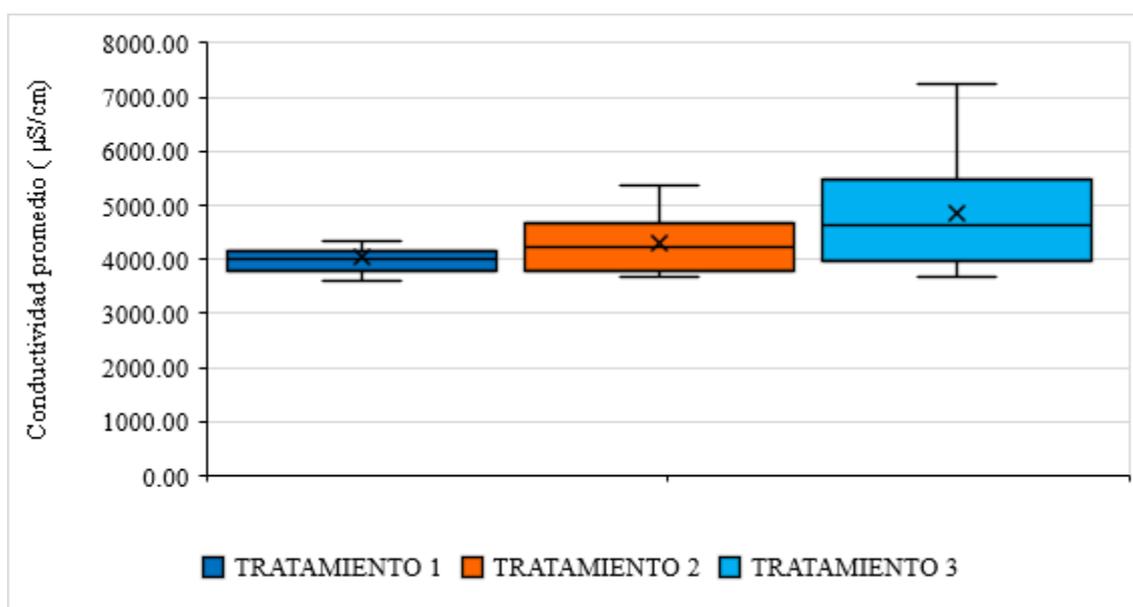
Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

El parámetro de conductividad eléctrica no es considerado dentro de los LMP para para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N° 003- 2010 – MINAM.

El valor de conductividad promedio de los tres tratamientos aplicados son similares; sin embargo, el tratamiento uno (T1) alcanzó un valor de conductividad promedio de 4 035,69 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo el menor en comparación con los tratamientos dos (T2) y tres (T3), como se puede observar en la Figura 12, además, es el tratamiento que presenta una menor dispersión de los datos ubicada entre los 3 900,00 y 4 100,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 13

Comportamiento y promedio de conductividad de los lixiviados tratados



Nota. Elaborado a partir del programa R-Studio 8.0.

Del análisis de normalidad realizada mediante la prueba de Shapiro – Wilk, ver Apéndice 6, según los resultados la data obtenida para el parámetro de conductividad no se aproxima a una distribución normal ($p < 0,05$). Además, respecto al análisis de homocedasticidad de varianza realizada a través de la prueba de Levenne, tal como se detalla en el Apéndice 7, según los resultados, las varianzas de conductividad son similares ($p > 0,05$) en los tres tratamientos empleados.

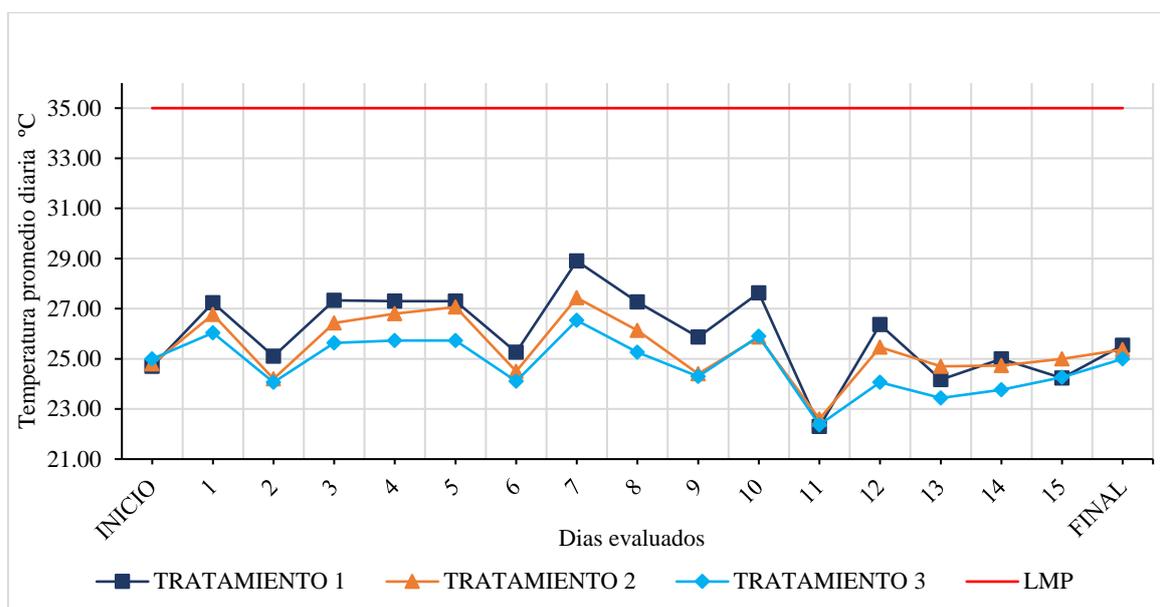
Los resultados del análisis ANOVA realizada a través de la prueba de la suma de rango de Kruskal – Wallis, (ver Apéndice 8), de los cuales se puede determinar que las medianas de conductividad de cada uno de los tres tratamientos empleados en la presente investigación son estadísticamente iguales ($p > 0,05$).

3.1.3. Temperatura

En la Figura 14 y el Apéndice 9, se puede observar la variación de la temperatura promedio diaria de los lixiviados tratados, por tratamiento. Durante el proceso experimental, la variación de la temperatura tuvo un comportamiento similar en cada uno de los tres tratamientos (T1, T2 y T3), evidenciándose que a medida que se incrementa la cantidad de biomasa de *Eichhornia crassipes*, la temperatura de los lixiviados tratados disminuye.

Figura 14

Variación promedio diaria de la temperatura (°C) de los lixiviados tratados



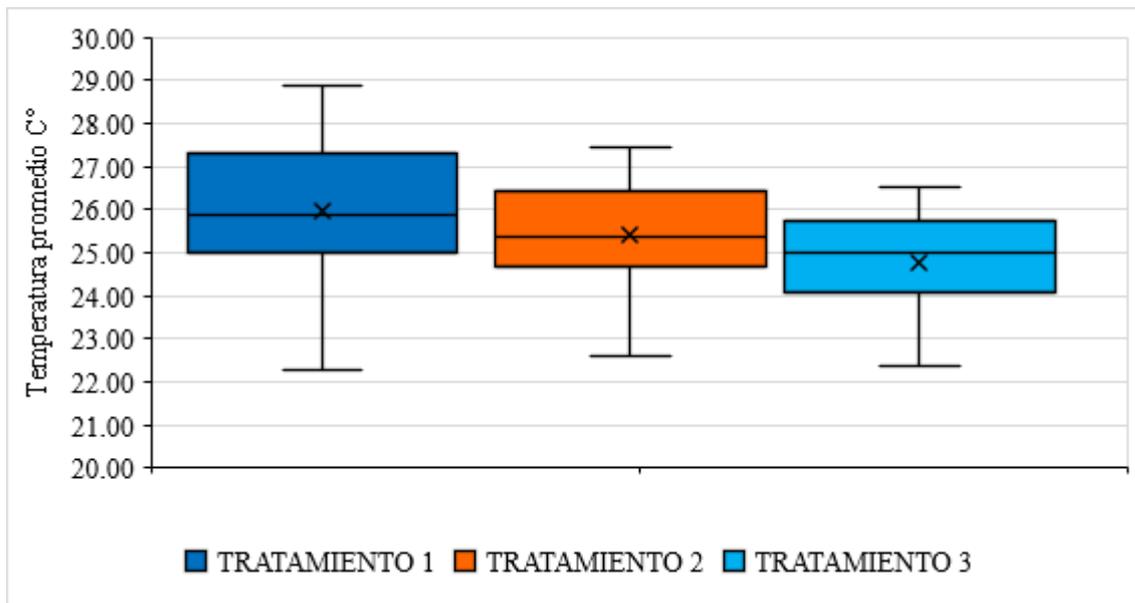
Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

Los valores de temperatura de cada una de las unidades experimentales de los tres tratamientos que son objeto de estudio de la presente investigación, se encontraron dentro del LMP para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N° 003- 2010 - MINAM, donde se establece que la temperatura del efluente debe de ser <35 °C.

La temperatura promedio es similar en los tres tratamientos empleados, sin embargo, como se aprecia en la Figura 15, la temperatura promedio del tratamiento uno es de 25,97 °C, siendo mayor en comparación con los tratamientos dos y tres, además, dicho tratamiento presenta una mayor dispersión de los valores.

Figura 15

Comportamiento y promedio de la temperatura de los lixiviados tratados



Nota. Elaborado del programa R-Studio 8.0.

Los resultados del análisis de normalidad realizado a través de la prueba de Shapiro – Will, ver Apéndice 10, se obtuvo que los valores promedio diarios para el parámetro de temperatura se aproximan a una distribución normal ($p > 0,05$). Según los resultados del análisis de homocedasticidad de varianza evaluado mediante de la prueba de prueba de Levenne, se determinó que las varianzas de medias son similares ($p > 0,05$), de los tres tratamientos empleados, tal como se detalla en el Apéndice 11.

Los resultados del análisis ANOVA, permitió establecer que la temperatura promedio diaria de los lixiviados tratados son estadísticamente diferentes, en al menos uno de los tres tratamientos, mediante el método de comparación múltiple de medias Tukey ($p < 0,05$), se

logró determinar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la temperatura promedio diaria del tratamiento uno (T1), frente al tratamiento tres (T3), ver el Apéndice 12.

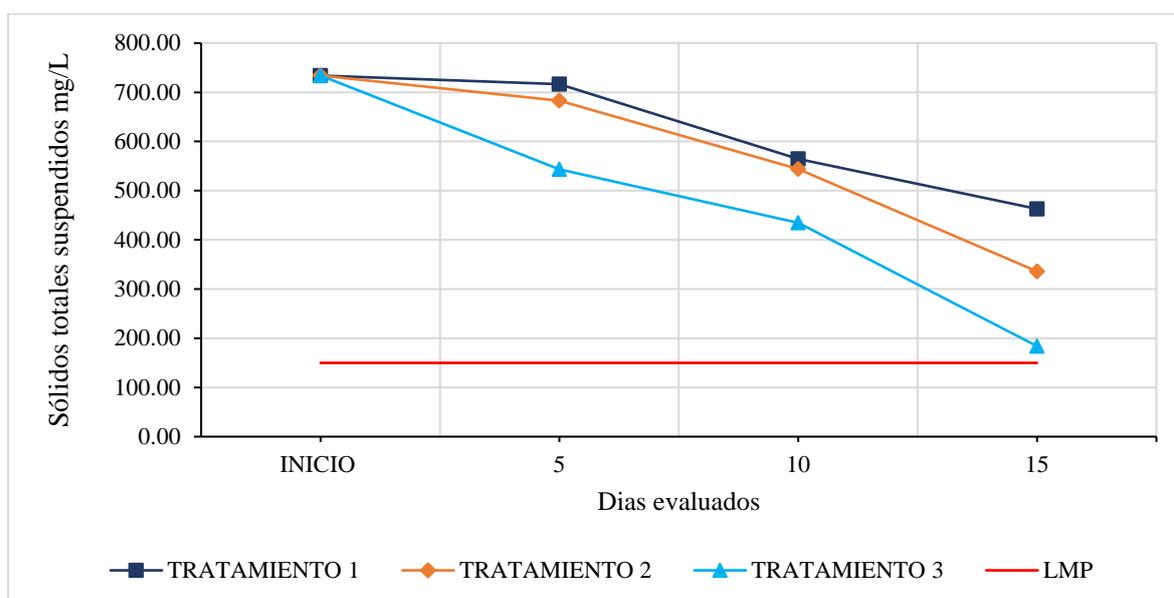
3.1.4. Sólidos totales suspendidos (SST)

En la Figura 16 se puede observar, las variaciones promedio de los sólidos totales suspendidos, por tratamiento. El proceso experimental inició con 734 mg/L (Apéndice 13), para cada uno de los tres tratamientos, evidenciándose que la disminución de los sólidos totales suspendidos tiende a ser más rápida a medida que se incrementa la cantidad de biomasa de *Eichhornia crassipes*.

El tratamiento tres (T3) alcanzó una remoción de 550 mg/L de sólidos totales suspendidos, en cada una de sus tres réplicas T3 – A, T3 – B y T3 – C, siendo la más elevada, en comparación con el tratamiento dos (T2), que alcanzó en cada una de sus réplicas T2 – A, T2 – B y T2 – C, una remoción de 398 mg/L, seguido del tratamiento uno (T1), en cada una de sus réplicas T1 – A, T1 – B y T1 – C alcanzó una remoción de 231 mg/L durante todo el proceso experimental.

Figura 16

Variación promedio de los sólidos totales suspendidos



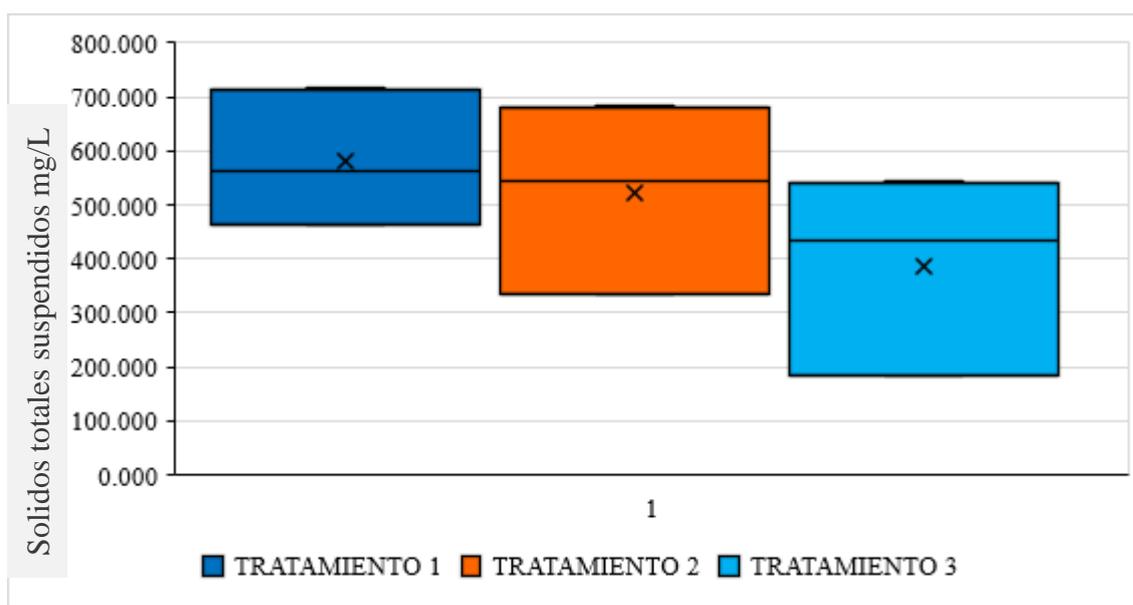
Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

Los valores iniciales y finales de los sólidos totales suspendidos de las unidades experimentales de los tres tratamientos, que son objeto de estudio de la presente investigación, superan los 150 mg/L que se establece como LMP para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N° 003- 2010 – MINAM.

