



Esta obra está bajo una

[Licencia Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[Atribución - 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Vea una copia de esta licencia en

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>





FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:

Gary Anthony Huamán Delgado

<https://orcid.org/0009-0007-3504-9460>

Asesor:

Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza

<https://orcid.org/0000-0003-1396-9745>

Moyobamba, Perú

2025



FACULTAD DE ECOLOGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

Tesis

Eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero

Para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario

Autor:

Gary Anthony Huamán Delgado

Sustentado y aprobado el 10 de noviembre del 2025, ante el honorable jurado:

Presidente de Jurado
Blga. Dra. Astriht Ruiz Ríos

Secretario de Jurado
Ing. M.Sc. Roydichan Olano Arévalo

Vocal de Jurado
Ing. M.Sc. Luis Armando Cuzco Trigozo

Asesor
Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza

Moyobamba, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



ACTA DE SUSTENTACIÓN DEL INFORME FINAL DE TESIS CONDUCENTES A
TÍTULO PROFESIONAL N° 059-2025-UNSM/EPIS/UI

Jurado reconocido con Resolución N° 435-2022-UNSM/CFT/FE, Moyobamba 30 de noviembre del 2022, modificado con Resolución N° 147-2025-UNSM/CFT/FE, Moyobamba 27 de marzo de 2025.

FACULTAD DE ECOLOGÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA

PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA SANITARIA

A las 11:00 horas, del día lunes 10 de noviembre de 2025, inició el acto público de sustentación del informe final de tesis “Eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero” para optar el título profesional de Ingeniero Sanitario, presentado por Gary Anthony Huamán Delgado con la asesoría del Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza.

Instalada la Mesa Directiva conformada por la Blga. Dra. Astriht Ruiz Ríos (Presidente del jurado), Ing. M.Sc. Roydichan Olano Arévalo (Secretario), Ing. M.Sc. Luis Armando Cuzco Trigozo (Vocal) y acompañado por el Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza, el presidente del jurado dirige brevemente unas palabras y a continuación el secretario dio lectura a la Resolución N° 413-2023-UNSM/CF/FE, de fecha 28 de setiembre de 2023.

Seguidamente el autor expuso el informe final de tesis y el jurado realizó las preguntas pertinentes, respondida por el sustentante y eventualmente, con la venia del jurado, por el asesor.

Una vez terminada la ronda de preguntas el jurado procedió a deliberar para determinar la calificación final, para lo cual dispuso un receso de quince (15) minutos, con participación del asesor con voz, pero sin voto; sin la presencia del sustentante y otros participantes del acto público.

Luego de aplicar los criterios de calificación con estricta observancia del principio de objetividad y de acuerdo con los puntajes en escala vigesimal (de 0 a 20), según el Anexo 4.2 del RG-CTI, la nota de sustentación otorgada resultante del promedio aritmético de los calificativos emitidos por cada uno de los miembros del jurado fue.. QUINISE.....(15), tal como se deja constar en la siguiente descripción.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE ECOLOGÍA
Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria



De acuerdo con el Artículo 40° del RG-CTI, la nota obtenida es APROBATORIA y correspondiente a la calificación de BUENO. Leído este resultado en presencia de todos los participantes del acto de sustentación, el secretario dio lectura a las observaciones subsanables al informe final que el autor deberá corregir y alcanzar al jurado en un plazo máximo de treinta (30) días calendarios.

Se deja constancia que la presente acta se inscribe en el Libro de Sustentaciones N° 002 del Programa de Estudios de Ingeniería Sanitaria de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ecología de la UNSM.

Firman los integrantes de la Mesa Directiva y el autor del informe final de tesis en señal de conformidad, dando por concluido el acto a las 12:45 horas, el mismo día lunes 10 de noviembre de 2025.

Blga. Dra. Astriht Ruiz Ríos
Presidente del Jurado

Ing. M.Sc. Roydichan Olano Arévalo
Secretario del Jurado

Ing. M.Sc. Luis Armando Cuzco Trigozo
Vocal del Jurado

Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza
Asesor

Gary Anthony Huamán Delgado
Autor

Declaratoria de autenticidad

Gary Anthony Huamán Delgado, con DNI N° 74629278, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ecología de la Universidad Nacional de San Martín, autor de la tesis titulada: Eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero.

Declaro bajo juramento que:

1. La tesis presentada es de mi autoría.
2. La redacción fue realizada respetando las citas y referencia de las fuentes bibliográficas consultadas, siguiendo las normas APA actuales.
3. Toda información que contiene la tesis no ha sido plagiada.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido alterados ni copiados, por tanto, la información de esta investigación debe considerarse como aporte a la realidad investigada.

Por lo antes mencionado, asumo bajo responsabilidad las consecuencias que deriven de mi accionar, sometiéndome a las leyes de nuestro país y normas vigentes de la Universidad Nacional de San Martín.

Moyobamba, 10 de noviembre de 2025.



Gary Anthony Huamán Delgado

DNI N° 74629278



Ficha de identificación

<p>Título: Eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero</p>	<p>Área de investigación: Ciencia y Tecnología Ambiental. Línea de investigación: Saneamiento Básico Ambiental. Sublínea de investigación: Tratamiento del agua Grupo de investigación: Tecnologías de tratamiento del agua (Resolución N° 251-2022-UNSM/CFT/FE, Moyobamba). Tipo de investigación: Básica <input type="checkbox"/>, Aplicada <input checked="" type="checkbox"/>, Desarrollo experimental <input type="checkbox"/></p>
<p>Autor: Gary Anthony Huamán Delgado</p>	<p>Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0009-0007-3504-9460</p>
<p>Asesor: Ing. Dr. Yrwin Francisco Azabache Liza</p>	<p>Dependencia local de soporte: Facultad de Ecología Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria Unidad o Laboratorio Ingeniería Sanitaria https://orcid.org/0000-0003-1396-9745</p>

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Regner y Estala, quienes siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo incondicional durante toda esta etapa de estudios. Me inculcaron valores sólidos y me enseñaron a ser una persona esforzada. Sé que su ayuda y sus consejos fueron fundamentales para que este logro académico fuera posible.

También dedico este trabajo a mi hermano Andy, quien, aunque es menor que yo, con su responsabilidad e independencia me inspira y me llena de orgullo. Estoy seguro de que, a su tiempo, será una excelente persona y un gran profesional.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios. Estoy seguro de que sin su ayuda nada de esto habría sido posible. Él es quien me da la vida, la salud y las fuerzas cada día. Aunque el camino no fue sencillo, fue Él quien me ayudó a sobreponerme cuando sentía que continuar no tenía sentido. Si he llegado hasta aquí, es gracias a Él.

También agradezco a mis padres y a mi hermano. Su apoyo fue esencial para seguir adelante y no desmayar. Ellos son un pilar fundamental en mi vida.

Y, por supuesto, agradezco a mi asesor, el Ing. Yrwin Francisco Azabache Liza, por su disposición, su valioso aporte y su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Índice general

Ficha de identificación.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos	8
Índice general.....	9
Índice de tablas	12
Índice de figuras.....	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN	16
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	18
2.1. Antecedentes de la investigación.....	18
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	18
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	19
2.1.3. Antecedentes regionales	20
2.2. Fundamentos teóricos.....	20
2.2.1. La industria del camal o mataderos	20
2.2.2. Agua residual.....	21
2.2.3. Tasa de absorción de oxígeno (TAO).....	24
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1. Ámbito y condiciones de la investigación	25
3.1.1. Contexto de la investigación.....	25
3.1.2. Periodo de ejecución	25
3.1.3. Autorizaciones y permisos.....	25
3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad	25
3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales	25
3.2. Sistema de variables.....	25
3.2.1. Variables principales.....	25
3.3. Procedimientos de la investigación	26
3.3.1. Diseñar el humedal artificial y el sistema de lombrifiltro.....	26

3.3.2. Análisis de la tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de humedal artificial	29
3.3.3. Análisis de la tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de lombrifiltro.....	30
3.3.4. Determinación del porcentaje de eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial, en la absorción de oxígeno en aguas residuales del Matadero Municipal	30
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	
4.1. Diseño del humedal artificial y el sistema de lombrifiltro	31
4.1.1. Diseño del Lombrifiltro	31
4.1.2. Diseño del Humedal Artificial.....	33
4.2. Tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de humedal artificial.....	35
4.2.1. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización inicial del sistema lombrifiltro:	35
4.2.2. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización dos del sistema humedal artificial	36
4.2.3. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización tres el sistema humedal artificial	37
4.2.4. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cuatro el sistema humedal artificial	38
4.2.5. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cinco el sistema humedal artificial	38
4.2.6. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización seis el sistema humedal artificial:	39
4.3. Tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de lombrifiltro	40
4.3.1. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización inicial del sistema lombrifiltro:	40
4.3.2. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización dos del sistema lombrifiltro.....	40
4.3.3. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización tres el sistema lombrifiltro:.....	41