El promedio de los sólidos totales suspendidos de cada uno de los tres tratamientos se aprecia en la Figura 17, el tratamiento tres (T3) presentó un valor promedio de 387,556 mg/L de sólidos totales suspendidos, siendo el más bajo en comparación con los tratamientos uno (T1) y dos (T2).

Figura 17

Comportamiento y promedio de solidos totales suspendidos



Nota. Elaborado a partir del programa R-Studio 8.0.

Los resultados del análisis la prueba de normalidad realizada a través de la prueba de Shapiro – Wilk se muestran en el Apéndice 15, donde los sólidos totales suspendidos no se aproximan a una distribución normal ($p < 0,05$), según los resultados el supuesto de homocedasticidad de varianza los sólidos totales suspendidos de los tratamientos uno (T1), dos (T2) y tres (T3) son similares ($p > 0,05$) ver Apéndice 16.

Los resultados del análisis ANOVA realizado a través del método de Kruskal – Wallis, determinó que la variación de las medianas de los sólidos totales suspendidos son estadísticamente diferentes, en al menos uno de los tres tratamientos ($p > 0,05$) (ver Apéndice 17), finalmente a través del análisis de comparaciones por pares utilizando la prueba de suma de rangos de Wilcoxon con corrección de continuidad, se determinó que existe una diferencia estadísticamente significativa del tratamiento uno (T1), frente al tratamiento dos (T2), además el tratamiento uno (T1) frente al tratamiento tres (T3), ver Apéndice 18.

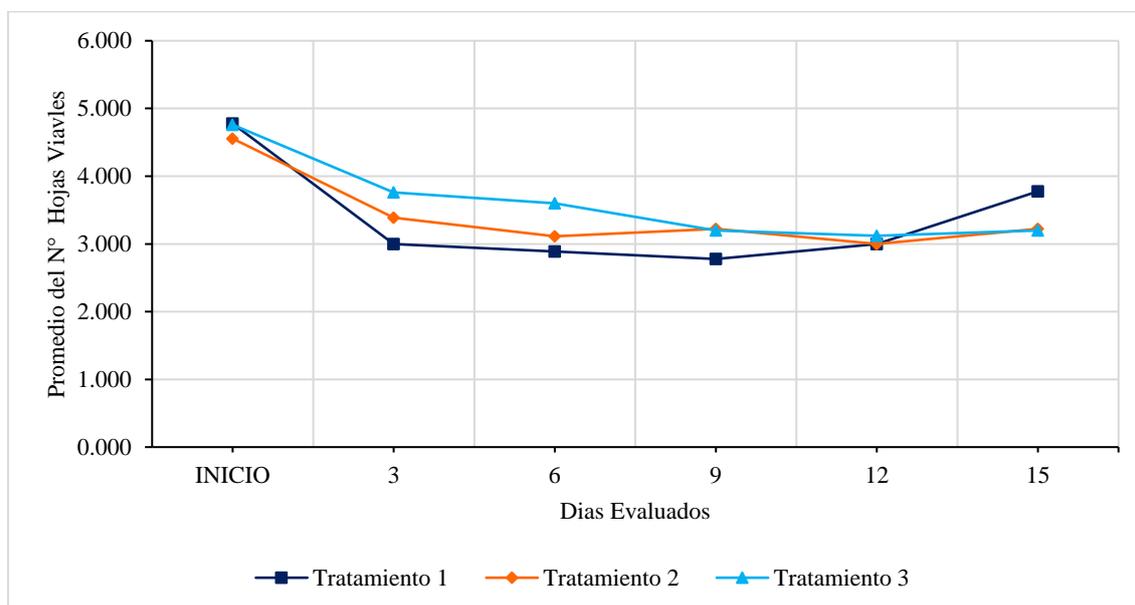
3.2. Características fenológicas del *Eichhornia crassipes* durante el periodo de experimentación

3.2.1. Numero de hojas viables

El número de hojas viables de cada una de las plantas de *Eichhornia crassipes* empleadas en el proceso experimental se encuentran y detalla en el Apéndice 19. En la Figura 18, se puede observar el promedio de hojas viables por tratamiento en cada uno de los tres tratamientos, evidenciándose que a medida que se incrementa la cantidad de biomasa de *Eichhornia crassipes*, el impacto en la pérdida de hojas viables se produce de manera más lenta, así como la recuperación de dichas hojas. Respecto al tratamiento control no se pudo evidenciar dichas características fenológicas; ya que este solo estuvo compuesto por 5 litros de lixiviados y ningún ejemplar, planta o gramos de biomasa de *Eichhornia crassipes*.

Figura 18

Variación promedio del número de hojas viables por tratamiento



Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

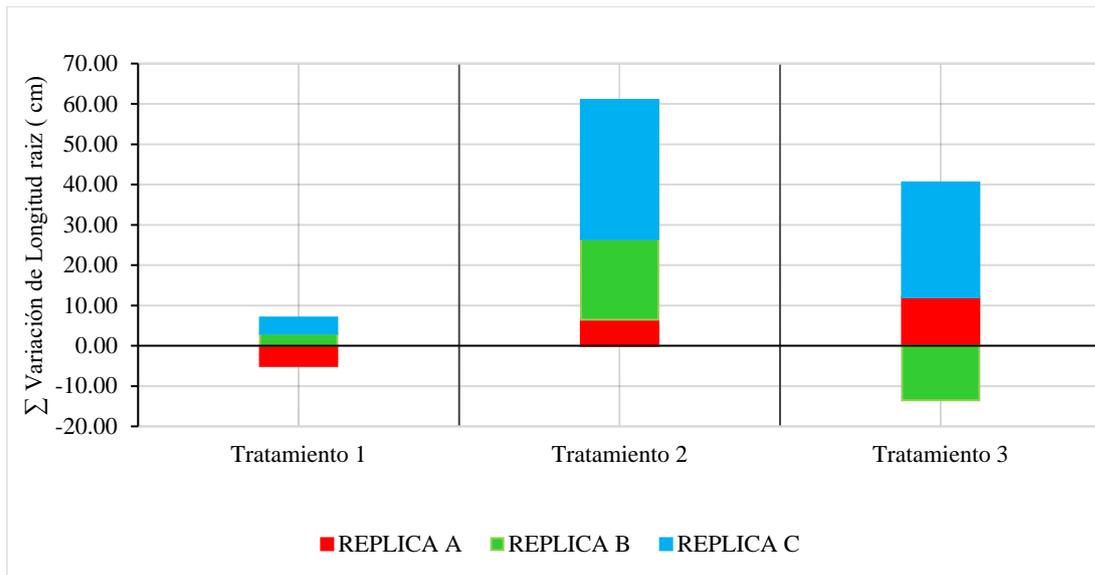
El tratamiento uno (T1), dos (T2) y tres (T3), inició el proceso experimental con un promedio de hojas viables de 4,77, 4,55 y 4,76 respectivamente, siendo el tratamiento uno (T1) el que presentó un mayor impacto con respecto a los tratamientos T2 y T3, hasta noveno día del proceso experimental donde las pantas de *Eichhornia crassipes* presentaron un promedio de 2,77 hojas viables, por planta. Respecto a los tratamientos dos (T2) y tres (T3), la pérdida de hojas viables se pudo evidenciar hasta el doceavo día del proceso experimental donde las plantas de *Eichhornia crassipes* tuvieron en promedio de 3 y 3,11 hojas viables por planta.

3.2.2. Variación de longitud de raíz

La longitud de raíz de cada una de las plantas de *Eichhornia crassipes*, empleadas en el proceso experimental se observan en el Apéndice 20. En la Figura 19, se puede observar la sumatorias de las longitudes de raíz por réplica de los tratamientos empleados, siendo el tratamiento dos (T2) el que presentó un mayor crecimiento de raíz en sus réplicas T2 – A, T2 – B y T2 – C; en cambio, las plantas de *Eichhornia crassipes* empleadas en las réplicas T1 – A y T3 – B de los tratamientos uno (T1) y tres (T3), tuvieron una pérdida de la longitud de su raíz.

Figura 19

Variación de la longitud de raíz por unidad experimental

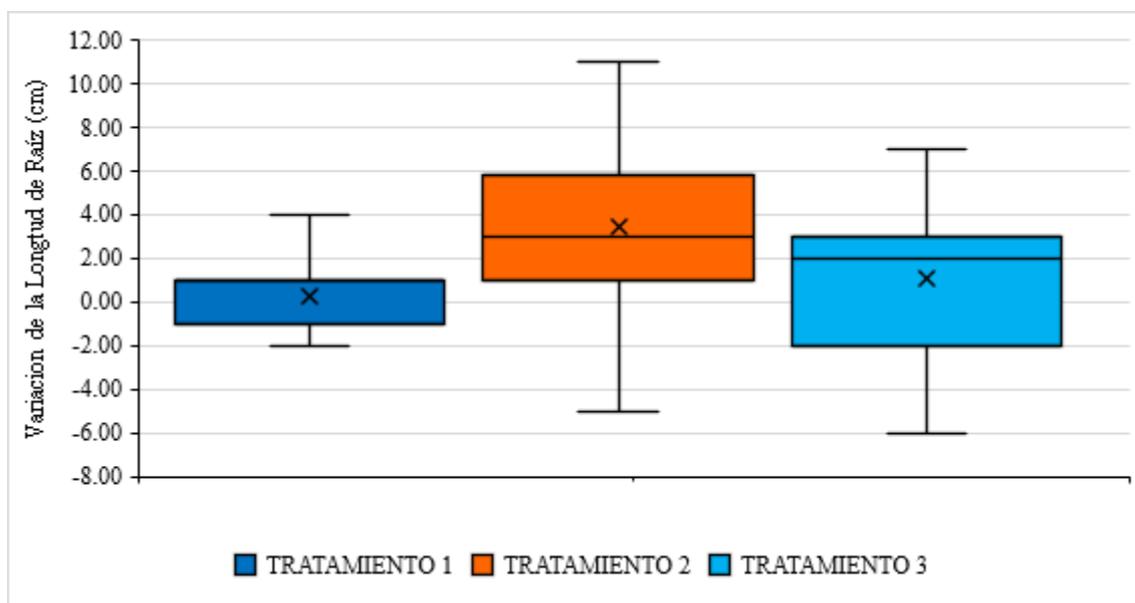


Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

El promedio de la variación de la longitud de la raíz de las plantas de *Eichhornia crassipes* empleados en cada uno de los tratamientos se muestran en la Figura 20, siendo el tratamiento uno (T1) el que presentó un crecimiento promedio de 0,22 cm de raíz por planta, seguido del tratamiento tres (T3) que presenta un promedio de crecimiento de 1,08 cm de raíz por planta, finalmente, el tratamiento dos (T2) es el que presenta el promedio de crecimiento más elevado en comparación con los otros dos tratamientos, siendo de 3,39 cm de raíz por planta, (Apéndice 21); además este tratamiento presenta mayor dispersión en los datos.

Figura 20

Comportamiento y promedio de la variación de longitud de raíz.



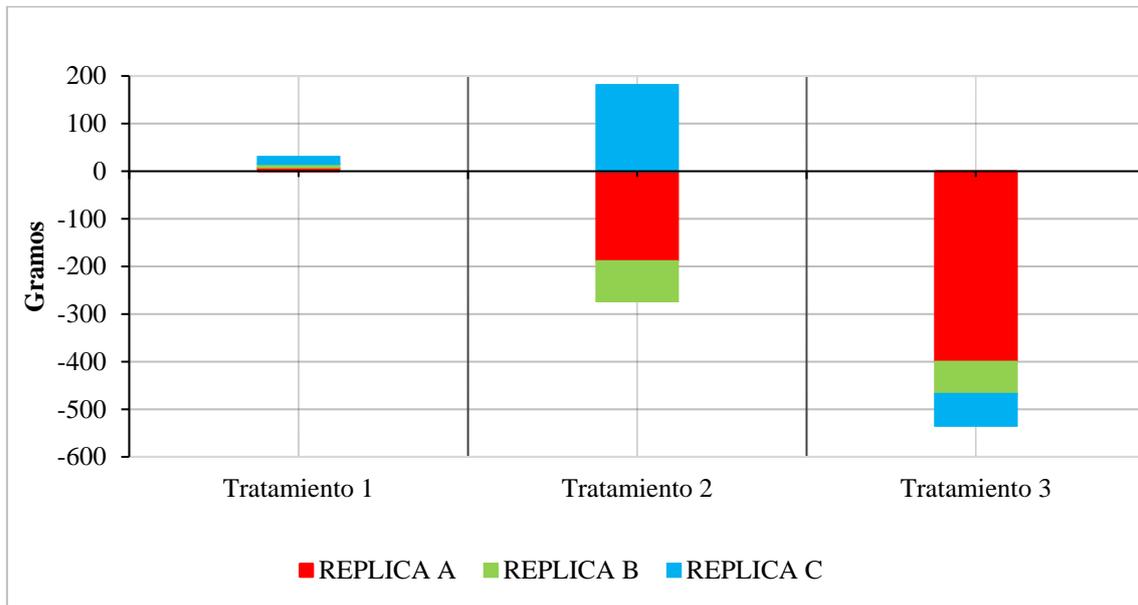
Nota. Elaborado a partir del programa R-Studio 8.0.

3.2.3. Variación de peso de las plantas *Eichhornia crassipes*

En la Figura 21 se puede observar la sumatoria de la variación del peso de las plantas de *Eichhornia crassipes*, de cada una de las réplicas, por tratamiento empleado. El tratamiento uno (T1), presenta un aumento en la biomasa de 8, 7 y 15 g respectivamente en sus réplicas T1 – A, T1 – B y T1 – C, el tratamiento dos (T2) en su réplica T2 – C presenta un aumento de 180 g de masa, sin embargo, en sus réplicas T2 – A y T2 – B presenta una pérdida de 189 y 84 g respectivamente, finalmente el tratamiento tres (T3) en sus réplicas T3 – A, T3 – B y T3 – C presentan pérdida de biomasa de 400, 68 y 67 g respectivamente, siendo el tratamiento que presenta mayor pérdida de biomasa en comparación con el tratamiento uno (T1) y dos (T2).

Figura 21

Variación de peso por unidad experimental

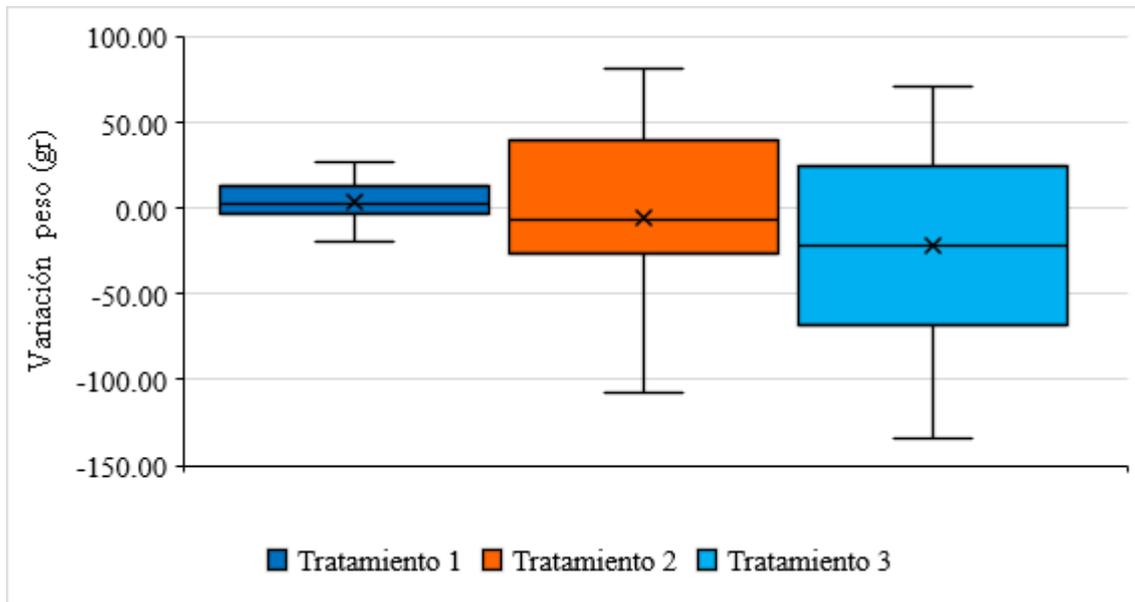


Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

El promedio de la variación del peso de la biomasa de las plantas de *Eichhornia crassipes* empleada en los tres tratamientos, se muestran en la Figura 22, donde el tratamiento uno (T1), presenta un promedio de aumento de biomasa de 3,33 g por planta; sin embargo, en el tratamiento dos (T2) y tres (T3) presentan una pérdida promedio de biomasa de 5,11 y 21,44 g por cada planta empleada; así mismo, el tratamiento tres (T3) presenta una mayor dispersión de los datos.

Figura 22

Comportamiento y promedio de la variación de biomasa



Nota. Elaborado a partir del programa R-Studio 8.0.

3.2.4. Cambios fenológicos de hojas de *Eichhornia Crassipes*

En el presente estudio también se evaluaron los cambios fenológicos que sufrieron las plantas de *Eichhornia crassipes* durante el proceso de investigación, los mismos que se midieron y observaron en cada una de las unidades experimentales cada tres días después de iniciado el proceso experimental, tal como se detallan en las Tablas 11, 12 y 13 descritas a continuación:

Tabla 11

*Cambios fenológicos del *Eichhornia crassipes* del tratamiento uno (T1)*

Días evaluados	Cambios Fenológicos de las plantas de <i>Eichhornia crassipes</i>	Figura
Inicio	Las plantas de <i>Eichhornia crassipes</i> presentaron una coloración verde oscuro de sus hojas, siendo uniformes en las réplicas T1 - A, T1 - B y T1 - C, del tratamiento uno.	

Los tres primeros días se observó marchites de las plantas *Eichhornia crassipes*, evidenciándose con el encogimiento del borde de las hojas hacia la cara adaxial, disminuyendo drásticamente el área foliar.

3

Se observó que las hojas de la base de las plantas fueron las primeras y más afectadas variando su color, de verde oscuro a amarillo e incluso en algunos casos secándose con un color verde claro en las tres réplicas.



Se observó el crecimiento de nuevas hojas, así como la aparición de brotes y la floración de algunas plantas.

6

Sin embargo, las hojas afectadas de la base de las plantas seguían aumentando, presentando manchas secas en forma circular o de nervadura, que iniciaban generalmente desde el borde o el ápice de las hojas, en las tres réplicas



La pérdida de hojas viables por cambio de coloración y lesiones con manchas de color marrón en forma circular o de nervadura en los bordes y ápices, se desarrollaban de manera más lenta, en las tres réplicas.

9

Sin embargo, las hojas de los brotes no presentaban signos de amarillamiento o lesiones.



Se observó un crecimiento rápido de los brotes, permitiendo a las plantas de *Eichhornia crassipes* recuperar su área foliar, además la mayoría de las plantas presentaban de uno a dos brotes.

12

La pérdida de hojas por amarillamiento y lesiones en forma circular o de nervadura disminuyó, permitiendo a las plantas una recuperación de su coloración verde oscuro del área foliar.



15

Finalmente se observó el crecimiento de nuevas hojas tanto en las plantas madre como de brotes.

La pérdida de hojas por cambio de coloración de verde a amarillo y lesiones de color marrón en forma circular o de nervadura, empezó desde las hojas de la base de la planta, hacia las hojas nuevas.



Tabla 12

Cambios fenológicos del Eichhornia crassipes del tratamiento dos (T2)

Días evaluados	Cambios Fenológicos de las plantas de <i>Eichhornia crassipes</i>	Imagen
Inicio	Las plantas de <i>Eichhornia crassipes</i> presentaron una coloración verde oscuro de las hojas, siendo uniforme en las tres réplicas T2 - A, T2 - B y T2 - C del tratamiento dos.	
3	<p>Los dos primeros días se observó un estado de marchites de las plantas <i>Eichhornia crassipes</i>, evidenciándose con el encogimiento del contorno las hojas hacia la cara adaxial, que provocó la disminución del área foliar.</p> <p>Se observó la floración de algunas plantas; así mismo, las hojas de la base de las plantas fueron las primeras en presentar una variación de su color, de verde oscuro a amarillo claro.</p>	

Se observó el crecimiento de nuevas hojas, así como, la aparición de brotes y floración de algunas plantas.

- 6 En las tres réplicas, se observó la pérdida de hojas en la base de las plantas, las cuales presentaban amarillamiento y manchas de coloración marrón en forma circular o de nervadura, que iniciaba generalmente en el borde o ápice de la hoja.



- 9 Se observó el crecimiento de nuevas hojas, dándole a las plantas de *Eichhornia crassipes* un color verde oscuro; sin embargo, las hojas con manchas circulares o en forma de nervadura de color marrón continuó aumentado. El crecimiento de los brotes era lento, en comparación con el tratamiento uno.



- 12 Cada planta presentó de uno a dos brotes, respecto al cambio de coloración de las hojas, se producía de manera más lenta permitiendo a las plantas de *Eichhornia Crassipes* mantener el área foliar con una coloración verdosa en las tres réplicas.



- 15 Finalmente se observó un aumento del crecimiento de nuevas hojas de las plantas madre, los brotes tuvieron un desarrollo menor en comparación con los del tratamiento uno.

Las hojas de la base de la planta fueron las más afectadas en las tres réplicas, por el cambio de coloración y lesiones de color marrón que iniciaban desde el contorno o ápice de la hoja.



Tabla 13

Cambios fenológicos del Eichhornia crassipes del tratamiento tres (T3)

Días evaluado	Cambios Fenológicos de las plantas de <i>Eichhornia crassipes</i>	Imagen
Inicio	Las plantas de <i>Eichhornia crassipes</i> presentaron una coloración de hojas verde oscuro, siendo uniformes en las tres réplicas T3 – A, T3 – B y T3 – C, del tratamiento tres.	
3	Solo el primer día se observó marchites de las plantas <i>Eichhornia crassipes</i> , evidenciándose con el encogimiento del contorno las hojas hacia la cara adaxial. Se observó la floración de algunas plantas, así mismo, las primeras hojas de la base de las plantas fueron las primeras en presentar variación de su color de verde oscuro a amarillo claro, las tres réplicas.	
6	Se observó el crecimiento de nuevas hojas, así como, la aparición de brotes y floración de algunas plantas. En las tres réplicas se observó la continuidad en pérdida de hojas en la base de las plantas, evidenciándose por el cambio de coloración y lesiones de color marrón en forma circular o de nervadura.	
9	Se observó el crecimiento de nuevas hojas, así como el aumento de hojas que presentaban una variación de color a amarillo claro, con lesiones de color marrón en forma circular o de nervadura que iniciaba generalmente en el borde o el ápice de la hoja. Se observó un crecimiento lento de brotes.	

12

Se observó que las plantas de *Eichhornia crassipes* presentaban un estado leve de marchites por el encogimiento del contorno de las hojas en las tres réplicas. Así como, la floración de algunas plantas y el lento crecimiento de brotes en comparación con los tratamientos uno y dos.



15

Finalmente se observó un lento crecimiento principalmente de nuevas hojas en los brotes. El estado de marchites se mantuvo; sin embargo, se observó el crecimiento de nuevas hojas que mostraban una recuperación del área foliar.



3.3. Porcentajes de plomo removido de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca sembrados con *Eichhornia crassipes*

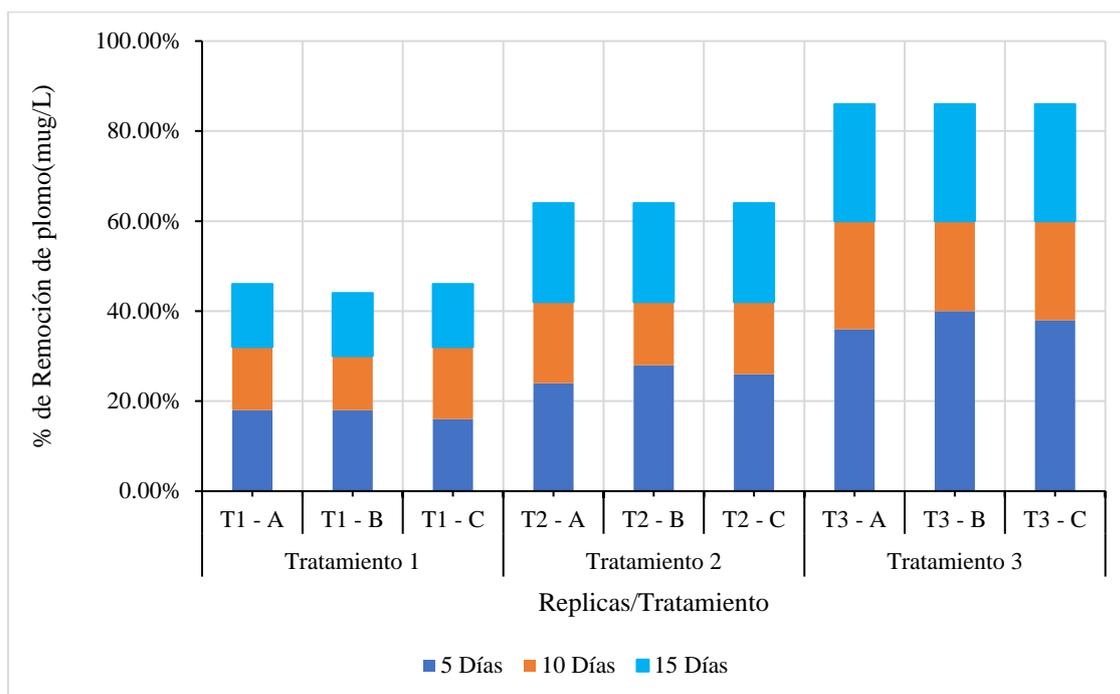
Los resultados de los análisis del laboratorio obtenidos sobre la remoción de plomo (mg/L) evaluados durante el proceso experimental se muestran y detallan en el Apéndice 14. En la Figura 23, se puede observar el porcentaje de remoción de plomo en los tres periodos evaluados durante el proceso experimental. La concentración inicial fue de 0,05 mg/L en todas las unidades experimentales, evidenciándose que a medida que se incrementa la biomasa de *Eichhornia crassipes*, la disminución de la concentración de plomo se realizó de manera más acelerada, tal como lo muestran los resultados de laboratorio obtenidos producto de los 3 muestreos realizados, los cuales se encuentran detallados en el Apéndice 14.

Los resultados de los porcentajes de remoción de plomo en el tratamiento tres (T3), en cada una de sus réplicas T3 - A, T3 - B y T3 - C alcanzaron un mismo porcentaje de remoción del 86 %, equivalente a 0,043 mg/L de plomo removido, seguido del tratamiento dos (T2) que alcanzó un porcentaje de remoción de 64 % en cada uno de las réplicas T2 - A, T2 - B y T2 - C, equivalente a 0,032 mg/L de plomo removido, el tratamiento uno (T1) en sus réplica T1

– B, alcanzó un porcentaje de remoción del 44 %, equivalente a 0,022 mg/L, mientras que en su replicas T1 - A y T1 - C alcanzaron un porcentaje de remoción del 46 % equivalente a 0,024 mg/L de remoción de plomo.

Figura 23

Porcentajes de remoción de plomo por unidad experimental (mg/L)



Nota. Elaborado a partir del programa Microsoft Excel.