4.3.4. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cuatro el sistema lombrifiltro:	42
4.3.5. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cinco el sistema lombrifiltro:	42
4.3.6. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización seis el sistema lombrifiltro:.....	43
4.4. Porcentaje de eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial, en la absorción de oxígeno en aguas residuales del Matadero Municipal	44
4.4.1. Resultados del porcentaje de eficiencia del oxígeno disuelto y la tasa de absorción del oxígeno del sistema humedal artificial.....	44
4.4.2. Resultados del porcentaje de eficiencia del oxígeno disuelto y la tasa de absorción del oxígeno del sistema lombrifiltro	47
4.4.3. Análisis estadístico para evaluar la significancia de los sistemas en la tasa de absorción de oxígeno.	49
4.5. Discusión	49
CONCLUSIONES	52
RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS	59
Anexo 1. Plano de lombrifiltro	59
Anexo 2. Plano del humedal artificial	60
Anexo 3. Plano de cámara de rejillas y trampa de grasas	61
Anexo 4. Plano de tanque séptico	62
Anexo 5. Plano de cámara distribuidora de caudal.....	63
Anexo 6. Plano de vista general	64
Anexo 7. Registro fotográfico.....	65
Anexo 8. Metrados y presupuestos (lombrifiltro).....	70
Anexo 9. Metrados y presupuestos (humedal artificial)	71

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de mataderos.	20
Tabla 2. Dimensionamiento del lombrifiltro.....	26
Tabla 3. Procedimientos de medición de los parámetros de estudio.....	29
Tabla 4. Datos iniciales para el diseño del lombrifiltro.....	32
Tabla 5. Dimensionamiento del Lombrifiltro.	32
Tabla 6. Datos iniciales para el diseño del humedal artificial.....	34
Tabla 7. Dimensionamiento del humedal artificial.	34
Tabla 8. Resultados del muestreo inicial.....	36
Tabla 9. Resultados del segundo muestreo.	36
Tabla 10. Resultados del tercer muestreo.....	37
Tabla 11. Resultados del muestreo cuatro.....	38
Tabla 12. Resultados del muestreo cinco.....	38
Tabla 13. Resultados del muestreo seis.....	39
Tabla 14. Resultados del muestreo inicial.....	40
Tabla 15. Resultados del segundo muestreo.	41
Tabla 16. Resultados del tercer muestreo.....	41
Tabla 17. Resultados del cuarto muestreo.....	42
Tabla 18. Resultados del muestreo cinco.....	43
Tabla 19. Resultados del muestreo seis.....	43
Tabla 20. Resultados del porcentaje de eficiencia de oxígeno disuelto – humedal artificial.....	44
Tabla 21. Resultados del porcentaje de eficiencia de la TAO – humedal artificial.....	46
Tabla 22. Resultados del porcentaje de eficiencia de oxígeno disuelto – lombrifiltro. .	47
Tabla 23. Resultados del porcentaje de eficiencia de la TAO – lombrifiltro.....	48
Tabla 24. Resultados del ANOVA para la TAO en ambos sistemas.....	50

Índice de figuras

Figura 1. Vista superior del esquema del sistema lombrifiltro.....	33
Figura 2. Vista frontal del esquema del sistema lombrifiltro.....	33
Figura 3. Vista superior del esquema del sistema humedal artificial.	35
Figura 4. Vista de frontal del sistema humedal artificial.....	35
Figura 5. % eficiencia de oxígeno disuelto – humedal artificial.....	45
Figura 6. % eficiencia de la TAO – humedal artificial.	46
Figura 7. % eficiencia de oxígeno disuelto – lombrifiltro.....	47
Figura 8. % eficiencia de la TAO – lombrifiltro.....	48

RESUMEN

Eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero

La investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia del lombrifiltro y el humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en las aguas residuales generadas en el Matadero Municipal de Moyobamba. El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Moyobamba, en la región San Martín, Perú, durante un periodo de tres meses, analizando el impacto de ambos sistemas en la calidad del agua tratada. Se diseñaron y construyeron ambos sistemas, utilizando un lombrifiltro con lombrices de las especies *Eisenia foetida* y *Lumbricus terrestris*, y un humedal artificial plantado con Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). Los procedimientos principales incluyeron la toma de muestras de agua antes y después del tratamiento, con un análisis de oxígeno disuelto, pH, y tasa de absorción de oxígeno (TAO). Los resultados mostraron que ambos sistemas aumentaron significativamente la oxigenación del agua, con el lombrifiltro mostrando un aumento en la TAO de hasta 43,64 mg/L/h, mientras que el humedal artificial presentó un incremento más moderado, de 0,45 mg/L a 0,84 mg/L de oxígeno disuelto. Estos resultados indican que el lombrifiltro es más adecuado para aguas residuales con alta carga orgánica, como las provenientes de mataderos, mientras que el humedal artificial resulta eficaz para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Las conclusiones destacan la efectividad de ambos sistemas como tecnologías sostenibles y de bajo costo, recomendándose su implementación en comunidades rurales como alternativas viables para mejorar la calidad del agua y promover la sostenibilidad ambiental. Este estudio contribuye al conocimiento sobre el tratamiento biológico de aguas residuales, destacando la importancia de optimizar estos sistemas para adaptarlos a diferentes condiciones de tratamiento.

Palabras clave: lombrifiltro, humedal artificial, tasa de absorción de oxígeno, tratamiento de aguas residuales, sostenibilidad.

ABSTRACT

Efficiency of the Vermifilter and Constructed Wetland on the Oxygen Absorption Rate in Slaughterhouse Wastewater

This research aimed to evaluate the efficiency of a vermifilter and a constructed wetland in enhancing the oxygen absorption rate in wastewater generated at the Municipal Slaughterhouse of Moyobamba. The study was conducted in the city of Moyobamba, San Martín region, Peru, over a three-month period, assessing the impact of both systems on the quality of the treated water. Both treatment systems were designed and constructed for this purpose, using a vermifilter inoculated with earthworms of the species *Eisenia foetida* and *Lumbricus terrestris*, and a constructed wetland planted with vetiver (*Chrysopogon zizanioides*). The main procedures included the collection of water samples before and after treatment, followed by analyses of dissolved oxygen, pH, and oxygen absorption rate (OAR). The results demonstrated that both systems significantly increased water oxygenation. The vermifilter exhibited an increase in the oxygen absorption rate of up to 43.64 mg/L/h, whereas the constructed wetland showed a more moderate improvement, with dissolved oxygen increasing from 0.45 mg/L to 0.84 mg/L. These findings indicate that the vermifilter is more suitable for wastewater with high organic loads, such as that generated by slaughterhouses, while the constructed wetland is more effective for the treatment of domestic wastewater. The conclusions highlight the effectiveness of both systems as sustainable and low-cost technologies, recommending their implementation in rural communities as viable alternatives for improving water quality and promoting environmental sustainability. This study contributes to the body of knowledge on biological wastewater treatment, emphasizing the importance of optimizing these systems to adapt them to different treatment conditions.

Keywords: *Vermifilter, constructed wetland, oxygen absorption rate, wastewater treatment, sustainability.*



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

La problemática ambiental asociada a la gestión de aguas residuales de mataderos representa un desafío creciente en la búsqueda de soluciones sostenibles y eficaces (Montero-Vega et al., 2020). El aumento constante en la producción de carne y productos cárnicos a nivel global ha llevado a un incremento en la generación de aguas residuales, que suelen estar cargadas de compuestos orgánicos y nutrientes, así como a menudo presentan altas concentraciones de materia suspendida y contaminantes microbiológicos (Rouland et al., 2024; Sandoval & Salazar, 2021). La inadecuada disposición de estas aguas residuales puede causar impactos ambientales significativos, como la eutrofización de cuerpos de agua receptores y la contaminación del suelo, lo que a su vez puede afectar negativamente la salud pública y la biodiversidad (Ilyas et al., 2019; Liu et al., 2021).

La industria del camal se encuentra muy ligada a la generación elevada de carga de materia orgánica, ya que los residuos generados en el proceso entran en contacto directo con el agua, llevando a su paso altas cantidades de material orgánico e inorgánico en forma soluble o particulado, dando pase a la generación de aguas residuales, las cuales en su mayoría son arrojadas a una fuente natural de agua cercana o a las redes de alcantarillado sin tratamiento alguno (Valenzuela, 2021; Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2015).

A nivel mundial uno de los problemas ambientales con mayor importancia en los últimos tiempos, son la generación de cantidades elevadas de aguas residuales sin tratamiento alguno, tanto urbanas como industriales (Jones et al., 2021). Así mismo, la cobertura de tratamiento ha mostrado un incremento notable desde finales de los años noventa y en la actualidad representan el 20 % y 30 % de aguas residuales, estas aguas tratadas son aptas para ser parte de una fuente hídrica de aprovisionamiento, más que todo en aquellas que se encuentran situadas en zonas áridas (Bernal et al., 2021).

En el Perú, se estima que diariamente se generan alrededor de 2 217 946 m³ de aguas residuales, de las cuales solo el 32 % recibe algún tipo de tratamiento, mientras que el resto es vertido directamente a cuerpos naturales de agua, generando un grave impacto ambiental (SUNASS, 2015). La localidad de Moyobamba refleja esta problemática, ya que las aguas residuales provenientes del matadero municipal, producto del faenado de ganado vacuno y porcino, son descargadas sin tratamiento previo hacia un flujo hídrico ubicado detrás del establecimiento (Saldaña, 2019). Esta práctica altera las

características físicas, químicas y biológicas del agua, afectando su calidad y propiciando la presencia de vectores como gallinazos y roedores, los cuales representan un riesgo para la salud pública (Panduro, 2017).

En la búsqueda de alternativas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales de matadero, destacan los sistemas naturales como los lombrifiltros y los humedales artificiales, que utilizan procesos biológicos para reducir contaminantes de forma eficiente y ecológica (Galindo et al., 2024). Un parámetro clave para evaluar su desempeño es la tasa de absorción de oxígeno (TAO), indicador del consumo de oxígeno disuelto necesario para los procesos metabólicos de los microorganismos involucrados (Poole & Jones, 2017). La eficacia de estos sistemas depende de mantener niveles adecuados de oxígeno, lo que influye directamente en la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Saapi et al., 2024).