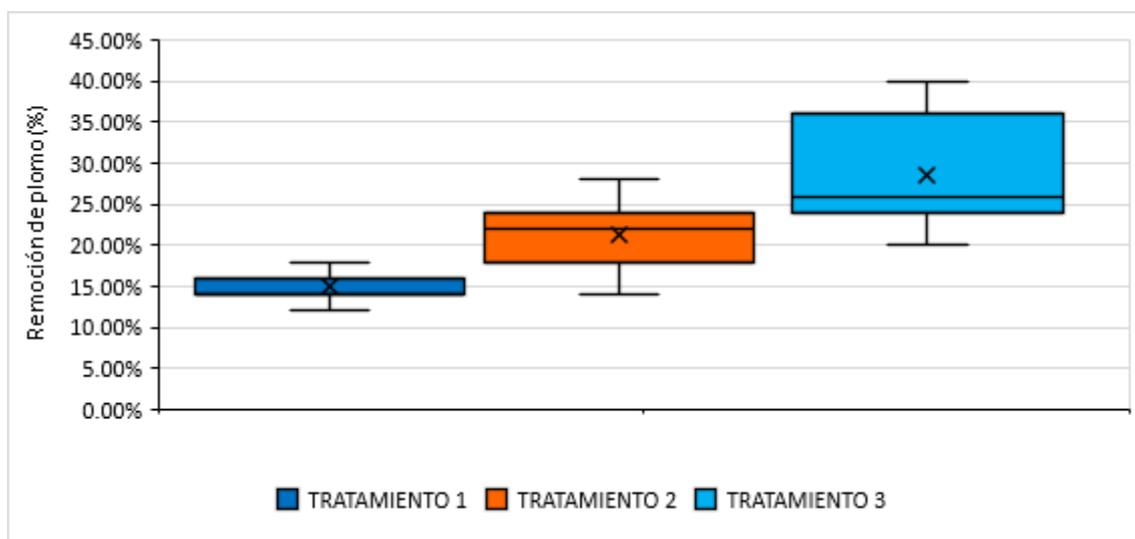
La concentración de plomo no es considerada dentro de los LMP para para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, aprobados mediante Decreto Supremo N° 003- 2010 – MINAM. Sin embargo, dentro de los LMP para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas aprobadas mediante Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM, la cual establece como límite 0,2 mg/L de plomo, dicha concentración no es superada al inicio o final del proceso experimental.

Los porcentajes de remoción de plomo no se mantienen constantes durante el proceso experimental, siendo el primer periodo evaluado (5 días) donde las plantas de *Eichhornia crassipes* alcanzaron el mayor porcentaje de remoción de plomo, en los tres tratamientos evaluados, en comparación con el segundo y tercer periodo evaluado (10 y 15 días).

Los porcentajes promedio de remoción de plomo en el tratamiento tres (T3) fue de 28,67 %, siendo el más elevado en comparación con los tratamientos dos (T2) y uno (T1) que alcanzaron un porcentaje promedio de 21,33 y 15,11 % respectivamente. Así mismo, en el tratamiento tres (T3) se observa una mayor dispersión de los datos, como se muestra en la Figura 24.

Figura 24

Comportamiento del porcentaje de remoción de plomo por tratamiento



Nota. Elaborado a partir del programa R-Studio 8.0.

Los resultados del análisis de normalidad realizado a través de la prueba de Shapiro – Wilk, ver el Apéndice 22, muestran como resultado que los porcentajes de remoción de plomo no se aproxima a una distribución normal ($p < 0,05$); así mismo, respecto al análisis de homocedasticidad realizado a través de la prueba de Levenne, como se muestra en el Apéndice 23, indican que los resultados del porcentaje de remoción de plomo es similar ($p > 0,05$), en cada uno de los tres tratamientos objeto de estudio de la presente investigación.

Los resultados del análisis ANOVA realizados mediante la prueba de la suma de rango de Kruskal – Wallis, que se muestran y detallan en el Apéndice 24, establece que las medianas de los porcentajes de remoción de plomo son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$) en al menos uno de los tres tratamientos empleados, para determinar dicha diferencia se realizó a través del método de comparaciones por pares utilizando la prueba de suma de rangos de

Wilcoxon con corrección de continuidad (Apéndice 25), pudiendo determinar que existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), entre las medianas del tratamiento uno (T1) frente al tratamiento dos (T2), así como el tratamiento uno (T1) frente al tratamiento tres (T3).

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la variación de los parámetros fisicoquímicos de los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca en el proceso de fitorremediación

Los resultados obtenidos en la presente investigación indicaron un incremento respecto al parámetros de pH (7,7 a $\bar{X}_f=8,42$) en los lixiviados tratados del botadero municipal de Nueva Cajamarca, estos resultados difieren de los obtenidos por Fernández (2014), al tratar lixiviados de un relleno sanitario con *Eichhornia crassipes* obtuvo un cambio en el valor para pH de 7,3 a 7,6. Estas diferencias pueden estar relacionadas con los periodos de retención en los cuales los lixiviados tratados están en contacto con las plantas de *Eichhornia crassipes*, difiriendo en un total de 13 días entre ambos estudios de investigación. De acuerdo con Rivera *et al.* (2013) y Mendoza y López (2004), los lixiviados caracterizados por los parámetros de conductividad $\bar{X}_f=4\ 080\ \mu\text{S}/\text{cm}$, sólidos totales suspendidos 734 mg/L y pH de 7,7 están dentro de los márgenes que caracterizan a un lixiviado joven producido en una fase de madurez IV, esto debido a dicho autores afirman que un lixiviado joven presenta valores de pH se encuentran entre 6.8 - 8, los sólidos totales en suspensión varían entre 247 - 981 mg/L y la conductividad puede variar entre 27,1 - 35,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a más.

De acuerdo Kim *et al.* (2015), el pH es uno de los principales factores que afecta la solubilidad y la biodisponibilidad de los metales catiónicos como el plomo Pb^{+2} durante un proceso de fitorremediación. La mayoría de los metales son disponibles para las plantas en pH ligeramente ácido y ácido; así mismo, Daud *et al.* (2018) señalan que, la absorción del plomo está ligado a la concentración de este, llegando a almacenarse en los tejidos de las raíces, en los brotes y en las hojas, por lo que es común ver muerte foliar de las plantas, a pesar de ello, este tipo de especies tienen el potencial de sobrevivir en un amplio rango de pH. Por otro lado, en un medio relativamente alcalino pH 7,7 – 8,9 como el que se logró determinar en la presente investigación, el plomo Pb^{+2} se une a diferentes compuestos, volviéndolo menos soluble.

En la presente investigación el rango de variación mínimo y máximo de la temperatura alcanzado durante todo el proceso experimental fue de 22,3 y 29,2 °C, estando dentro de lo establecido por Delgadillo *et al.* (2010), el cual indica que para establecer un medio de vida óptimo donde los procesos biológicos como la digestión aerobia y la nitrificación realizadas por los microorganismos como las bacterias, la temperatura debe fluctuar entre 25 – 35 °C.

4.2 Evaluación de las características fenológicas del Jacinto de agua durante el periodo de experimentación

En la presente investigación se observó marchitez y quemado de las hojas de las plantas de *Eichhornia crassipes* en los dos primeros días del proceso experimental; además, presentaron encogimiento del borde de las hojas hacia la cara adaxial, para posteriormente presentar problemas de clorosis, determinándose a partir del cambio de coloración de hojas, variando de un color verde oscuro a amarillo, iniciando desde el ápice de la hoja, avanzando hacia la parte central hasta el medio de la nervadura primaria (Irhamni1 *et al.*, 2023).

Los resultados en los cambios fenológicos de las plantas de *Eichhornia Crassipes* en el proceso experimental coinciden con las descritas por Ilyas *et al.*, (2023) y Pourrut *et al.* (2011), donde afirman que los principales efectos tóxicos del plomo cuando ingresa a los tejidos vegetales es la alteración de la homeostasis de la planta, inhibición de la biosíntesis de clorofila, evidenciándose la inmediata marchitez de hojas de las plantas. Estos efectos dependen de la cantidad de plomo de los lixiviados; dado que, varían mucho entre un relleno y otro y las características de la macrófita para adaptarse a diferentes sustratos.

Finalmente se observó lesiones de necrosis, pero no muerte de plantas. Las hojas presentaron manchas circulares o en forma de nervaduras color marrón y negro. Estas características fenológicas de las hojas se pueden atribuir estrictamente al plomo y a otros contaminantes presentes en los lixiviados utilizados en el experimento; esto lo confirman Monroy-Licht *et al.*, (2024) y Andrade *et al.* (2020), el crecimiento de las hojas actúa como bioindicadores de la toxicidad de los metales a los cuales se encuentran expuesta una planta, la cual repercute directamente en la pérdida de biomasa y en un cambio de coloración de las hojas. Otros autores como Soltan y Rashed (2003) han comprobado a nivel de laboratorio que

Eichhornia Crassipes puede vivir en lixiviados que presenten hasta 3 mg de plomo por litro de lixiviado, mientras más alta la concentración más rápida decoloración de las plantas.

4.3 Determinación de los porcentajes de plomo removido de cada una de las biomásas de “Jacinto de agua” *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms aplicadas a los lixiviados del botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca

Los resultados obtenidos con respecto al porcentaje máximo de remoción de plomo realizado por la especie durante todo el proceso experimental fueron: el tratamiento T3 fue de 86 %, el tratamiento T2 fue de 64 % y el tratamiento T1 fue de 44 %. Estos resultados están por debajo de los obtenidos por Miguel *et al.* (2020), en la que determinaron que *Eichhornia crassipes* logró remover 91,84 % del plomo durante un periodo de 15 días. Qiang *et al.* (2016) registraron porcentajes de remoción de plomo para la misma especie hasta en un 97 %, estos autores refieren que los altos porcentajes de remoción están relacionados con la concentración del plomo en los lixiviados, es decir, una mejor remoción se da cuando el plomo se encuentra en valores de 10 mg/L, dicha concentración es mayor a los 0.05 mg/L encontrado en los lixiviados tratados. Además, Porcentajes altos de remoción también están relacionados con la cantidad de raíces de las plantas y un adecuado manejo de las etapas de adsorción y absorción durante el proceso de fitoremediación.

Aguilar (2019) determinó que los sistemas naturales de flujo discontinuos o por lotes, es un método viable para estudios de investigación donde se esté buscando determinar el potencial fitorremediador de una especie vegetal, respecto a la remoción de metales pesados, así como los efectos fenológicos o de toxicidad.

Durante el proceso experimental de la presente investigación, ninguna planta de *Eichhornia crassipes* utilizadas murió, evidenciando la fuerte resistencia y rápida adaptabilidad de dicha planta a cuerpos de agua con un alto grado de contaminación, como lo refieren Guevara y Ramírez (2015). Esto elimina la necesidad de diluir los lixiviados del botadero de la ciudad Nueva Cajamarca con la finalidad de que estos puedan ser tratados con sistemas naturales con un flujo discontinuo donde se emplee *Eichhornia crassipes* como especie fitorremediadora.

El clima, es un factor que tiene bastante influencia en la composición de los lixiviados ya que puede hacer variar los porcentajes de plomo; debido que, las lluvias pueden incrementar el radio de contaminación de suelos, aguas superficiales y subterráneas por efecto de escorrentía superficial. De acuerdo con López (2017) el factor climático, determina las características y composición de los lixiviados. Según el (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – [SENAMHI], 2020), la región San Martín alcanza una precipitación media anual de 1 410,72 milímetros; por lo que, los botaderos municipales a cielo abierto, generan un grave peligro para los ecosistemas que se encuentran adyacentes a los mismos.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

- La cantidad óptima para la remoción de plomo en lixiviados en la presente investigación fue el Tratamiento tres (T3), llegando a remover 86 % (0,043 mg/L) del plomo presente durante todo el periodo de evaluación.
- Durante el proceso de fitorremediación se determinó el promedio de variación de los parámetros pH, conductividad eléctrica, temperatura y sólidos totales disueltos en los lixiviados del botadero municipal. El promedio de variación de pH fue de $\bar{X}_i = 7,7$ a $\bar{X}_f = 8,42$, conductividad eléctrica $\bar{X}_i = 4\ 070\ \mu\text{S}/\text{cm}$ a $\bar{X}_f = 5\ 816,6\ \mu\text{S}/\text{cm}$, temperatura $\bar{X}_i = 24,8\ ^\circ\text{C}$ a $\bar{X}_f = 25,3\ ^\circ\text{C}$ y sólidos totales disueltos $\bar{X}_i = 734\ \text{mg}/\text{L}$ a $\bar{X}_f = 393\ \text{mg}/\text{L}$.
- Existe variación en el número de hojas viables, color de hojas, el tamaño de la raíz y la biomasa de las plantas durante y después del periodo experimental; las cuales indican que, la especie *Eichhornia crassipes* es una macrófita muy resistente a lixiviados con alto porcentaje de plomo; así mismo posee una gran capacidad depuradora del mismo.
- Los porcentajes de remoción de plomo obtenidos en la presente investigación fueron de: 46 % para el tratamiento T1 (1,5 kg de biomasa), 64 % para el tratamiento T2 (3 kg de biomasa) y 86 % para el tratamiento T3 (4,5 kg de biomasa), es decir a mayor cantidad de biomasa mayor remoción de plomo.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar investigaciones para conocer los mecanismos de absorción y acumulación de los metales pesados en los tejidos de la especie *Eichhornia Crassipes* con la finalidad de establecer métodos de disposición final que aseguren que los metales pesados removidos vuelvan a ser diseminados y puedan contaminar algún recurso natural.
- Se recomienda realizar una investigación con un diseño experimental in situ a mayor escala, con un mayor volumen de muestra y por un periodo de tiempo más prolongado.
- Se recomienda utilizar recipientes con una capacidad mayor, así como trabajar con mayor volumen de muestra de lixiviados, con la finalidad de mantener el volumen de muestra post obtención del volumen de muestreo para los análisis de laboratorio.
- A la academia realizar investigaciones donde se busque determinar la capacidad fitorremediadora de *Eichhornia Crassipes* referente a parámetros que no fueron evaluados o medidos en la presente investigación, así como otros metales pesados, diferentes del plomo Pb^{+2} que se encuentren presentes en los lixiviados.
- Realizar investigaciones sobre contaminación de suelos por lixiviados adyacentes al botadero municipal del distrito de Nueva Cajamarca, puesto que se ha observado la instalación de parcelas agrícolas cuyos productos son cultivados y consumidos sin tener en cuenta el radio de acción de contaminación de los lixiviados.