El presente estudio evalúa la eficiencia del lombrifiltro y del humedal artificial como alternativas ecológicas y de bajo costo para tratar efluentes del matadero municipal, con el propósito de reducir la carga contaminante y mitigar los impactos ambientales. Se analiza su capacidad para mejorar la tasa de absorción de oxígeno (TAO), considerando factores determinantes como la carga orgánica, la densidad de lombrices, la vegetación acuática y las condiciones hidráulicas que influyen en su desempeño.

En este contexto, se plantea el siguiente problema de investigación: ¿Cuál es la eficacia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en las aguas residuales generadas en el Matadero Municipal de Moyobamba? Se formulan las siguientes hipótesis de investigación: H_0 : El lombrifiltro y humedal artificial no tienen un impacto significativo en la velocidad de consumo de oxígeno en las aguas residuales provenientes del Matadero Municipal de Moyobamba; H_1 : El lombrifiltro y humedal artificial tienen un impacto significativo en la velocidad de consumo de oxígeno en las aguas residuales provenientes del Matadero Municipal de Moyobamba.

Los objetivos de esta investigación son los siguientes: Evaluar la eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero, elaborar el diseño del humedal artificial y el sistema de lombrifiltro, analizar la tasa de absorción de oxígeno de los efluentes generados por las actividades municipales relacionadas con el agua pre y post tratamiento aplicando el sistema de humedal artificial, analizar la tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales provenientes del ámbito municipal pre y post tratamiento aplicando el sistema de lombrifiltro, y determinar el porcentaje de eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial, en la tasa absorción de oxígeno en aguas residuales del Matadero Municipal.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Nsiah-Gyambibi et al. (2023), Investigaron el desarrollo de una tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un sistema de vermifiltración asistido por macrófitas (MAV), que combina plantas acuáticas y lombrices para mejorar la eficiencia y reducir costos. El estudio evaluó el desempeño del MAV empleando tres especies de macrófitas (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* y *Spirodela sp.*) y dos especies de lombrices (*Eisenia foetida* y *Eudrilus eugeniae*). Los resultados demostraron que el sistema logró remover más del 60 % de sólidos y nutrientes, y más del 90 % de patógenos, sin diferencias significativas entre las especies utilizadas. Además, *Eudrilus eugeniae* presentó un mayor incremento de biomasa (5 – 10 % más) que *Eisenia foetida*. El MAV se propuso como una alternativa viable para complementar el tratamiento de aguas residuales domésticas en fosas sépticas, mejorando la aireación del sistema y la eficiencia del proceso de vermifiltración.

Saeed et al. (2022), Analizaron el tratamiento de aguas residuales drenadas y la estabilización de lodos mediante un sistema sin plantas y cuatro humedales con *Phragmites*, algunos asistidos con lombrices y celdas de combustible microbianas. Se obtuvieron eficiencias de remoción del 96 % para DBO₅, 99 % para DQO, 89 % para nitrógeno, 99 % para fósforo, 98 % para sólidos y 97 % para coliformes. Los mecanismos principales fueron la descomposición orgánica, la nitrificación, la desnitrificación y la adsorción en el medio filtrante. El sistema con plantas, lombrices y celda microbiana presentó el mayor contenido de sólidos totales y una producción de potencia de 60 mW/m³, demostrando alta eficiencia en el tratamiento y estabilización de lodos.

Chino (2024), Evaluó la eficiencia del sistema de lombrifiltro en el tratamiento de aguas residuales domésticas en el Centro Experimental Kallutaca, empleando lombrices californianas (*Eisenia foetida*) como agentes biológicos. El sistema, compuesto por capas filtrantes y 60 canastillas con aserrín como sustrato, fue analizado mediante parámetros físicos, químicos y biológicos antes y después del tratamiento. Los resultados mostraron una alta eficiencia en la reducción de turbidez y coliformes fecales y totales (86 % – 99 %), aunque la remoción de DBO₅ y DQO fue de solo 70 % y 32 %. Se observó que factores como la temperatura y la humedad influyen en la eficiencia del

sistema, recomendándose optimizar su diseño y operación para mejorar la eliminación de materia orgánica y cumplir con la normativa ambiental vigente.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Saboya (2021), Evaluó la eficiencia de *Lumbricus terrestris* y *Eisenia foetida* en el tratamiento de aguas residuales domésticas del distrito de Chachapoyas (Perú). Para ello, ambas especies fueron adaptadas durante siete días e inoculadas en un sistema de lombrifiltro conformado por dos estructuras de madera con cuatro capas y un tanque de almacenamiento de flujo continuo. Se analizaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua residual antes y después del tratamiento. Los resultados mostraron que *Eisenia foetida* alcanzó mayores porcentajes de remoción (92 % DBO₅, 86 % DQO, 78 % NT, 84,4 % turbidez, 93 % pH y 84 % CT) en comparación con *Lumbricus terrestris* (91 % DBO₅, 84 % DQO, 77 % NT, 83 % turbidez, 93 % pH y 80 % CT). Se concluyó que *Eisenia foetida* fue más eficiente en la depuración del agua residual, logrando un promedio de 87 % de remoción frente al 85 % de *Lumbricus terrestris*, resultados aceptables según el DS N.º 004-2017-MINAM.

Briceño & Rivera, (2024), Investigaron el deterioro del río Chiquito en Huamachuco, causado por la falta de tratamiento de las aguas residuales vertidas en el sector Alto Shamana. Evaluaron la eficacia de sistemas de biorremediación como alternativa técnica y económica para tratar dichas aguas, construyendo tres sistemas piloto: un control, un humedal con *Cortaderia selloana* (C) y un humedal híbrido con *Cortaderia selloana* y *Eisenia foetida* (CyE). Los resultados mostraron que el sistema CyE alcanzó la mayor eficiencia, con remociones de 87,92 % de CT, 85,06 % de DBO₅, 84,35 % de DQO y 72,04 % de SST. Además, diseñaron un humedal CyE industrial con costos de construcción y operación viables, concluyendo que este sistema constituye una alternativa sostenible y eficaz para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el sector Alto Shamana, cumpliendo con los parámetros del D.S. N.º 003-2010-MINAM.

Rodrigo & Vega (2020), Evaluaron la eficiencia de los biodigestores y los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas, comparando la remoción de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con los Límites Máximos Permisibles (LMP) del D.S. N.º 003-2010-MINAM. A partir de una revisión descriptiva de 25 estudios (10 de biodigestores y 15 de humedales artificiales), determinaron que los biodigestores alcanzaron menores porcentajes de remoción —70,02 % de SST, 42,68 % de DQO, 44,82 % de DBO₅ y 47,63 % de coliformes fecales— en comparación con los humedales artificiales, que lograron 82,77 %, 72,91 %, 78,03 % y 89,17 % respectivamente.

Concluyeron que los humedales artificiales son más eficientes y cumplen con los parámetros exigidos por la normativa ambiental peruana.

2.1.3. Antecedentes regionales

Ramirez (2023), Evaluó la eficiencia técnica del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales para la remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y *Escherichia coli*. La investigación, con enfoque cuantitativo y diseño no experimental transversal de tipo correlacional, se basó en la recolección y análisis de datos de experimentaciones previas con las especies *Canna spp.*, *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*. Además, se implementó un humedal artificial a pequeña escala con *Canna spp.*, cuyas muestras fueron analizadas tras 24 y 48 horas de tratamiento. Los resultados mostraron que *Canna spp.* fue la especie más eficiente, alcanzando una remoción del 95,92 % de DBO y del 99,99 % de *Escherichia coli*, siendo la alternativa más adecuada para el distrito Alberto Laveleau, provincia y región de San Martín.

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. La industria del camal o mataderos

Los mataderos o camales son instituciones en donde se realiza el procesamiento de bovinos y porcinos para la obtención de productos cárnicos y sub derivados. La finalidad de estos establecimientos es la producción de carne bajo condiciones higiénicas, desde el sacrificio, hasta la división de la carne para su respectiva comercialización. Así mismo en estos establecimientos se desarrollan diversas operaciones de manera estricta con la finalidad de simplificar la tarea de inspección correcta del procesamiento de la carne y la gestión de los residuos generados en el proceso, y así eliminar todo peligro que pueda presentarse en carnes infectadas y evitar que la misma llegue al público o contamine el entorno natural (Passos, 2022; Hannan, 2020).

2.2.1.1. Clasificación de los mataderos

Teniendo en cuenta lo establecido en el D.S. N° 015-2012-AG, los mataderos de animales se encuentran clasificados en 3 niveles, de acuerdo con su grado técnico de faena y disposición de infraestructuras y elementos utilizados:

Tabla 1

Clasificación de mataderos

Clasificación	Capacidad de Faenado Animal	Destino del Faenado
Categoría 1	Bovinos 10	Mercado local
	Porcinos o Camélidos 20 Ovinos o Caprinos	
Categoría 2	Mayor a categoría 1	Consumo solo nacional
Categoría 3	Mayor a categoría 1 y 2	Consumo nacional y exportación

Nota. Fuente (D.S. N° 015-2012-AG)

2.2.1.2. Etapas de un proceso de faenamiento

De acuerdo con el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA, 2020), el proceso de faenamiento se desarrolla a través de las siguientes etapas:

- **Recepción de animales:** Se registran los datos del responsable, la procedencia, cantidad, sexo de los animales y el Certificado Sanitario emitido por SENASA.
- **Alojamiento:** Los animales son conducidos a corrales donde permanecen entre 6 y 12 horas antes del sacrificio, con acceso únicamente a agua para favorecer su descanso.
- **Inspección ante mortem:** El veterinario del matadero evalúa el estado de salud de los animales, determinando su aptitud para el faenamiento.
- **Lavado previo:** Se eliminan las impurezas del cuerpo del animal para prevenir contaminación durante el proceso.
- **Aturdimiento:** El animal es dejado inconsciente para evitar dolor y sufrimiento durante el degüello.
- **Izado y degüello:** Una vez aturdido, el animal se cuelga por la pata posterior y se realiza el corte que permite el desangrado completo.
- **Desprendimiento de apéndices y desollado:** Se retiran la cabeza, las patas y la piel bajo condiciones sanitarias supervisadas.
- **Eviscerado:** Se abre la cavidad torácica y abdominal para extraer las vísceras y órganos internos.
- **Inspección post mortem:** El veterinario revisa la carne y órganos para descartar patologías o contaminaciones.
- **Limpieza y pesado:** Finalmente, se limpia la carne, se eliminan residuos y se procede al pesado y registro del producto final.

2.2.2. Agua residual

Se define como agua residual a toda agua cuyas características originales han sido modificadas por el desarrollo de diversas actividades humanas, por lo cual requieren de tratamiento antes de su reutilización, su vertimiento a los cuerpos naturales hídricos o a las redes de alcantarillado (Fahim & Said, 2023).

Según el uso que se les ha dado, las aguas residuales se clasifican en domésticas, municipales o industriales, así mismo se diferencian por sus composiciones (Shah, 2022).

2.2.2.1. Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales tiene como objetivo principal eliminar los materiales contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, que pueden encontrarse en el agua en forma de partículas sólidas o en suspensión. Este proceso busca alcanzar una calidad del efluente que cumpla con los límites establecidos en la normativa vigente sobre descargas (Adalberto & Sagastume, 2013; Drinan & Spellman, 2013).

2.2.2.2. Niveles de tratamiento de aguas residuales

Las diferentes etapas de tratamiento que se aplica a las aguas residuales dependen mucho del uso que les ha dado o finalidad del uso previsto para el agua tratada, la cual está determinada por la normatividad (Barrett, 2014).

a) Tratamiento preliminar

Comprende la extracción de aquellas materias que puedan generar problemas en las operaciones de mantenimiento y en el mismo proceso de tratamiento. Por ejemplo, la extracción de ramas, piedras, plásticos, etc (Parray et al., 2025).

b) Tratamiento primario

El tratamiento primario tiene como objetivo remover las partículas sólidas orgánicas e inorgánicas que se sedimentan en el fondo, reduciendo así la carga que pasa al tratamiento biológico. En esta etapa se utilizan unidades como tanques Imhoff, sedimentadores y sistemas de flotación (Parray et al., 2025).

c) Tratamiento secundario

Durante esta fase del proceso de tratamiento, se lleva a cabo la eliminación de la materia orgánica biodegradable preferiblemente mediante la aplicación de sistemas biológicos debido a su bajo costo y su elevada eficiencia (Parray et al., 2025).

2.2.2.3. Sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales

a) Lombrifiltro

El lombrifiltro es un sistema natural de tratamiento de aguas residuales que utiliza lombrices de tierra para degradar la materia orgánica presente en el agua. Estas lombrices consumen los restos biodegradables y producen humus de lombriz, un abono orgánico de gran valor, estable e inodoro (Drinan & Spellman, 2013).

- Sistema Tohá

El Sistema Tohá es un método natural de tratamiento de aguas residuales que combina capas de materiales filtrantes y lombrices. El agua atraviesa progresivamente estos filtros, donde la materia orgánica es retenida y degradada biológicamente, generando

humus y una flora bacteriana que favorece la purificación del agua. Este proceso es continuo, ecológico y libre de olores (Tohá, 2016).

Entre sus principales ventajas destacan:

- No genera lodos residuales.
- Mantiene la porosidad del filtro, evitando obstrucciones.
- Los sólidos orgánicos son digeridos por las lombrices, reduciendo taponamientos.
- Es ecológico, económico y adaptable a distintas escalas.
- Produce abono orgánico de alta calidad como subproducto (Tohá, 2016).

- **Lombriz Californiana (*Eisenia foetida*)**

La lombriz californiana pertenece a la familia *Lumbricidae* y es una de las especies más utilizadas en el tratamiento biológico de residuos. Se destaca por su alta capacidad de digestión y reproducción, lo que la hace ideal para la producción de humus de lombriz, un abono orgánico que mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Vásquez & Ballesteros, 2008).

b) Humedal artificial

Los humedales artificiales son sistemas diseñados para el tratamiento natural de aguas residuales, formados por plantas acuáticas (macrófitas) enraizadas en un lecho de grava. Estas plantas permiten procesos físicos, químicos y biológicos que purifican el agua de forma progresiva (Kumar et al., 2025; Shah, 2023).

- **Clasificación**

Según el tipo de vegetación, los humedales artificiales se dividen en:

- Con hojas flotantes: utilizan plantas como el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*).
- Con macrofitas sumergidas: incluyen helechos, musgos y angiospermas acuáticas.
- Con macrofitas enraizadas: plantas que crecen en suelos saturados, generalmente perennes y con órganos reproductores flotantes (Stefanakis, 2022).

- **Mecanismos en la remoción de contaminantes.**

En los humedales artificiales se desarrollan procesos físicos, químicos y biológicos que permiten eliminar los contaminantes del agua residual. Cada componente del sistema cumple una función específica en esta depuración (Langergraber et al., 2020).

Los principales mecanismos son:

- Remoción de sólidos suspendidos: los filtros naturales del humedal retienen y sedimentan las partículas que no fueron eliminadas en tratamientos previos.
- Remoción de materia orgánica: se realiza principalmente mediante biodegradación anaeróbica, donde los microorganismos descomponen la materia orgánica.
- Remoción de nitrógeno: ocurre a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación, que transforman y eliminan compuestos nitrogenados.
- Remoción de bacterias: se logra por acción combinada de la filtración, la exposición solar y la actividad microbiana del sistema (Shah, 2023).

2.2.3. Tasa de absorción de oxígeno (TAO)

La tasa de absorción de oxígeno (TAO) representa la velocidad a la que el oxígeno disuelto es utilizado por los microorganismos presentes en un sistema acuático o de tratamiento de aguas residuales. Este parámetro refleja la intensidad de la actividad biológica y la cantidad de materia orgánica biodegradable en el medio. En el ámbito ambiental, la TAO se emplea como indicador de la calidad del agua, ya que valores elevados evidencian una alta carga orgánica y, por tanto, una mayor demanda de oxígeno, lo que puede reducir la disponibilidad de este gas para otros organismos acuáticos. En cambio, una disminución de la TAO tras el tratamiento indica una eficiencia en la depuración biológica y un mejoramiento de la calidad del efluente. No obstante, para confirmar si el efluente cumple con los estándares ambientales, también deben evaluarse parámetros como la DBO₅ y la DQO (ASCE, 2022).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ámbito y condiciones de la investigación

3.1.1. Contexto de la investigación

Ubicación geográfica del proyecto:

- Departamento : San Martín
- Provincia : Moyobamba
- Distrito : Moyobamba
- Área de estudio : Camal Municipal de Moyobamba

3.1.2. Periodo de ejecución

La investigación se llevó a cabo desde el 14 – 07 – 2023 al 13-03-2024

3.1.3. Autorizaciones y permisos

No aplica.

3.1.4. Control ambiental y protocolos de bioseguridad

Se implementaron todas las precauciones sanitarias necesarias para proteger al investigador y a los colaboradores durante el desarrollo del proyecto de investigación.

3.1.5. Aplicación de principios éticos internacionales

El investigador afirma haber adherido a los estándares éticos universales durante su implicación en la investigación. Esto incluye la recolección precisa de datos con referencias responsables, el reconocimiento del equipo involucrado en el estudio, y la evaluación del impacto ambiental para evitar cualquier daño al entorno natural.

3.2. Sistema de variables

3.2.1. Variables principales

- **Variable independiente** : - Sistema de Lombrifiltro
: - Sistema de Humedal Artificial.
- **Variable dependiente** : - Tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero.

3.3. Procedimientos de la investigación

3.3.1. Diseñar el humedal artificial y el sistema de lombrifiltro

3.3.1.1. Actividades y tareas

Selección del sitio, dimensionamiento del lombrifiltro, diseño en AutoCAD 2022, construcción del lombrifiltro, instalación y acondicionamiento de los materiales del lombrifiltro.