REFERENCIAS

- Aguilar, H. (2019). *Remoción de Cd, Cr Zn y Pb Mediante Sistema BATCH con Presencia Cajanus cajan (L.) Huth (Frijol de palo) a Nivel de Laboratorio*. [Tesis de Pregrado, Universidad Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1628>
- Albano, E. (2012). *Reproducción sexual del jacinto de agua (Eichhornia crassipes): germinación, anatomía y banco de semillas*. [Tesis de doctorado, Universidad de Extremadura]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=180803>
- Andrade, K., Castillo, I. y Roger, R. (2020). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas y suelos para cultivo de *Solanum tuberosum* de la bahía interior de puno. *Investigación & Desarrollo*, 20(1), 147-153. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2518-44312020000100011&script=sci_arttext
- Ávila, L., Nieto, S., Jiménez, C., y Osorio, C. (14-16 de septiembre de 2011). Análisis del impacto generado en un sistema de gestión integral de residuos sólidos por el aumento de los residuos asociados al crecimiento de la población a través de Dinámica de Sistemas. [Simposio]. 9° Encuentro colombiano de dinámica de sistemas, Bogotá, Colombia.
- Barrenechea, A. (2004). Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. (eds.). Tratamiento de agua para consumo humano plantas de filtración rápida. pp. 1-54. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4014/uno.pdf)
- Bornaz, G. y Bornaz, S. (2019). Xenobióticos. *Ciencia & Desarrollo*, (6), 27-33. <https://doi.org/10.33326/26176033.1999.6.108>
- Cabildo, M., Escolástico, C. y Esteban, S. (2008). *Reciclado y tratamiento de residuos*. España, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Carreño, U. (2020). "Buchón de agua" *Eichhornia Crassipes*: Impulsor de la fitorremediación. Fundación Universitaria los Libertadores. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1vbd1mc>

- Castillo, G. (1990). El uso del lirio acuático *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales. *Tecnología en Marcha*, 10(3), 23-28. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5678790>
- Cirujano, S., Meco, A., García, P. y Chirino, M. (2014). Flora acuática española. Hidrófitos vasculares. *Real Jardín Botánico*. <https://bibdigital.rjb.csic.es/viewer/16128/?offset=#page=5&viewer=picture&o=bookmark&n=0&q=>
- Corral, Y., Corral, I. y Franco, C. A. (2015). Procedimientos de muestreo. *Revista Ciencias de la Educación*, Vol 26, Nro. 46, ISSN: 316-5917. <http://servicio.bc.uc.edu.ve/educacion/revista/46/art13.pdf>
- Chucos, P. A. (2020). *Impacto ambiental del manejo de residuos sólidos del botadero "El Porvenir" - El Tambo*. [Tesis de grado, Universidad Continental]. Repositorio Continental: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8794/4/IV_FIN_107_TI_Chucos_Palomino_2020.pdf
- Daud, M., Shafaqat, A., Zohaib, A., Ihsan, E., Muhammad, A., Afifa, M., Afzal, H., Muhammad, R., Muhammad, Z. y Shui, J. (2018). Potential of Duckweed (*Lemna minor*) for the Phytoremediation of Landfill Leachate [Potencial de la lenteja de agua (*Lemna minor*) para la fitorremediación de lixiviados de vertedero]. *Journal of Chemistry*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2018/3951540>
- Decreto Supremo N° 001-2009 [Ministerio del Ambiente]. Por lo cual se Aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) de Efluentes de Infraestructuras de Residuos Sólidos. 09 de enero del 2009.
- Decreto Supremo N° 003-2010 [Ministerio del Ambiente]. Por lo cual se Aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas residuales Domésticas o Municipales. 16 de marzo del 2010.
- Defensoría del Pueblo. (2019). ¿Dónde va nuestra basura? Recomendaciones para mejorar la gestión de los residuos sólidos municipales. <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/informe-defensorial-181.pdf>
- Delgadillo, A., Gonzales, C., Prieto, F., Villagómez, J. y Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Agroecosistemas tropicales y subtropicales*. 14(2), 597-612.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es.

- Delgadillo, O., Camacho, L., Pérez, F. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Bolivia, Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón. <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Díaz, F. (2019). *Evaluación de la contaminación del suelo por lixiviados del botadero municipal del distrito de san pablo – 2018*. [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio digital institucional. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/31560>.
- Falcón, N. (2016). *Afectación del suelo como consecuencia de la disposición de residuos sólidos municipales en el botadero Roma- Casa Grande*. [Tesis de Grado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional <https://hdl.handle.net/20.500.12692/6794>
- Fernández, A. y Volpedo, A. (2020). Indicadores físico-químicos: ¿qué, cómo y cuánto reflejan la calidad del agua? Eudeba. <http://hdl.handle.net/11336/142626>
- Fernández, J., Beascochea, M.; Muñoz, M.. y Fernández, D. (2014). Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas. Universidad politécnica de Madrid. <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/manual-de-fitodepuracion-filtro-de-macrofitas-en-flotacion>
- Fernández, S. (2014). *Tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario del cantón Yantzaza mediante el proceso de fitorremediación con las especies Pasto alemán (Echinochloa polystachya) y Jacinto de agua (Eichhornia crassipes)*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja]. Repositorio digital. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/13923>
- García, J y Corzo, A. (2008) Sistemas naturales de depuración. En García, S. J y Corzo, H. A. (Ed.), depuración con Humedales Construidos. *Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial* (1-2). Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Giraldo, E. (2014). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista De Ingeniería*, 14(2001), 44-55. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>

- Guevara, M. y Ramirez, L. (2015). *Eichhornia Crassipes*, su Invasividad y Potencial Fitorremediador. *La Granja*, 22(2), 5-11. <https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047267001.pdf>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación. McGraw - Hill Interamericana de México. https://www.uv.mx/personal/cbustamante/files/2011/06/Metodologia-de-la-Investigaci%C3%83%C2%B3n_Sampieri.pdf
- Ilyas, M., Sa, K., Ali, M. y Lee, J. (2023). Toxic effects of lead on plants: integrating multi-omics with bioinformatics to develop Pb-tolerant crops [Efectos tóxicos del plomo en las plantas: integración de la multiómica con la bioinformática para desarrollar cultivos tolerantes al plomo]. *Planta* 12; 259(1):18. doi: 10.1007/s00425-023-04296-9. PMID: 38085368.
- Irhamnil, I., Purba, E. y Hasan, W. (2023). Effect of Leachate Concentration on the *Eichhornia crassipes* Plants [Efecto de la concentración de lixiviado en las plantas de *Eichhornia crassipes*]. *Journal Serambi Engineering*, Volume VIII, N° 3, 6115 – 6124. <https://ojs.serambimekkah.ac.id/jse/article/view/6066/4473>
- Jerez, J. (2013). Remoción de metales pesados en lixiviados mediante fitorremediación. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]. <http://www.ciencias.ucr.ac.cr/sites/default/files/Jos%C3%A9%20Jerez-2013-Remoci%C3%B3n%20de%20metales%20pesados%20en%20lixiviados%20median%20fitorremediaci%C3%B3n.pdf>
- Juárez, M., Sánchez, J. y Sánchez, A. (2006). Química del suelo y medio ambiente. Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Kaza, S., Yao, B. y Van, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Khatun, R., Islam, A. y Majid, F. (2006). Comparative study of pollen grains and development of seed in both long and short petioled forms of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach [Estudio comparativo de granos de polen y desarrollo de semilla en ambos largos y formas de peciolo corto de *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach]. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*. 41(3), 189-202. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v41i3.289>
- Kim, R. Y., Yoon, J. K., Kim, T. S., Yang, J. E., Owens, G. y Kim, K. R. (2015). Biodisponibilidad de metales pesados en suelos: definiciones e implementación

práctica: una revisión crítica. *Environ Geochem Health* 37, 1041–1061.
<https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y>

León, G., Cruz, V., Dávila, P., Velasco, T., y Chapa, G. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32 (3), 514-526. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742015000300514

Lezcano, J. (2008). *Efecto del pretratamiento de biomasa procedente de un hábitat eutrofizado sobre la bioabsorción de metales pesados*. [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. E-Prints Complutense. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/8620/>

López, M. (2017). Tratamiento de residuos sólidos urbanos o municipales. Editorial CEP S.L.

López, S., Gallegos, M., Pérez, L y Gutiérrez, L. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21 (2) 91-100. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n2/0188-4999-rica-21-02-91.pdf>

Madera, C., Peña, E. y Solarte, J. (2014). Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. *Ingeniería y Competitividad*. 16(2), 179 – 188. <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v16n2/v16n2a16.pdf>

Madueño, F y Orellana, A. (2021). Efecto fitorremediador de las especies *Myriophyllum quitense* y *Elodea densa* en la remoción de contaminantes del lixiviado del relleno sanitario Cepasc – Concepción, 2021. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12380/4/IV_FIN_107_TE_Madueno_Orellana_2021.pdf

Martínez, J y Rojas, C. (2018). Diseño, Construcción y Puesta en marcha de un humedal a escala de laboratorio para tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario la Esmeralda [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Manizales]. <https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2129/1/Juan%20Jos%C3%A9%20Mart%C3%ADnez%20Franco.pdf>

- Mendoza, P. y López V. (2004). *Estudio de la calidad del lixiviado del relleno sanitario la Esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en filtro anaerobio piloto de flujo ascendente* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2691/patriciamedozasalgado.2004_.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mena, A. (2021). Propiedades del *Eichhornia crassipes* “Jacinto de agua”, *Schoenoplectus colifornicus* “Junco”, y el *Phragmites australis* “Carricillo”. *Revista Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia y Ciencias geográficas*, 24(47), <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/20656>
- Mera, S. (2016). Evaluación de la bioconcentración de dos especies de macrofitas acuáticas (*Eichhornia crassipes* y *Lemna* spp) en la fitorremediación de un medio contaminado con plomo. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espacech.edu.ec/bitstream/123456789/6174/1/236T0219.pdf>
- Miguel-Barrera, A., Castañeda-Antonio, D., Santamaría-Juárez, J., Munive-Hernández, J., Rivera-Tapia, A. y Ramos-Cassellis, M. (2020). Modelo de biorremediación de plomo usando lirio de agua. *Alianzas y tendencias BUAPA*, 5 (17), 15-28. <http://doi.org/10.5281/zenodo.5093045>
- Montalvan, A., Estrada, K., Sanz, Z., Brígido, O y Caparros, Y. (2015). Humedales artificiales: una alternativa para el tratamiento de residuales líquidos en la comunidad. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/280482815>
- Monroy-Licht, A., Carranza-Lopez, L., De la Parra-Guerra y Acevedo, R. (2024). Aprovechar el potencial de *Eichhornia crassipes* para el tratamiento de aguas residuales: Fitorremediación de contaminantes acuáticos, una estrategia para avanzar en el Objetivo de Desarrollo Sostenible-06: Agua limpia. *Environ Sci Pollut*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33698-9>
- Mosquera, Y. y Lara, J. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: Revisión del estado del arte. *Revista Tumbaga*, 1(7), 73-99. <http://revistas.ut.edu.co/index.php/tumbaga/article/view/377>
- Morales, J. P., Goitia, C, A., Guillen, S, G. y Morales, J. F. (2024). Lixiviados y desechos sólidos. Editorial Patria
- Naveen, P., Madhab, D., Sitharam, G., Sivapullaiiah, V. y Ramachandra, V. (2017). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate [Caracterización físico-química y biológica de lixiviados de vertederos urbanos

municipales]. *Environmental Pollution*, 220 (1), 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.002>

Obiols, L. (1969). Espectrofotometría de absorción atómica, su aplicación en la industria del vidrio. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 8(6), 659-668.
<http://boletines.secv.es/upload/196908659.pdf>

Pellón, A., López, M., Espinosa, M. y González, O. (2015). Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2), 3-16.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000200001&lng=es&tlng=es

Pourrut, B., Shahid, M., Dumat, C., Winterton, P. y Pinelli, E. (2011). Lead Uptake, Toxicity, and Detoxification in Plants [Absorción, toxicidad y desintoxicación del plomo en las plantas]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 213, 113-136. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-9860-6_4

Pozo, J., García, J. A. y Vázquez, Y. (2020). Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales, Pinar del Río. *Avances*, 22(3), 325-341.
<http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/555/1618>

Pozo, W., Sanfeliu, T. y Carrera, G. (2011). Metales pesados en humedales de arroz en la cuenca baja del río Guayas. *MASKANA*, Vol. 2, N°. 1, 2011.
[https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5383/1/MASKANA%20si5938%20\(2\).pdf](https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5383/1/MASKANA%20si5938%20(2).pdf)

Plan de manejo de residuos sólidos. (2018). Municipalidad Distrital de Nueva Cajamarca.
http://www.nuevacajamarca.gob.pe/docs/2018/omunicipal/ORDENANZA_MUNICIPAL_009_2018.pdf

Prieto, J., Gonzales, C., Román, A. y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10(1), 29-44. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Qiang, L., Juhong, Z., Bo, Ch., Xiangqi, M. y Xuejun, P. (2016). Removal of Pb, Zn, Cu, and Cd by Two Types of *Eichhornia crassipes* [Eliminación de Pb, Zn, Cu y Cd por dos tipos de *Eichhornia crassipes*]. *Environmental Engineering Science* 33, 2. <https://www.liebertpub.com/doi/epub/10.1089/ees.2015.0091>

- Quispe, L., Arias, J., Martínez, C. y Cruz, M. (2017). Eficiencia de la especie macrófita *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) para la remoción de parámetros fisicoquímicos, metal pesado (Pb) y la evaluación de su crecimiento en función al tiempo y adopción al medio en una laguna experimental. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*. 3(1), 79-93. <http://dx.doi.org/10.17162/rictd.v1i1.899>
- Raffo, E. (2013). Tratado del agua y la legislación peruana. *Industrial Data*. 16 (2), 106-117. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81632390013>
- Real Academia Española. (2019). Adsorción. En Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/adsorci%C3%B3n>
- Resolución N° 003-2024-OEFA/DSIS. [Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental]. Aprueban el inventario nacional de áreas degradadas por residuos sólidos municipales. 02 de febrero 2024.
- Reyes, M. (2015). *Lixiviados en plantas de residuos. Una contribución para la selección del proceso de tratamiento*. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. RiuNet. <http://hdl.handle.net/10251/56763>
- Rivera-Laguna, E., Barba-Ho, L. y Torres-Lozada, P. (2013). Determinación de la toxicidad de lixiviados provenientes de residuos sólidos urbanos mediante indicadores biológicos. *Revista de química teórica y aplicada*. 70(563), 183-188. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/276257/364167>
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2013). Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971). 6ª edición. [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/63CDE791FF2EB4CD05257C630051708F/\\$FILE/1_pdfsam_Manual_convención_de_Ramsar_2013.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/63CDE791FF2EB4CD05257C630051708F/$FILE/1_pdfsam_Manual_convención_de_Ramsar_2013.pdf)
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2020). Datos Hidrometeorológicos en San Martín. <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=san-martin&p=estaciones>
- Silva, T. V. (2022). Población y muestra. <https://es.slideshare.net/slideshow/08-poblacionymuestrapresentacindocx/253760501>

- Sillero, M. F. (2012). Tratamiento de residuos urbanos o municipales. IC Editorial. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucssp/reader.action?docID=5350073&query=Tratamiento+de+residuos+urbanos+o+municipales>
- Soltan, E y Rashed, N. (2003). Laboratory study on the survival of water hyacinth under several conditions of heavy metal concentrations [Estudio de laboratorio sobre la supervivencia del jacinto de agua en diversas condiciones de concentración de metales pesados]. *Advances in Environmental Research* 7 (2003) 321–334. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1093019102000023>
- Solís, Y., Zúñiga, L. y Mora, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*.31 (1), 35-46. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822018000100035
- Trujillo, F. (2005). *Impacto del plomo sobre el cultivo de arroz en Ibagué-Tolima, finca la Argentina*. [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Séneca repositorio institucional. <https://repositorio.uniandes.edu.co/flexpaper/handle/1992/22684/u270964.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=8>
- Vara, M. y de Oliveira, H. (2003). Metal hyperaccumulation in plants: Biodiversity prospecting for phytoremediation technology [Hiperacumulación de metales en plantas: Prospección de la biodiversidad para la tecnología de fitorremediación]. *Electronic Journal of Biotechnology*. 6(3), 285-321. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-34582003000300012&lng=es&tlng=en
- Valderrama, R. (2018). *Evaluación ambiental del botadero de haquira, distrito de Santiago-Cusco, mediante la metodología eviave*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio UNFV. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/2252>
- Vidal, G. y Hormazábal, S. (2018). Diseño y construcción de humedales para el tratamiento de aguas. Universidad de Concepción. <http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1779>
- Vilar, A. (2015). *Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos*. [Tesis doctoral, Universidad la Curuña]. Repositorio UDC. <https://core.ac.uk/download/pdf/61917856.pdf>