- Selección del sitio: Se seleccionó el Matadero Municipal. El lombrifiltro está ubicado en medio de un tanque séptico y pozo percolador.
- Dimensionamiento del lombrifiltro: Se realizó aplicando el método de la norma de saneamiento (NRC) National Research Council de EE. UU. Este método es válido cuando se usa piedras como medio filtrante (NAP, 2002). En las siguientes tablas se describe el cálculo:

Tabla 2
Dimensionamiento del Lombrifiltro

Fórmula	Descripción	Dato	Und
$S_0 = (1 - E_p) \times St$	DBO ₅ Remanente	S_0	mg DBO ₅ /L
$E = \frac{(S_0 - S_e)}{S_0}$	Eficiencia del filtro	E	%
$W = \frac{(S_0 \times Q)}{1000}$	Carga de DBO ₅	W	Kg DBO ₅ /día
$R = \frac{Q_r}{Q}$	Razón de recirculación	R	R m ³ /día
$F = \frac{(1 + R)}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)}$	Factor de recirculación	F	-
$V = \left(\frac{W}{F}\right) \times \left(0,443 \times \frac{E}{(1 - E)}\right)^2$	Volumen del filtro	V	m ³
H	Profundidad del medio filtrante (Asumida según terreno)	H	m
$A = \frac{V}{H}$	Área del filtro	A	m ²
$TAS = \frac{Q}{A}$	Tasa de aplicación superficial	TAS	m ³ /m ² .día
$CV = \frac{W}{V}$	Carga orgánica	CV	Kg DBO ₅ /m ³ .día

Nota. Fuente (NAP, 2002)

3.3.1.2. Determinación de parámetros del lombrifiltro

a) Porcentaje óptimo de humedad

Para determinar el porcentaje de humedad del sustrato en el lombrifiltro se siguieron los siguientes pasos:

1. Se obtuvo una muestra representativa del sustrato.
2. Se pesó la muestra antes del secado.

3. Se colocó en un horno a 50–60 °C hasta alcanzar peso constante.
4. Se volvió a pesar la muestra seca.
5. Se calculó la cantidad de agua restando el peso seco al peso inicial.
6. Finalmente, se dividió la cantidad de agua entre el peso inicial y se multiplicó por 100 para obtener el porcentaje de humedad.

Fórmula:

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso inicial del sustrato}} \times 100$$

El rango ideal de humedad para el hábitat de las lombrices californianas (*Eisenia foetida*) se encuentra entre 70 % y 80 %, lo que favorece su actividad y reproducción (Castillo & Chimbo, 2021).

b) Cantidad óptima de lombrices

La cantidad adecuada de lombrices se determinó considerando la relación entre la carga orgánica diaria y la capacidad de procesamiento de una lombriz:

$$\text{Cantidad óptima de lombrices} = \frac{\text{Carga orgánica diaria (kg o L)}}{\text{Capacidad de procesamiento diaria de una lombriz}}$$

En general, se recomienda una densidad de 1 a 2 kg de lombrices por metro cuadrado de lecho de lombrifiltro (Castillo & Chimbo, 2021).

c) Construcción del sistema

Para la implementación del lombrifiltro se utilizaron:

- 1,5 kg de *Eisenia foetida* y 1,5 kg de *Lumbricus terrestris*, recolectadas a 30 cm de profundidad en un área de 1 m².
- 0,35 m³ de aserrín, evitando el uso de aserrín de madera roja por su alto contenido de lignina.
- Gravas de distintas granulometrías: 0.35 m³ de ½", 0.35 m³ de 1" y 0.5 m³ de 2" (estas últimas conformadas por piedras de río) (Saboya, 2018).

d) Frecuencia y Sistema de Riego

Se implementó un sistema de manguera con un rociador suave para mantener la humedad adecuada del lecho, evitando el exceso de agua y garantizando las condiciones óptimas para las lombrices. Este sistema permite un suministro controlado y uniforme de agua sobre las bandejas del lombrifiltro (Castillo & Chimbo, 2021).

3.3.1.3. Humedal artificial con la especie Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

a) Aforo preliminar del efluente

Se midió el caudal del efluente posterior al tanque séptico, con el fin de determinar el volumen de agua a tratar en el humedal artificial.

b) Diseño del humedal artificial

Se realizaron los cálculos hidráulicos para el dimensionamiento del sistema, considerando los siguientes parámetros:

Constante de reacción de primer orden:

$$K_t = 0,678 * (1,06)^{(T-20)}$$

- Donde: K_t = constante de reacción y T = temperatura del mes más frío (°C) (Rivera, 2015).

Área superficial:

$$A_s = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_t * Y * n}$$

- Donde: A_s = área superficial (m²), Q = caudal (m³/día), C_o y C_e = concentración inicial y final de oxígeno disuelto (mg/L), Y = profundidad del humedal (m), n = porosidad (Delgadillo et al., 2010).

Longitud del humedal:

$$L = \frac{A_s}{W}$$

- Donde: L = longitud (m) y W = ancho del humedal (m) (Rivera, 2015).

Volumen del humedal:

$$V = L * W * Y$$

- Donde: V = volumen (m³) (Rivera, 2015).

Periodo de retención hidráulica:

$$PR = \frac{V}{Q}$$

- Donde: PR = periodo de retención (días) (Rivera, 2015).

c) Dibujo del plano arquitectónico

El diseño del humedal se elaboró en AutoCAD, considerando las dimensiones obtenidas en los cálculos para representar la estructura general del sistema.

d) Selección del área

El humedal se construyó en una zona del canal municipal de Moyobamba. Se encuentra en medio de un tanque séptico y pozo percolador.

e) Construcción del humedal artificial

Se inició la construcción del humedal según el diseño establecido.

f) Instalación y acondicionamiento de materiales

Se colocó una geomembrana impermeabilizante, seguida de la instalación de tuberías de PVC SAL y gravas de distintas granulometrías. Posteriormente, se conectó el sistema al efluente del camal municipal.

g) Prueba hidráulica

Se verificó el buen funcionamiento del flujo y la distribución del efluente en el humedal.

h) Acondicionamiento de la especie Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

Las plantas fueron acondicionadas previamente en tamices de flotación y, posteriormente, trasplantadas al humedal. Se colocaron a una distancia de 30 cm entre sí, haciendo un total aproximado de 32 plantas sembradas. Durante la fase experimental se observó su adaptación y crecimiento.

3.3.2. Análisis de la tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de humedal artificial

- Toma de muestra: Para la presente investigación se tomó como fuente de experimentación el Matadero Municipal de la ciudad de Moyobamba. Se realizaron muestreos en el afluente y efluente del sistema artificial cada 15 días en un lapso de 3 meses, después de 25 días de adaptación de la planta Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).
- Análisis de laboratorio: El análisis de los parámetros tasa de absorción de oxígeno (TAO), el potencial de hidrógeno (pH) y el oxígeno disuelto (OD), se realizó en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria, de la UNSM.

Tabla 3

Procedimientos de medición de los parámetros de estudio

Parámetro	Procedimiento
Oxígeno Disuelto	1. Colocar en un vaso precipitado 75 ml del líquido de estudio y homogenizar mediante agitación.
Tasa de absorción de oxígeno	2. Introducir el sensor del equipo HI 98193 y realizar la medición.
pH	1. Colocar en un vaso precipitado 75 ml del líquido de estudio y homogenizar mediante agitación.
	2. Introducir el sensor del equipo pHTestr 10 y realizar la medición.

Nota. Elaboración propia

3.3.3. Análisis de la tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de lombrifiltro

3.3.3.1. Toma de muestra, frecuencia de muestreo y análisis de laboratorio

- Toma de muestras: Se determinó 2 puntos de muestreo, el afluente y el efluente del lombrifiltro. Se realizó después de transcurridos 25 días para la proliferación de microorganismos y se llevó a cabo un período de 3 meses.
- Frecuencia de muestreo: Las muestras para los análisis se realizaron cada 15 días, a partir de los 25 días necesarios para la generación de microorganismos, es decir, en los días 25, 40, 55, 70, 85 y 100 de su funcionamiento.
- Análisis de laboratorio: Los análisis para determinar la tasa de absorción de oxígeno (TAO), el potencial de hidrógeno (pH) y el oxígeno disuelto (OD) se efectuaron en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Institución.

3.3.4. Determinación del porcentaje de eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial, en la absorción de oxígeno en aguas residuales del Matadero Municipal

Actividades y tareas. Se calculó la eficiencia comparando los valores obtenidos en el pre y post tratamiento.

Descripción de procedimientos. Se analizó parámetros como: Tasa de absorción de oxígeno (TAO) y el oxígeno disuelto (OD).

Técnicas de procesamiento y análisis de datos. Para el análisis de la eficiencia de remoción del sistema del lombrifiltro y el humedal artificial, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{(\text{Concentración}_{\text{entrada}} - \text{Concentración}_{\text{salida}})}{\text{Concentración}_{\text{entrada}}}$$

Fuente: Romero (1999)

Se utilizó la estadística para evaluar los datos recopilados durante la investigación, los cuales fueron presentados en tablas y figuras estadísticas utilizando el apoyo de dispositivos de procesamiento computacional.

3.3.4.1. Técnicas estadísticas

Análisis de varianza (ANOVA): Se aplicó esta técnica para comparar las tasas de absorción de oxígeno en diferentes condiciones o tratamientos, como comparar la eficiencia del lombrifiltro y el humedal artificial.

Análisis de series temporales: Se desarrolló esta técnica haciendo uso de los datos recopilados de absorción de oxígeno a lo largo del tiempo de estudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.1. Diseño del humedal artificial y el sistema de lombrifiltro

El diseño de sistemas de tratamiento como el lombrifiltro y el humedal artificial representa una alternativa sostenible para el manejo de aguas residuales con alta carga orgánica, como las generadas en el matadero municipal de Moyobamba. Estas tecnologías, basadas en principios biológicos y físicos, son soluciones innovadoras que promueven la reducción de contaminantes de manera eficiente y económica, mientras respetan el entorno ambiental y social.

El lombrifiltro, mediante el uso de lombrices como agentes biológicos de descomposición, combina procesos físicos de filtración y biológicos de biodegradación, lo que permite tratar eficazmente aguas residuales con altos niveles de DBO₅ y DQO. Por su parte, el humedal artificial se basa en procesos de fitodepuración, utilizando plantas como el Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), que favorecen la remoción de contaminantes al interactuar con el lecho filtrante.

A continuación, se presentan los resultados del diseño y dimensionamiento de ambos sistemas, con base en los parámetros hidráulicos y las necesidades específicas del matadero municipal. Cabe recalcar que el agua residual pasa primero por un tratamiento preliminar que consiste en: Una cámara de rejillas, una trampa de grasas y un tanque séptico; posteriormente, ingresa a una cámara distribuidora de caudal, la cual se encarga de distribuir el agua hacia el lombrifiltro y el humedal artificial.

1.1.1. Diseño del Lombrifiltro

El diseño del lombrifiltro se realizó considerando un caudal diario de 1,90 m³ y una concentración inicial de DBO₅ en el efluente de 1 026,9 mg/L. Este sistema fue diseñado para lograr una eficiencia de más del 70,08 % en la remoción de materia orgánica. Los resultados obtenidos tras muestreos, como el pH, fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Los materiales seleccionados para su construcción incluyen lombrices de dos especies (1,5 kg *Eisenia Foetida* y 1,5 kg *Lumbricus Terrestris*), 0,35 m³ de aserrín, grava de diferentes granulometrías (0,35 m³ de ½" y 0,35 m³ de 1") y 0,5 m³ de piedras de río, los cuales contribuyen al proceso de filtración y biodegradación.

Tabla 4
Parámetros iniciales para el diseño del Lombrifiltro

Parámetro	Valor	Unidad
DBO ₅ remanente (S ₀)	1 026,90	mg/L
Caudal del efluente (Q)	1,90	m ³ /día
DBO ₅ requerida en el efluente (S _e) (Se asumió teniendo en cuenta el D.S. 003-2010-MINAM)	300,00	mg/L
Profundidad (H) (Se asumió según la disponibilidad y características del terreno)	1,00	m
Ancho del filtro (a) (Se asumió según la disponibilidad y características del terreno)	1,20	m

Nota. Elaboración propia según muestreo y memorias de cálculo

Tabla 5
Dimensionamiento del Lombrifiltro

Descripción	Cálculo	Resultado
Eficiencia del filtro: $E = \frac{(S_0 - S_e)}{S_0}$	$E = \frac{(1026,90 - 300,00)}{1026,90}$	E = 70,80%
DBO ₅ Remanente: $W = \frac{(S_0 \times Q)}{1000}$	$W = \frac{(1026,90 \times 1,19)}{1000}$	W = 1,96 Kg DBO ₅ /día
Razón de recirculación: $R = \frac{Q_r}{Q}$	$R = \frac{0}{1,19}$	R = 0
Factor de recirculación: $F = \frac{(1 + R)}{(1 + \frac{R}{10})}$	$F = \frac{(1 + 0)}{(1 + \frac{0}{10})}$	F = 1
Volumen del filtro: $V = \left(\frac{W}{F}\right) \times \left(0,443 \times \frac{E}{(1 - E)}\right)^2$	$V = \left(\frac{1,19}{1}\right) \times \left(0,443 \times \frac{70,80}{(1 - 70,80)}\right)^2$	W = 2,25 m ³
Área del filtro: $A = \frac{V}{H}$	$A = \frac{1,96}{1,00}$	A = 2,40 m ²
Nota. Teniendo en cuenta el valor asumido de H=1,00 m		
Tasa de aplicación superficial: $TAS = \frac{Q}{A}$	$TAS = \frac{1,19}{2,40}$	TAS = 0,80 m ³ /m ² . día
Carga orgánica: $CV = \frac{W}{V}$	$CV = \frac{2,25}{1,96}$	CV = 0,88 Kg m ³ /m ² . día
Largo del filtro: $L = \frac{A}{a}$	$L = \frac{2,40}{1,20}$	L = 2,00 m Nota: Medida interna.
Nota. Teniendo en cuenta un ancho de filtro de 1,20 m (Valor asumido)		

Nota. Elaboración propia según memorias de cálculo

Este diseño permite manejar altas concentraciones de materia orgánica, combinando los procesos biológicos de las lombrices con la filtración física. Las lombrices seleccionadas cumplen funciones complementarias: *Eisenia Foetida* actúa en las capas superficiales del filtro, mientras que *Lumbricus Terrestris* trabaja en capas más profundas, asegurando una descomposición uniforme y eficiente. A continuación, se presenta las vistas del modelo obtenido. Pero, para visualizar el plano, ver Anexo 01.

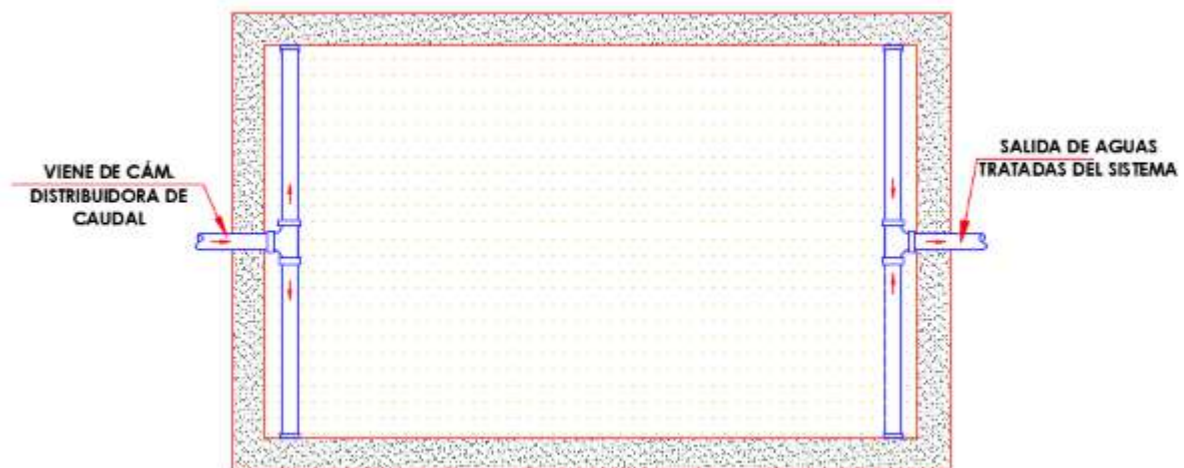


Figura 1

Vista Superior del esquema del Sistema Lombrifiltro.

Nota. Gráfico elaborado en AutoCad 2022

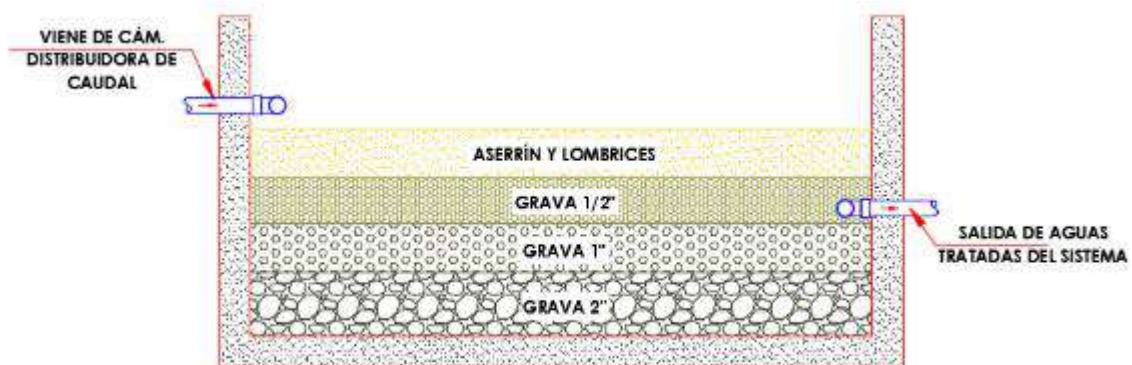


Figura 2

Vista Frontal del esquema del Sistema Lombrifiltro.

Nota. Gráfico elaborado en AutoCad 2022

1.1.2. Diseño del Humedal Artificial

De igual manera, el humedal artificial se diseñó para complementar el sistema de tratamiento preliminar y garantizar una mayor remoción de contaminantes. Este utiliza un flujo superficial, un lecho de grava ($2,25 \text{ m}^3$ de $\frac{3}{4}$ " a 1"), una capa fina de arena como soporte ($0,075 \text{ m}^3$), y las plantas de Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para promover la fitodepuración (32 plantas). Los cálculos hidráulicos y de dimensionamiento se

realizaron considerando un caudal diario de 1.90 m³. Una vez que el sistema entró en funcionamiento, los resultados obtenidos, como el pH, fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM.