TERMINOLOGÍA

- **Adsorción.** Capacidad o afinidad de un cuerpo para atraer y retener en su superficie moléculas o iones de otro fluido o cuerpo (Real Academia Española [RAE], 2019).
- **Absorción.** Capacidad y/o afinidad de un cuerpo de atraer e incorporar sustancias, iones y/o moléculas externas hacia su sistema (Real Academia Española [RAE], 2019).
- **Conductividad.** Concentración de sales disueltas en un cuerpo de agua, las cuales lo permite transportar o conducir corriente eléctrica hacia otro cuerpo. Se expresa en unidades de microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$) (Solís *et al.*, 2018).
- **Espectrofotometría.** Es un método analítico que proviene de los siguientes términos: Espectro, se refiere a radiaciones electromagnéticas (Luz monocromática), la cual está caracterizada por una frecuencia o número de onda o longitud de onda; y fotometría, refiriéndose a la medición de la luz y/o energía radiante relativa a la intensidad (Obiols, 1969).
- **Fitoextracción.** También conocida como bioacumulación; proceso mediante el cual una especie vegetal secuestra un determinado compuesto, a través del área de contacto, como por ejemplo las raíces y lo acumula dentro de sus tejidos (Delgadillo *et al.*, 2011).
- **Fitodegradación.** Proceso mediante el cual una especie vegetal degrada un compuesto de carácter orgánico dentro de su estructura a través de procesos enzimáticos, pudiendo mineralizarlos hasta CO_2 y H_2O (Fernández *et al.*, 2014).
- **Fitovolatilización.** Proceso por el cual una especie absorbe un compuesto ya sea de carácter orgánico e inorgánico, y los transforma biológicamente en compuestos gaseosos los cuales son liberados a la atmosfera (Vara y de Oliveira, 2003).
- **Fitoestabilización.** Es un proceso que tiene como objetivo la inactivación de un contaminante ya sea de manera física, química o ambas, sirviendo como medio

preventivo para disminuir las vías de exposición al contaminante (Vara y de Olivera, 2003).

- **Fitoestimulación.** También conocida como rizodegradación, la planta a través de exudados radiculares crea relaciones simbióticas con microorganismos determinados que permiten la degradación del contaminante (López *et al.*, 2005).
- **Lixiviados.** Líquido que se genera producto de la propia descomposición de los residuos sólidos y las condiciones climáticas y geografías del área en la que se depositan los mismos, poseen una gran cantidad de carga orgánica e inorgánica con potencial contaminante para el ambiente (López, 2017).
- **Macrófitas.** Son plantas que viven en ecosistemas acuáticos y se caracterizan por poseer una gran capacidad para degradar, asimilar y descomponer a los compuestos orgánicos como inorgánicos presentes en flujos de aguas contaminadas (Fernández *et al.*, 2014).
- **Sólidos totales.** En un cuerpo de agua los sólidos pueden encontrarse de dos formas ya sea; sedimentados o suspendidos, la diferencia que caracteriza a cada uno es su granulometría (Barrenechea, 2004).
- **Xenobióticos:** Son aquellos compuestos químicos liposolubles de muy bajo peso molecular, con poca complejidad estructural y cuya naturaleza es extraña al metabolismo de los seres vivos, son difíciles de eliminar o biotransformar (Bornaz y Bornaz, 2019).

APÉNDICES

Apéndice 1

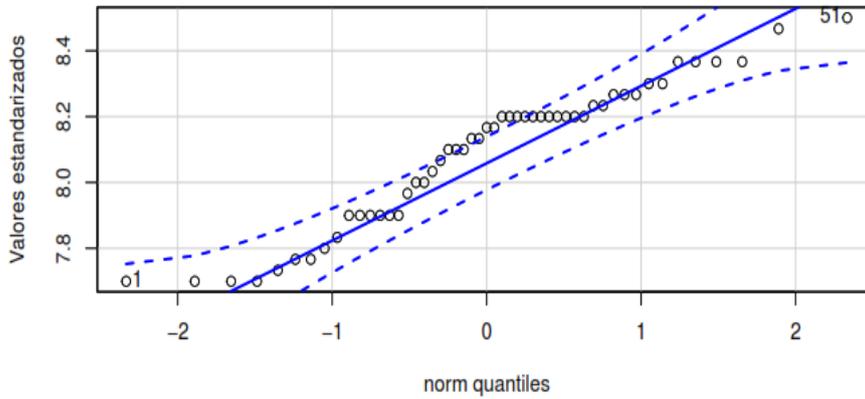
Valores promedios diarios de pH

Días Evaluado	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3
INICIO	7,70	7,70	7,70
1	7,90	7,90	7,77
2	8,03	7,97	7,80
3	8,10	7,90	7,70
4	8,13	7,90	7,73
5	8,20	7,90	7,77
6	8,20	8,00	7,83
7	8,20	8,10	7,90
8	8,20	8,13	8,00
9	8,23	8,17	8,07
10	8,27	8,10	8,20
11	8,27	8,20	8,20
12	8,37	8,30	8,20
13	8,37	8,27	8,17
14	8,37	8,20	8,20
15	8,37	8,20	8,23
FINAL	8,47	8,30	8,50

$\bar{X} = 8,42$

Apéndice 2

Análisis de normalidad de pH



Prueba de normalidad

H_o : Los datos proceden de una distribución normal

H_a : Los datos no proceden de una distribución normal

Shapiro-Wilk

```
shapiro.test(BD$pH)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: BD\$pH

W = 0.94098, p-value = 0.01345

Comentario: Los datos no proceden de una distribución normal ($p < 0.05$)

Apéndice 3

Análisis de homocedasticidad de pH

Prueba de homocedasticidad

H_o : Las varianzas son iguales en todos los grupos

H_a : Las varianzas son diferentes en todos los grupos

Prueba de Levene

```
Tratamiento<-factor(BD$Tratamiento)
leveneTest(BD$pH~Tratamiento,center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 2  2.4056  0.101
    48
```

Comentario: Las varianzas son iguales en todos los grupos ($p > 0.05$)

Apéndice 4

Análisis ANOVA de pH

Análisis de varianza (ANOVA)

```
attach(BD)
```

La función **attach** sirve para desvincular las variables del conjunto de datos.

```
Tratamiento<-factor(BD$Tratamiento)
Temperatura<-as.numeric(pH)
```

Aquí se prepara las variables que van a ser consideradas como factor, es decir, en éste caso, factor es el tratamiento y la variable respuesta (numérica) es el pH.

Planteamiento de hipótesis para el ANOVA

Para realizar el análisis de varianza (ANOVA), el orden de las variables es el siguiente:
 $y \sim x$, donde:

y : pH

x : Cantidad de *Eichhornia crassipes* (Tratamiento)

H_o : El pH mediano es igual en las tres cantidades de *Eichhornia crassipes*

H_a : El pH mediano es diferente en al menos una de las tres cantidades de *Eichhornia crassipes*

```
KT<-kruskal.test(pH~Tratamiento)
KT
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: pH by Tratamiento
Kruskal-Wallis chi-squared = 8.1075, df = 2, p-value = 0.01736
```

Comentario: Se concluye que el pH mediano es diferente en al menos uno de las tres cantidades de *Eichhornia crassipes* ($p < 0.05$).

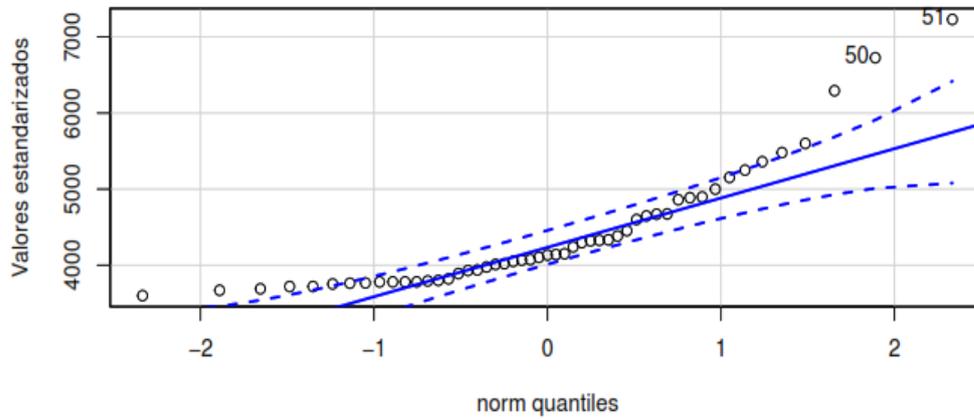
Apéndice 5

Valores promedios diarios de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Días Evaluados	Tratamiento ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1	Tratamiento 2 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Tratamiento 3 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
INICIO	4140,00		4020,00	4050,00
1	3780,00		3766,67	3780,00
2	3600,00		3690,00	3670,00
3	3753,33		3780,00	3720,00
4	3763,33		3720,00	3820,00
5	3780,00		3793,33	3976,67
6	3800,00		3936,67	4103,33
7	3890,00		4073,33	4326,67
8	3930,00		4240,00	4646,67
9	4296,67		4673,33	5250,00
10	4010,00		4383,33	5000,00
11	4066,67		4453,33	5153,33
12	4150,00		4670,00	5480,00
13	4133,33		4600,00	5600,00
14	4333,33		4896,67	6293,33
15	4320,00		4886,67	6726,67
Final	4860,00		5360,00	7230,00

Apéndice 6

Análisis de normalidad de conductividad



Prueba de normalidad

H_0 : Los datos proceden de una distribución normal

H_a : Los datos no proceden de una distribución normal

Shapiro-Wilk

```
shapiro.test(BD$Conductividad)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: BD\$Conductividad

W = 0.81026, p-value = 1.261e-06

Comentario: Los datos no proceden de una distribución normal ($p < 0.05$)

Apéndice 7

Análisis de homocedasticidad de conductividad

Prueba de homocedasticidad

H_o : Las varianzas son iguales en todos los grupos

H_a : Las varianzas son diferentes en todos los grupos

Prueba de Levenne

```
Tratamiento<-factor(BD$Tratamiento)
leveneTest(BD$Temperatura~Tratamiento,center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 2  1.6562 0.2016
  48
```

Comentario: Las varianzas son iguales en todos los grupos ($p > 0.05$)

Apéndice 8

Análisis ANOVA de conductividad

Análisis de varianza (ANOVA)

```
attach(BD)
```

La función **attach** sirve para desvincular las variables del conjunto de datos.

```
Tratamiento<-factor(BD$Tratamiento)
Temperatura<-as.numeric(Conductividad)
```

Aquí se prepara las variables que van a ser consideradas como factor, es decir, en éste caso, factor es el tratamiento y la variable respuesta (numérica) es la conductividad.

Planteamiento de hipótesis para el ANOVA

Para realizar el análisis de varianza (ANOVA), el orden de las variables es el siguiente: y~x, donde:

y: Conductividad

x: Cantidad de Eichhornia crassipes (Tratamiento)

H_o : La conductividad($\mu\text{s/cm}$) mediana es igual en las tres cantidades de Eichhornia crassipes

H_a : La conductividad($\mu\text{s/cm}$) mediana es diferente en al menos una de las tres cantidades de Eichhornia crassipes

```
KT<-kruskal.test(Conductividad~Tratamiento)
KT
```

```
    Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: Conductividad by Tratamiento
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 5.5412, df = 2, p-value = 0.06262
```

Comentario: Se concluye que la conductividad($\mu\text{s/cm}$) mediana es igual en las tres cantidades de Eichhornia crassipes ($p>0.05$).

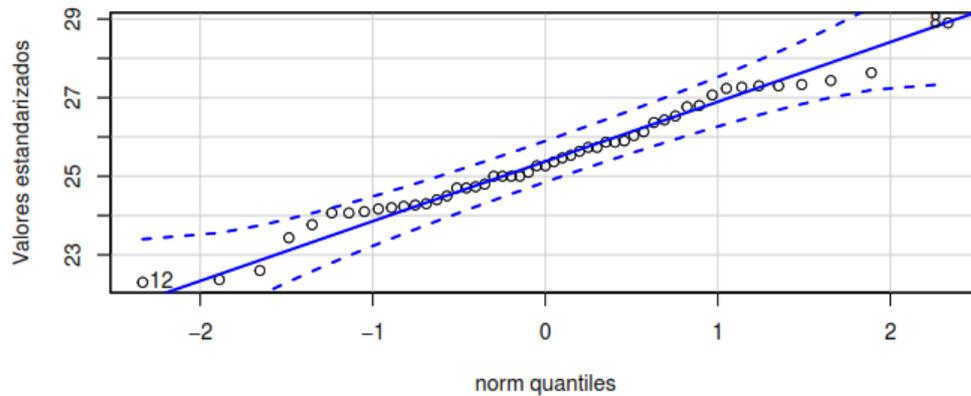
Apéndice 9

Variación promedio diario de temperatura °C

Días Evaluados	Tratamiento 1(°C)	Tratamiento 2 (°C)	Tratamiento 3 (°C)
Inicio	24,70	24,80	25,00
1	27,23	26,77	26,03
2	25,10	24,20	24,07
3	27,33	26,43	25,63
4	27,30	26,80	25,73
5	27,30	27,07	25,73
6	25,27	24,50	24,10
7	28,90	27,43	26,53
8	27,27	26,13	25,27
9	25,87	24,40	24,30
10	27,63	25,87	25,90
11	22,30	22,60	22,37
12	26,37	25,47	24,07
13	24,17	24,70	23,43
14	25,00	24,73	23,77
15	24,23	25,00	24,27
Final	25,53	25,37	25,00

Apéndice 10

Análisis de normalidad de temperatura °C



Prueba de normalidad

H_o : Los datos proceden de una distribución normal

H_a : Los datos no proceden de una distribución normal

Shapiro-Wilk

```
shapiro.test(BD$Temperatura)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: BD\$Temperatura

W = 0.98191, p-value = 0.6226

Comentario: Los datos proceden de una distribución normal ($p > 0.05$)

Apéndice 11

Análisis de homocedasticidad de temperatura °C

Prueba de homocedasticidad

H_o : Las varianzas son iguales en todos los grupos

H_a : Las varianzas son diferentes en todos los grupos

Prueba de Levene

```
Tratamiento<-factor(BD$Tratamiento)  
leveneTest(BD$Temperatura~Tratamiento,center="mean")
```

Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "mean")

	Df	F value	Pr(>F)
group	2	1.7486	0.1849

Comentario: Las varianzas son iguales en todos los grupos ($p > 0.05$)

Apéndice 12

Análisis ANOVA de temperatura °C

Análisis de varianza (ANOVA)

```
attach(BD)
```

La función **attach** sirve para desvincular las variables del conjunto de datos.