Tabla 6
Parámetros iniciales para el diseño del Humedal Artificial

Parámetro	Valor	Unidad
DBO Inicial (C _o)	1 026,90	mg/L
DBO Final (C _e) (Se asumió teniendo en cuenta el D.S. 003-2010-MINAM)	630,00	mg/L
Caudal de diseño (Q)	1,90	m ³ /día
Profundidad útil del humedal (Y) (Se asumió según la disponibilidad y características del terreno)	0,60	m
Pendiente del humedal (s) (Pendiente varía entre 0.1 – 1.0 %; se asumió 0.5 %)	0,5	%
Temperatura más fría (T) (Según zona)	25	°C
Porosidad (n) (Según tipo de grava usada; ver Delgado et al., 2010)	38	-

Nota. Elaboración propia según muestreo y memorias de cálculo

Tabla 7
Dimensionamiento del Humedal Artificial

Descripción	Cálculo	Resultado
Constante de reacción de primer orden: $K_t = 0,678 \times 1,06^{(T-20)}$	$K_t = 0,678 \times 1,06^{(25-20)}$	$K_t = 0,907 d^{-1}$
Área superficial: $A_s = \frac{Q \times \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_t \times Y \times n}$	$A_s = \frac{1,19 \times \ln\left(\frac{1026,90}{630}\right)}{0,907 \times 0,60 \times 38}$	$A_s = 4,49 m$
Ancho del humedal: $L = \frac{A_s}{W}$	$A_s = L \times W$ $A_s = 2W \times W$	$W = 1,50 m$ Nota: Medida interna.
Nota: Basados en la relación L:W (2:1)		$L = 3,00 m$
Ancho del humedal: $L = \frac{A_s}{W}$	$L = \frac{4,49 m^2}{1,50 m}$	Valor final: $L = 2,50 m$ Nota: Medida interna.
Nota. Se decidió optar por un largo de 2,50 m debido a la disponibilidad y características de terreno.		
Volumen del humedal: $V = L \times W \times Y$	$V = 1,50 \times 2,50 \times 0,60$	$V = 2,25 m^3$
Periodo de retención hidráulica: $PR = \frac{V}{Q}$	$PR = \frac{2,25}{1,19}$	$R = 1,78 d$

Nota. Elaboración propia según memorias de cálculo.

El diseño asegura un equilibrio entre procesos físicos, químicos y biológicos, logrando la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos. La tasa de absorción de oxígeno y el tiempo de retención hidráulica garantizan que el sistema funcione de manera eficiente y sostenible. A continuación, se presenta las vistas del modelo obtenido. Pero, para visualizar el plano, ver Anexo 02.

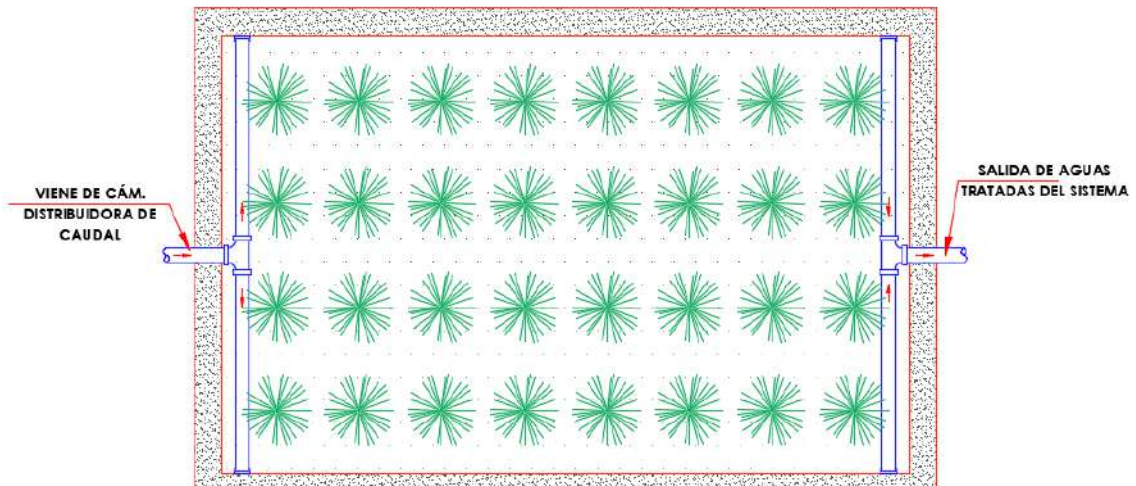


Figura 3

Vista superior del esquema del Sistema Humedal Artificial.

Nota. Gráfico elaborado en AutoCad 2022

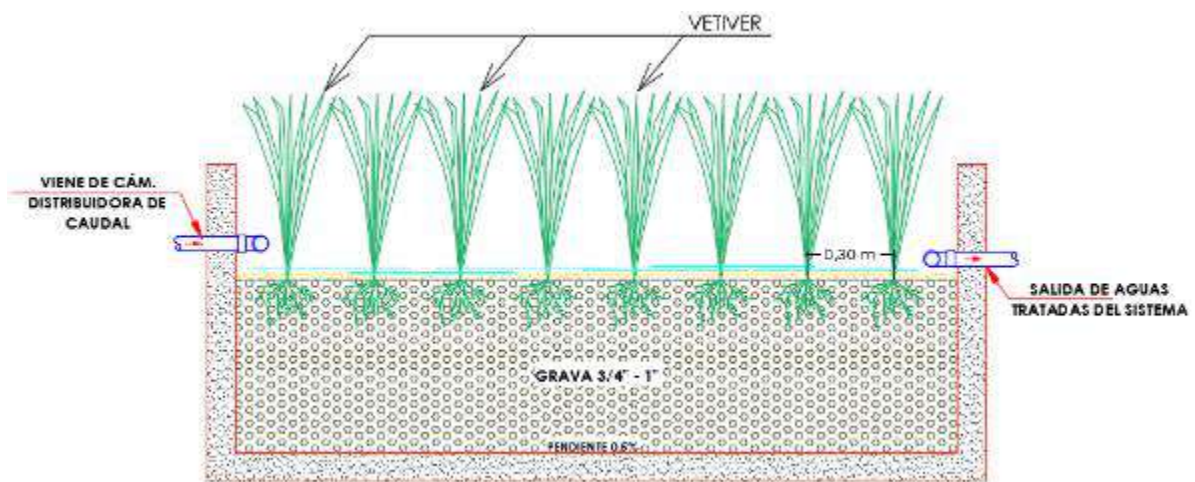


Figura 4

Vista de frontal del Sistema Humedal Artificial.

Nota. Gráfico elaborado en AutoCad 2022

1.2. Tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de humedal artificial

Para el desarrollo de este objetivo se realizaron seis muestreos a la entrada y salida del sistema humedal artificial para determinar la tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales del camal municipal. Esta toma de muestras se realizó cada 15 días.

1.2.1. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización inicial del sistema lombrifiltro:

Para obtener el resultado del primer muestreo se dejó al sistema humedal artificial 25 días de funcionamiento.

Tabla 8
Resultados del muestreo inicial

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Humedal	LMP
pH	Potencial de hidrógeno	6,65	6,95	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,45	0,84	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,19	27,69	-

Nota. Elaboración propia a partir del primer muestreo

En el primer muestreo realizado después de 25 días de operación del humedal artificial, se observó que el pH del agua residual en la entrada fue de 6,65 y en la salida aumentó ligeramente a 6,95. Este incremento sugiere que el sistema comenzó a estabilizar el pH del agua tratada, manteniéndolo dentro del rango adecuado (6,5 – 8,5). Este fenómeno puede atribuirse a la interacción de los microorganismos presentes en el sistema y la capacidad del lecho filtrante para neutralizar compuestos ácidos o alcalinos.

En términos de oxígeno disuelto, se registró un aumento leve de 0,45 mg/L en la entrada a 0,84 mg/L en la salida. Este valor sugiere que el sistema comenzó a favorecer la incorporación de oxígeno en el agua tratada, aunque aún en niveles bajos.

El cambio más significativo se observó en la tasa de absorción de oxígeno, la cual incrementó de 3,19 mg/L/h en la entrada a 27,69 mg/L/h en la salida. Este aumento evidencia que el humedal artificial favorece la descomposición de materia orgánica y mejora la capacidad del agua para mantener procesos biológicos dependientes del oxígeno.

1.2.2. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización dos del sistema humedal artificial

La caracterización dos, fue realizado transcurrido 40 días de funcionamiento del sistema de humedal artificial.

Tabla 9
Resultados del segundo muestreo

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Humedal	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,6	6,9	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,5	0,87	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,22	28	-

Nota. Elaboración propia a partir del segundo muestreo

En la segunda evaluación, realizada tras 40 días de operación, se observó una tendencia similar en la estabilización del pH. El agua en la entrada registró un pH de 6,6

y en la salida de 6,9. Este comportamiento reafirma que el humedal artificial mantiene un ambiente químico estable para la depuración del agua residual.

El oxígeno disuelto presentó un leve incremento en la salida del sistema, pasando de 0,5 mg/L en la entrada a 0,87 mg/L en la salida. Si bien el aumento es marginal, indica que el proceso de reoxigenación continúa en marcha.

El parámetro más importante, la tasa de absorción de oxígeno, presentó un incremento significativo, pasando de 3,22 mg/L/h en la entrada a 28 mg/L/h en la salida. Esto confirma que el sistema sigue mejorando su capacidad de tratamiento, permitiendo una mayor remoción de la carga contaminante y favoreciendo la oxigenación del efluente tratado.

1.2.3. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización tres el sistema humedal artificial

La caracterización tres, fue realizado transcurrido 55 días de funcionamiento del sistema de humedal artificial.

Tabla 10
Resultados del tercer muestreo

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Humedal	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,7	6,92	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,48	0,85	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,18	27,8	-

Nota. Elaboración propia a partir del tercer muestreo

Después de 55 días de operación, el pH del agua residual mostró un ligero incremento al pasar de 6,7 en la entrada a 6,92 en la salida. Esta variación confirma la capacidad del humedal artificial para estabilizar la acidez del agua tratada.

El oxígeno disuelto mostró una leve mejora, pasando de 0,48 mg/L en la entrada a 0,85 mg/L en la salida. Aunque el incremento no es considerable, indica que el sistema mantiene una capacidad estable de reoxigenación.