```
Tratamiento<-factor(BD$Tratamiento)
Temperatura<-as.numeric(Temperatura)
```

Aquí se prepara las variables que van a ser consideradas como factor, es decir, en éste caso, factor es el tratamiento y la variable respuesta (numérica) es la temperatura.

Planteamiento de hipótesis para el ANOVA

Para realizar el análisis de varianza (ANOVA), el orden de las variables es el siguiente: y~x, donde:

y: Temperatura

x: Cantidad de Eichhornia crassipes (Tratamiento)

H_0 : La temperatura promedio es igual en las tres cantidades de Eichhornia crassipes

H_a : La temperatura promedio es diferente en al menos una de las tres cantidades de Eichhornia crassipes

```
anovaTempe<-aov(Temperatura~Tratamiento)
anova(anovaTempe)
```

Analysis of Variance Table

Response: Temperatura

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tratamiento	2	12.153	6.0766	3.2979	0.0455 *
Residuals	48	88.444	1.8426		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Comentario: Se concluye que la temperatura promedio es diferente en al menos uno de las tres cantidades de Eichhornia crassipes ($p < 0.05$).

Apéndice 13

Ensayo de análisis de plomo y solidos suspendidos totales



INFORME DE ENSAYO N° 034-2020-M/ANAQUÍMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : **"Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca"**.
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : Muestra Control Inicial
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 07-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREADO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 11-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS
01	Plomo	mg/L	0.05
02	Sólidos Totales Suspendidos (SST)	mg/L	734

MÉTODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Apéndice 14

Resultados del análisis de laboratorio de solidos totales suspendidos (mg/L) y plomo (mg/L)



INFORME DE ENSAYO N° 036-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
 MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : “Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca”.
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T2
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 07-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 11-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T2		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.038	0.036	0.037
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	684	682	683

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
 SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente

ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
 Ing. Samuel López Chávez
 CIP. N° 140674
 TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 037-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T3
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 07-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREADO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 11-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T3		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.032	0.030	0.031
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	545	542	544

MÉTODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente,



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.
Samuel López Chávez
Ing. Samuel López Chávez
CIP. N° 140674
TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 038-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
 MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T1
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 13-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREADO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 17-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T1		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.034	0.035	0.034
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	564	566	564

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.0005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
 SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente,



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL

 Ing. Samuel López Chávez
 CIP. N° 140674
 TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 039-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T2
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 13-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 17-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T2		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.029	0.029	0.029
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	544	544	544

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 9030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente,



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
Samuel López Chávez
Ing. Samuel López Chávez
CIP. N° 140674
TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 040-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T3
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 13-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 17-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T3		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.020	0.020	0.020
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	435	435	435

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 9030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente.



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
Samuel López Chávez
Ing. Samuel López Chávez
CIP. N° 140674
TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 041-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T1
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 18-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 23-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T1		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.027	0.028	0.027
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	463	463	463

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente,



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
Samuel López Chávez
Ing. Samuel López Chávez
CIP. N° 140674
TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 042-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
 MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T2
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 18-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 23-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T2		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.018	0.018	0.018
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	336	336	336

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.0005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
 SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente,



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

 Ing. Samuel López Chávez
 CIP. N° 140674
 TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 043-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
 MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : T3
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 18-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 23-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

Item	Parámetros	Unidad	T3		
			A	B	C
01	Plomo	mg/L	0.007	0.007	0.007
02	Sólido Totales Suspendidos (SST)	mg/L	184	184	184

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017),
 SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

Atentamente,



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL

 Ing. Samuël López Chávez
 CIP. N° 140674
 TITULAR GERENTE



ANAQUÍMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
RUC: 20572240372

INFORME DE ENSAYO N° 044-2020-M/ANAQUIMICOS/CC/SLCH

CLIENTE : MANCHAY TOCTO, GONZALO
MUÑOZ DÍAZ, ALVIN
INVESTIGACIÓN : "Determinación de la cantidad óptima de *Eichhornia crassipes* para la remoción de Plomo en Lixiviados del Botadero de la ciudad de Nueva Cajamarca".
TIPO DE MUESTRA : Agua Residual (Lixiviados)
REFERENCIA : Muestra Control Final
FECHA DE TOMA DE MUESTRA : 18-12-2020
HORA TOMA DE MUESTRA : 16:00
MUESTREADO POR : Cliente
FECHA DE EMISIÓN : 23-12-2020

RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL (LIXIVIADOS):

ITEM	PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADOS
01	Plomo	mg/L	0.045
02	Sólidos Totales Suspendidos (SST)	mg/L	722

METODO : Plomo (SMEWW-APHA-AWWA-WEF 0.00005 Part 3030 K, 3125 B, 23rd Ed. 2017).
SST (SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 23rd Ed. 2017).

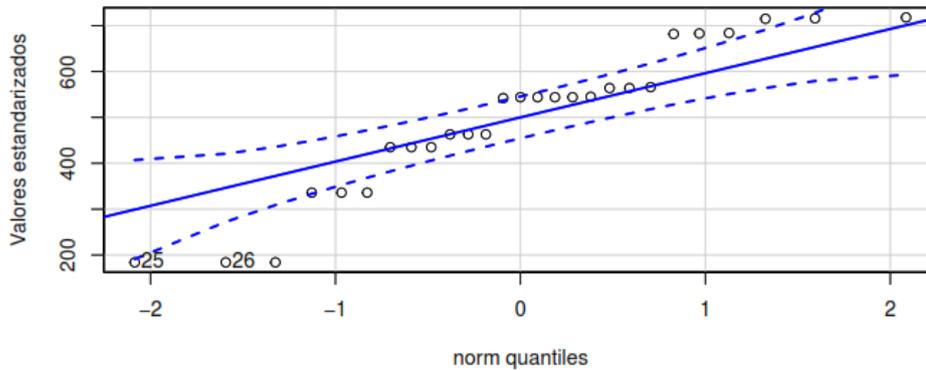
Atentamente,



ANAQUIMICOS SERVICIOS GENERALES EIRL
Samuel López Chávez
Ing. Samuel López Chávez
CIP. N° 140674
TITULAR GERENTE

Apéndice 15

Análisis de normalidad de sólidos totales suspendidos



Prueba de normalidad

H_o : Los datos proceden de una distribución normal

H_a : Los datos no proceden de una distribución normal

Shapiro-Wilk

```
shapiro.test(BD1$SST)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: BD1\$SST

W = 0.91944, p-value = 0.03828

Comentario: Los datos no proceden de una distribución normal ($p < 0.05$)

Apéndice 16

Análisis de homocedasticidad de sólidos totales suspendidos

Prueba de homocedasticidad

H_o : Las varianzas son iguales en todos los grupos

H_a : Las varianzas son diferentes en todos los grupos

Prueba de Levene

```
Tratamiento<-factor(BD1$Cantidad)
leveneTest(BD1$SST~Tratamiento,center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 2  0.4033 0.6726
      24
```

Comentario: Las varianzas son iguales en todos los grupos ($p > 0.05$)

Apéndice 17

Análisis ANOVA de sólidos totales suspendidos

Análisis de varianza (ANOVA)

```
attach(BD1)
```

La función **attach** sirve para desvincular las variables del conjunto de datos.

```
Tratamiento<-factor(BD1$Cantidad)  
SST<-as.numeric(SST)
```

Aquí se prepara las variables que van a ser consideradas como factor, es decir, en éste caso, factor es la cantidad de *Eichhornia crassipes* y la variable respuesta (numérica) es el SST.

Planteamiento de hipótesis para el ANOVA

Para realizar el análisis de varianza (ANOVA), el orden de las variables es el siguiente: $y \sim x$, donde:

y: SST

x: Cantidad de *Eichhornia crassipes* (Tratamiento)

H_0 : El SST mediano es igual en las tres cantidades de *Eichhornia crassipes*

H_a : El SST mediano es diferente en al menos una de las tres cantidades de *Eichhornia crassipes*

```
KT<-kruskal.test(SST~Tratamiento)  
KT
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: SST by Tratamiento  
Kruskal-Wallis chi-squared = 7.9945, df = 2, p-value = 0.01837
```

Comentario: Se concluye que el SST mediano es estadísticamente diferente en al menos una de las tres cantidades de *Eichhornia crassipes* ($p < 0.05$).

Apéndice 18

Análisis de comparaciones múltiples

Análisis de comparaciones múltiples

```
pairwise.wilcox.test(SST,Tratamiento, p.adjust = "bonferroni", exact = FALSE )
```

Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: SST and Tratamiento

	0.5 kg	1.0 kg
1.0 kg	0.743	-
1.5 kg	0.018	0.354

P value adjustment method: bonferroni

Comentario: Se concluye que SST mediano es diferente estadísticamente entre las cantidades de 0.5 kg y 1.5 kg de *Eichhornia crassipes* ($p < 0.05$), respectivamente.

Apéndice 19

Evaluaciones del número de hojas viables de la *Eichhornia crassipes*

Tratamientos	Replica	Código de planta	Días Evaluados.					
			Inicio	3	6	9	12	15
Tratamiento 1	T1 - A	T1 - A01	4	3	2	2	2	3
		T1 - A02	5	3	3	3	3	4
		T1 - A03	5	3	3	3	2	4
	T1 - B	T1 - B01	5	3	3	2	4	4
		T1 - B02	5	4	4	4	3	3
		T1 - B03	4	3	3	3	3	3
	T1 - C	T1 - C01	5	3	3	3	4	5
		T1 - C02	5	3	3	2	3	4
		T1 - C03	5	2	2	3	3	4
Promedio			4,778	3,000	2,889	2,778	3,000	3,778
Tratamiento 2	T2 - A	T2 - A01	4	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
		T2 - A02	4	2	2	2	2	3
		T2 - A03	5	3	2	3	2	3
		T2 - A04	4	2	1	2	2	2
		T2 - A05	4	2	2	2	3	3
		T2 - A06	4	3	3	3	4	2
	T2 - B	T2 - B01	4	3	4	4	3	3
		T2 - B02	5	4	4	4	4	3
		T2 - B03	5	4	4	3	3	3
		T2 - B04	6	3	3	4	4	4
		T2 - B05	5	4	3	4	3	4
		T2 - B06	5	3	2	3	2	2
	T2 - C	T2 - C01	5	3	3	3	3	4
		T2 - C02	6	5	5	4	4	3
		T2 - C03	4	3	3	3	2	3
		T2 - C04	4	5	3	3	3	4
		T2 - C05	5	5	4	3	3	4
		T2 - C06	3	3	4	4	3	4
Promedio			4,556	3,389	3,111	3,222	3,000	3,222

		T3 - A01	7	3	3	4	3	2
		T3 - A02	4	5	5	4	3	3
		T3 - A03	4	4	5	4	4	4
	T3- A	T3 - A04	4	5	5	4	3	3
		T3 - A05	5	3	3	2	1	2
		T3 - A06	5	4	5	4	5	4
		T3 - A07	4	3	5	4	4	3
		T3 - A08	5	3	3	4	4	5
		T1 - B01	4	2	2	3	3	3
		T1 - B02	5	3	2	2	2	2
		T1 - B03	3	7	4	3	2	2
Tratamiento 3	T3 - B	T1 - B04	5	5	4	3	4	5
		T1 - B05	5	4	3	3	3	4
		T1 - B06	5	2	3	1	2	3
		T1 - B07	4	4	4	3	4	4
		T1 - B08	4	3	4	2	3	2
		T2 - C01	6	4	4	4	3	3
		T2 - C02	6	4	4	4	4	4
		T2 - C03	6	5	3	3	4	4
	T3 - C	T2 - C04	5	2	3	4	4	5
		T2 - C05	4	4	3	2	2	2
		T2 - C06	5	5	4	4	3	2
		T2 - C07	5	3	3	2	3	3
		T2 - C08	4	3	3	4	3	4
	Promedio		4,560	3,600	3,480	3,080	3,040	3,120

Apéndice 20

Variación de la longitud de raíz de las plantas de *Eichhornia Crassipes*

Tratamientos	Réplicas	Código de planta	Longitud de raíz inicio (cm)	Longitud de raíz final (cm)	Variación (cm)
Tratamiento 1	Replica A	T1 - A01	22,00	23,00	1,00
		T1 - A02	25,00	24,00	-1,00
		T1 - A03	25,00	20,00	-5,00
	Replica B	T1 - B01	25,00	23,00	-2,00
		T1 - B02	24,00	25,00	1,00
		T1 - B03	17,00	21,00	4,00
	Replica C	T1 - C01	21,00	22,00	1,00
		T1 - C02	22,00	24,00	2,00
		T1 - C03	20,00	21,00	1,00
Tratamiento 2	Replica A	T2 - A01	18,00	23,00	5,00
		T2 - A02	22,00	23,00	1,00
		T2 - A03	22,00	19,00	-3,00
		T2 - A04	15,50	18,00	2,50
		T2 - A05	26,00	21,00	-5,00
		T2 - A06	14,00	20,00	6,00
	Replica B	T2 - B01	24,00	25,00	1,00
		T2 - B02	16,00	19,00	3,00
		T2 - B03	24,00	29,00	5,00
		T2 - B04	17,00	20,00	3,00
		T2 - B05	19,00	22,00	3,00
		T2 - B06	19,00	24,00	5,00
	Replica C	T2 - C01	23,00	24,00	1,00
		T2 - C02	17,00	26,50	9,50
		T2 - C03	24,00	21,00	-3,00
		T2 - C04	17,00	25,00	8,00
		T2 - C05	18,00	29,00	11,00
		T2 - C06	15,00	23,00	8,00
Tratamiento 3	Replica A	T3 - AO1	16,00	19,00	3,00
		T3 - AO2	24,00	25,00	1,00
		T3 - AO3	16,00	13,00	-3,00
		T3 - AO4	26,00	22,00	-4,00
		T3 - AO5	18,00	20,00	2,00
		T3 - AO6	23,00	26,00	3,00
		T3 - AO7	19,00	26,00	7,00
		T3 - AO8	19,00	19,00	0,00
	Replica B	T3 - B01	24,00	23,50	-0,50

	T3 - B02	19,00	19,00	0,00
	T3 - B03	21,00	15,00	-6,00
	T3 - B04	23,00	25,00	2,00
	T3 - B05	17,50	13,00	-4,50
	T3 - B06	19,00	23,50	4,50
	T3 - B07	24,00	18,00	-6,00
	T3 - B08	22,00	19,00	-3,00
	T3 - C01	19,00	21,00	2,00
	T3 - C02	12,00	19,00	7,00
	T3 - C03	22,00	25,50	3,50
Replica C	T3 - C04	19,00	20,00	1,00
	T3 - C05	23,00	21,00	-2,00
	T3 - C06	18,00	22,00	4,00
	T3 - C07	13,00	24,00	11,00
	T3 - C08	20,00	22,00	2,00

Apéndice 21

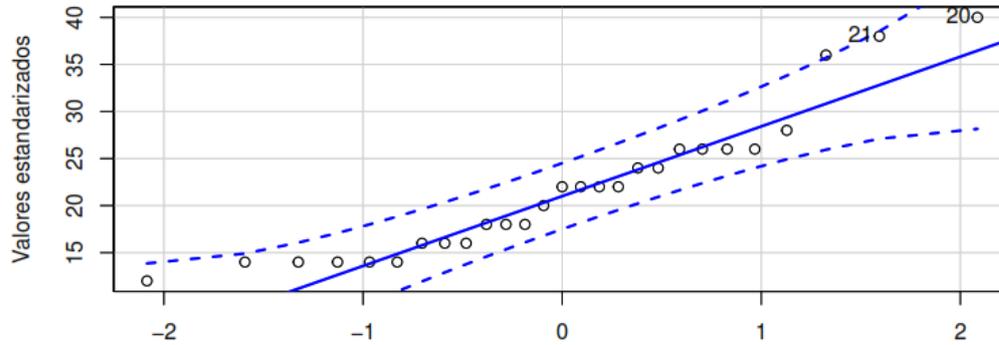
Variación de la longitud de raíz de la *Eichhornia Crassipes*

Tratamientos	Replicas	Código de planta	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	variación (g)
Tratamiento 1	Replica A	T1 - A01	607,00	607,00	0,00
		T1 - A02	634,00	661,00	27,00
		T1 - A03	631,00	612,00	-19,00
	Replica B	T1 - B01	691,00	682,00	-9,00
		T1 - B02	649,00	652,00	3,00
		T1 - B03	604,00	617,00	13,00
	Replica C	T1 - C01	643,00	646,00	3,00
		T1 - C02	619,00	634,00	15,00
		T1 - C03	575,00	572,00	-3,00
Tratamiento 2	Replica A	T2 - AO1	590,00	661,00	71,00
		T2 - AO2	648,00	574,00	-74,00
		T2 - AO3	624,00	607,00	-17,00
		T2 - AO4	621,00	629,00	8,00
		T2 - AO5	703,00	596,00	-107,00
		T2 - AO6	676,00	606,00	-70,00
	Replica B	T2 - B01	654,00	640,00	-14,00
		T2 - B02	614,00	616,00	2,00
		T2 - B03	633,00	605,00	-28,00
		T2 - B04	639,00	618,00	-21,00
		T2 - B05	596,00	596,00	0,00
		T2 - B06	642,00	619,00	-23,00
	Replica C	T2 - C01	635,00	572,00	-63,00
		T2 - C02	592,00	633,00	41,00
		T2 - C03	587,00	630,00	43,00
		T2 - C04	605,00	641,00	36,00
		T2 - C05	602,00	684,00	82,00
		T2 - C06	600,00	642,00	42,00
Tratamiento 3	Replica A	T3 - AO1	695,00	627,00	-68,00
		T3 - AO2	687,00	630,00	-57,00
		T3 - AO3	639,00	617,00	-22,00
		T3 - AO4	797,00	663,00	-134,00
		T3 - AO5	589,00	565,00	-24,00
		T3 - AO6	630,00	624,00	-6,00
		T3 - AO7	620,00	632,00	12,00
		T3 - AO8	715,00	606,00	-109,00
	Replica B	T1- B01	587,00	633,00	46,00
		T1- B02	612,00	638,00	26,00

	T1- B03	658,00	679,00	21,00
	T1- B04	739,00	633,00	-106,00
	T1- B05	667,00	618,00	-49,00
	T1- B06	624,00	565,00	-59,00
	T1- B07	575,00	608,00	33,00
	T1- B08	684,00	704,00	20,00
	T3 - C01	627,00	698,00	71,00
	T3 - C02	615,00	640,00	25,00
	T3 - C03	662,00	587,00	-75,00
Replica C	T3 - C04	568,00	625,00	57,00
	T3 - C05	609,00	660,00	51,00
	T3 - C06	678,00	606,00	-72,00
	T3 - C07	645,00	550,00	-95,00
	T3 - C08	640,00	610,00	-30,00

Apéndice 22

Análisis de normalidad de plomo



Prueba de normalidad

H_o : Los datos proceden de una distribución normal

H_a : Los datos no proceden de una distribución normal

Shapiro-Wilk

```
shapiro.test(BD1$remoción)
```

Shapiro-Wilk normality test

data: BD1\$remoción

W = 0.89765, p-value = 0.01182

Comentario: Los datos no proceden de una distribución normal ($p < 0.05$)

Apéndice 23

Análisis de homocedasticidad de plomo

Prueba de homocedasticidad

H_o : Las varianzas son iguales en todos los grupos

H_a : Las varianzas son diferentes en todos los grupos

Prueba de Levene

```
Tratamiento<-factor(BD1$Cantidad)
leveneTest(BD1$remoción~Tratamiento,center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 2  2.3085 0.1211
    24
```

Comentario: Las varianzas son iguales en todos los grupos ($p > 0.05$)

Apéndice 24

Análisis ANOVA de plomo

Análisis de varianza (ANOVA)

```
attach(BD1)
```

La función **attach** sirve para desvincular las variables del conjunto de datos.

```
Tratamiento<-factor(BD1$Cantidad)  
remoción<-as.numeric(remoción)
```

Aquí se prepara las variables que van a ser consideradas como factor, es decir, en éste caso, factor es la cantidad de *Eichhornia crassipes* y la variable respuesta (numérica) es el % de remoción de Pb.

Planteamiento de hipótesis para el ANOVA

Para realizar el análisis de varianza (ANOVA), el orden de las variables es el siguiente:
y~x, donde:

y: % de remoción de Pb

x: Cantidad de *Eichhornia crassipes* (Tratamiento)

H_o : El % de remoción de Pb mediano es igual en las tres cantidades de *Eichhornia crassipes*

H_a : El % de remoción de Pb mediano es diferente en al menos una de las tres cantidades de *Eichhornia crassipes*

```
KT<-kruskal.test(remoción~Tratamiento)  
KT
```

```
      Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data:  remoción by Tratamiento  
Kruskal-Wallis chi-squared = 14.571, df = 2, p-value = 0.0006855
```

Comentario: Se concluye que el % de remoción de Pb mediano es estadísticamente diferente en al menos una de las tres cantidades de *Eichhornia crassipes* ($p < 0.05$).

Apéndice 25

Análisis de comparaciones múltiples

Análisis de comparaciones múltiples

```
pairwise.wilcox.test(remoción,Tratamiento, p.adjust = "bonferroni", exact = FALSE )
```

```
Pairwise comparisons using Wilcoxon rank sum test with continuity correction
```

```
data: remoción and Tratamiento
```

```
      0.5 kg 1.0 kg  
1.0 kg 0.0630 -  
1.5 kg 0.0012 0.2761
```

```
P value adjustment method: bonferroni
```

Comentario: Se concluye que el % de remoción de Pb mediano es diferente estadísticamente entre las cantidades de 0.5 kg y 1.5 kg de *Eichhornia crassipes* ($p < 0.05$), respectivamente.

Apéndice 26

Cadena de custodia

Nombre de EPS/Municipio: MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE NUEVA CASARECA			
Nombre de PTAR: BOTADERO DE DISPOSICION FINAL DE RES			
Ubicación de PTAR: SECTOR RAMIRO PRIAZÉ			
Localidad	Distrito	Provincia	Departamento
RAMIRO PRIAZÉ	ENRAS SOBUN VARGAS	RIOSA	SAN MARTIN
IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO			
AFLUENTE			
Denominación del punto de muestreo (afluente)			
COORDENADAS U.T.M. (WGS84)			
Norte	Este	Zona UTM	Altitud
CAUDAL DE OPERACIÓN (promedio diario)		Método de medición	
EFLUENTE			
Denominación del punto de muestreo (efluente)		PUNTO DE RECOLECCIÓN DE DIXIVADOS	
COORDENADAS U.T.M. (WGS84)			
Norte	Este	Zona UTM	Altitud
9331888,43	251324,56	18 S	340 msnm
CAUDAL DE OPERACIÓN (promedio diario)		Método de medición	
Datos del GPS (marca, modelo, número de serie, precisión del equipo)			
EQUIPO GPS PORTATIL MARCA GARMIN, MODELO HI9811-5			

En páginas aparte:

- Croquis de ubicación del punto de monitoreo 1.
2 fotografías del punto de monitoreo 1 (tomadas a 10m de distancia del punto de monitoreo y segunda más cercana al mismo).
- Croquis de ubicación del punto de monitoreo 2.
2 fotografías del punto de monitoreo 2 (tomadas a 10m de distancia del punto de monitoreo y segunda más cercana al mismo).
- Flujograma de procesos de tratamiento con la información básica de cada uno de ellos.
- Caudal medio anual de la PTAR, registrado según la frecuencia indicada en el anexo II.

Para el reporte inicial y en caso de ausencia de registros según la frecuencia indicada en el Anexo II, indicar el caudal promedio anual sustentado con resultados de medición según otra frecuencia con otro sustento técnico, por ejemplo, información del diseño de la PTAR. Indicar frecuencia monitoreo aplicable según el Anexo N° II.

RAMIRO PRIAZÉ, 07 de diciembre del 2017
Nombres y apellido
Responsable de la PT

Anexo N° IV
REGISTRO DE DATOS DE CAMPO

Nombre de la PTAR: BOTADERO DE DISPOSICION FINAL DE RES DZ DISTRITO DE NUEVA CASAMARCA			
AFLUENTE			
Denominación del punto de monitoreo:			
Fecha	Hora	pH	Temperatura
Eventuales observaciones al punto de monitoreo			
Características del agua residual			
EFLUENTE			
Denominación del punto de monitoreo: PUNTO DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS			
Fecha	Hora	pH	Temperatura
07/12/2020	16:00 PM	7,7	26 °C
Eventuales observaciones al punto de monitoreo			
Características del agua residual			
LIXIVIADOS DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES			

(*) Caudal de afluente y efluente en el momento del monitoreo

Botadero de Disposición Final de Residuos del 2020

Nombres y apellidos
Responsable de Monitoreo

Nota: Los laboratorios acreditados ante INDECOPI pueden utilizar su propio formato para el registro de datos de campo.

Anexo N° V

ETIQUETA PARA MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL

La etiqueta de identificación de la muestra debe contener los siguientes datos:

Etiqueta adhesiva para etiquetar los frascos o bolsas de la toma de muestras de 12 cm X 8,5 cm.

Nombre de la PTAR: BOTADERO DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS	
Denominación del punto de monitoreo (afluente o efluente): POZO DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS (EFLENTE)	
No. de muestra (orden de toma de muestra)	MUESTREO CONTROL (M0)
Fecha y hora	07/12/2020 - 16:00 PM
Ensayo físico químico	<input type="checkbox"/> DBO <input type="checkbox"/> DQO <input type="checkbox"/> AyG <input checked="" type="checkbox"/> SST
Ensayo microbiológico	<input type="checkbox"/> CTT
Otros parámetros	Plomo (Pb)
Otros parámetros	—
Preservación	—
Operador del muestreo	ALVIN MUÑOZ DIAZ

Nota: Los laboratorios acreditados ante INDECOPi pueden utilizar su propia etiqueta para muestras de agua residual.

Anexo N° VI
REGISTRO DE CADENA DE CUSTODIA

Nombre de la PTAR: <u>BOTADERO DE DISPOSICION FINAL DE RES-5 DEL DISTRITO DE NUEVA CASAHUECA</u>													
Muestra No.	Afluente	Efluente	Fecha	Hora toma de muestra	Tipo de frasco	Volumen	Reactivos preservación	Parámetro a ser medido					Observaciones
								AVG	DBO	DQO	SST	CTT	
MUESTREO CONTROL (H0)	—	PUNTO DE RECOPACION DE ARIUNAPAS	07/12/20	16:00 pm	Plastico HDPE	500 ml	—	✓				✓	—
Hora de entrega al medio de transporte <u>16:30 pm</u>													

Responsable de la PTAR			Operador del muestreo			Custodio de la muestra			Recepción en laboratorio				
Nombre y apellidos	Institución	Firma	Nombre y apellidos	Institución	Firma	Nombre y apellidos	Institución	Firma	Nombre y apellidos	Institución	Firma	Hora	Fecha
—	—	—	AYLAO RUBEN DIAZ	UCSS		GERARDO MARIANO TOSCO	UCSS		ENRIQUE SANCHEZ LOPEZ CHAVEZ	LABORATORIO DE ANALISIS DE AGUAS S.A.		18:00 pm	07/12/2020

Nota: Los laboratorios acreditados ante INDECOPi pueden utilizar su propio formato de Cadena de Custodia.

Anexo N° VI
REGISTRO DE CADENA DE CUSTODIA

Nombre de la PTAR: <u>PODERADO DE DISPOSICION FIAVIZ DE ERSS DEL DISTRITO DE NUEVA CASAPALCA</u>													
Muestra No.	Afluente	Efluente	Fecha	Hora toma de muestra	Tipo de frasco	Volumen	Reactivos preservación	Parámetro a ser medido					Observaciones
								AYG	DBO	DQO	SST	CTT	
PRINCE MUESTREO (H.S.)	—	3 TRINERO MIENTOS	07/12/20	16:00pm	FRASCO HDPE	500 ml	—		✓			✓	—
Hora de entrega al medio de transporte			16:30 pm										

Responsable de la PTAR			Operador del muestreo			Custodio de la muestra			Recepción en laboratorio				
Nombre y apellidos	Institución	Firma	Nombre y apellidos	Institución	Firma	Nombre y apellidos	Institución	Firma	Nombre y apellidos	Institución	Firma	Hora	Fecha
—	—	—	DAVID MONOZ DIAZ	DCSS	<i>[Firma]</i>	GERARDO MORALES TORO	DCSS	<i>[Firma]</i>	SERGIO RAMIREZ CHAVEZ	LABORATORIO PARAQUINHO DE ERSS CASAPALCA	<i>[Firma]</i>	18:00pm	07/12/2020

Nota: Los laboratorios acreditados ante INDECOPi pueden utilizar su propio formato de Cadena de Custodia.