En cuanto a la tasa de absorción de oxígeno, se evidenció una tendencia sostenida de mejora, pasando de 3,18 mg/L/h en la entrada a 27,8 mg/L/h en la salida. Este resultado confirma la eficiencia del sistema en la eliminación de contaminantes orgánicos y su contribución a la mejora de la calidad del agua.

1.2.4. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cuatro el sistema humedal artificial

La caracterización cuatro, fue realizado transcurrido 70 días de funcionamiento del sistema de humedal artificial.

Tabla 11
Resultados del muestreo cuatro

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Humedal	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,68	6,93	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,46	0,83	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,2	27,75	-

Nota. Elaboración propia a partir del cuarto muestreo

En esta medición, el pH del agua residual pasó de 6,68 en la entrada a 6,93 en la salida, manteniéndose dentro del rango ideal. La estabilidad de este parámetro es fundamental para garantizar la compatibilidad del agua tratada con los ecosistemas acuáticos.

El oxígeno disuelto en la entrada fue de 0,46 mg/L y en la salida de 0,83 mg/L, lo que demuestra que el humedal sigue favoreciendo una leve incorporación de oxígeno al agua.

La tasa de absorción de oxígeno aumentó de 3,2 mg/L/h en la entrada a 27,75 mg/L/h en la salida. Aunque el incremento es menor en comparación con las mediciones anteriores, el sistema sigue manteniendo su capacidad de depuración y mejorando la calidad del agua.

1.2.5. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cinco el sistema humedal artificial

La caracterización cinco, fue realizado transcurrido 85 días de funcionamiento del sistema de humedal artificial.

Tabla 12
Resultados del muestreo cinco

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Humedal	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,62	6,94	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,49	0,86	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,21	27,85	-

Nota. Elaboración propia a partir del quinto muestreo

En este muestreo, el pH del agua residual en la entrada fue de 6,62 y en la salida de 6,94. La estabilidad del pH sigue indicando que el humedal artificial mantiene un equilibrio en el proceso de tratamiento del agua.

El oxígeno disuelto se mantuvo dentro de un patrón similar, pasando de 0,49 mg/L en la entrada a 0,86 mg/L en la salida. Esto indica que el sistema ha alcanzado un punto de equilibrio en términos de oxigenación del efluente.

La tasa de absorción de oxígeno mostró una variación mínima respecto a la medición anterior, aumentando de 3,21 mg/L/h en la entrada a 27,85 mg/L/h en la salida. Estos resultados indican que el humedal ha alcanzado su máximo rendimiento y se mantiene estable en su eficiencia.

1.2.6. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización seis el sistema humedal artificial:

La caracterización seis, fue realizado transcurrido 100 días de funcionamiento del sistema de humedal artificial.

Tabla 13
Resultados del muestreo seis

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Humedal	LMP
pH	Potencial de hidrógeno	6,63	6,96	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,47	0,84	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,19	27,69	-

Nota. Elaboración propia a partir del sexto muestreo

En la última medición realizada, el pH del agua en la entrada fue de 6,63 y en la salida de 6,96.

El oxígeno disuelto se mantuvo en 0,47 mg/L en la entrada y 0,84 mg/L en la salida, lo que confirma que el sistema sigue funcionando de manera estable.

La tasa de absorción de oxígeno mostró un comportamiento similar al de las mediciones previas, aumentando de 3,19 mg/L/h en la entrada a 27,69 mg/L/h en la salida. Esto indica que el sistema ha alcanzado un punto de equilibrio y su eficiencia se mantiene constante.

1.3. Tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales municipales pre y post tratamiento aplicando el sistema de lombrifiltro

Se realizaron seis muestreos a la entrada y salida del sistema lombrifiltro para determinar la tasa de absorción de oxígeno de las aguas residuales del camal municipal. Esta toma de muestras se realizó cada 15 días.

1.3.1. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización inicial del sistema lombrifiltro:

Para obtener el resultado del primer muestreo se dejó al sistema lombrifiltro 25 días de funcionamiento.

Tabla 14

Resultados del muestreo inicial

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Lombrifiltro	LMP
pH	Potencial de hidrógeno	6,65	7,49	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,45	0,69	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,19	43,64	-

Nota. Elaboración propia a partir del primer muestreo

En la primera medición del sistema lombrifiltro, realizada después de 25 días de operación, se observó que el pH del agua residual en la entrada fue de 6,65 y en la salida se elevó a 7,49. Este incremento indica que el sistema alcalinizó el agua tratada, lo cual puede atribuirse a la actividad biológica de las lombrices y microorganismos en el medio filtrante, que favorecen la descomposición de la materia orgánica y la liberación de compuestos que regulan la acidez del agua.

El oxígeno disuelto en la entrada se registró en 0,45 mg/L, mientras que en la salida aumentó a 0,69 mg/L. Este aumento, aunque no muy elevado, sugiere que el sistema permitió una ligera oxigenación del agua residual, lo que es esencial para mejorar la calidad del efluente.

El parámetro más relevante en este análisis es la tasa de absorción de oxígeno, que mostró un incremento notable al pasar de 3,19 mg/L/h en la entrada a 43,64 mg/L/h en la salida. Este resultado inicial indica que el lombrifiltro es altamente eficiente en la eliminación de materia orgánica y la oxigenación del agua residual, lo que sugiere que el sistema tiene un impacto positivo desde las primeras semanas de operación.

1.3.2. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización dos del sistema lombrifiltro

La caracterización dos, fue realizado transcurrido 40 días de funcionamiento del sistema de lombrifiltro.

Tabla 15
Resultados del segundo muestreo

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Lombrifiltro	LMP
pH	Potencial de hidrógeno	6,6	7,55	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,5	0,71	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,22	44	-

Nota. Elaboración propia a partir del segundo muestreo

Para el segundo muestreo, realizado a los 40 días de funcionamiento, se observó que el pH en la entrada fue de 6,6 y en la salida aumentó a 7,55. Esta variación confirma que el sistema mantiene su capacidad de alcalinización del agua tratada, lo que podría contribuir a la neutralización de ácidos presentes en el agua residual.

El oxígeno disuelto en la entrada fue de 0,5 mg/L y en la salida aumentó a 0,71 mg/L. Aunque el incremento sigue siendo leve, indica que el sistema continúa promoviendo la incorporación de oxígeno al agua tratada, favoreciendo el crecimiento de microorganismos aeróbicos responsables de la degradación de contaminantes orgánicos.

En cuanto a la tasa de absorción de oxígeno, se registró un incremento de 3,22 mg/L/h en la entrada a 44 mg/L/h en la salida. Esta mejora reafirma la alta eficiencia del lombrifiltro en la eliminación de materia orgánica y en la restauración de las propiedades fisicoquímicas del agua residual.

1.3.3. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización tres el sistema lombrifiltro:

La caracterización tres, fue realizado transcurrido 55 días de funcionamiento del sistema de lombrifiltro.

Tabla 16
Resultados del tercer muestreo

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Lombrifiltro	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,7	7,1	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,48	0,7	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,18	43,8	-

Nota. Elaboración propia a partir del tercer muestreo

En el tercer muestreo, realizado tras 55 días de operación del sistema lombrifiltro, el pH en la entrada del sistema fue de 6,7, mientras que en la salida descendió levemente a 7,1. Aunque sigue dentro de un rango alcalino, esta pequeña variación podría indicar un ajuste en la dinámica química del sistema, posiblemente debido a la estabilización de los procesos microbiológicos en el medio filtrante.

El oxígeno disuelto presentó valores de 0,48 mg/L en la entrada y aumentó a 0,7 mg/L en la salida. A pesar de ser un aumento ligero, confirma que el sistema sigue promoviendo una mejor oxigenación del agua.

La tasa de absorción de oxígeno mostró un incremento de 3,18 mg/L/h en la entrada a 43,8 mg/L/h en la salida. Este resultado refuerza la idea de que el lombrifiltro sigue funcionando con una alta eficiencia, permitiendo una significativa eliminación de materia orgánica y mejorando la calidad del efluente tratado.

1.3.4. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cuatro el sistema lombrifiltro:

La caracterización cuatro, fue realizado transcurrido 70 días de funcionamiento del sistema de lombrifiltro.

Tabla 17
Resultados del cuarto muestreo

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Lombrifiltro	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,68	7,12	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,46	0,68	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,2	43,7	-

Nota. Elaboración propia a partir del cuarto muestreo

En la cuarta evaluación del sistema lombrifiltro, realizada a los 70 días de operación, se registró un pH de 6,68 en la entrada y de 7,12 en la salida. Esta ligera variación sigue la tendencia observada en los muestreos previos, confirmando que el sistema mantiene su capacidad de estabilización química del agua tratada.

El oxígeno disuelto en la entrada fue de 0,46 mg/L y en la salida aumentó a 0,68 mg/L. Este leve incremento reafirma que el sistema continúa favoreciendo la aireación del agua residual, lo cual es beneficioso para la calidad del efluente.

En cuanto a la tasa de absorción de oxígeno, se registró un aumento de 3,2 mg/L/h en la entrada a 43,7 mg/L/h en la salida. Esto indica que el sistema sigue funcionando de manera eficiente y sostenida en la eliminación de contaminantes orgánicos, asegurando una mejor calidad del agua residual tratada.

1.3.5. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización cinco el sistema lombrifiltro:

La caracterización cinco, fue realizado transcurrido 85 días de funcionamiento del sistema de lombrifiltro.

Tabla 18
Resultados del muestreo cinco

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Lombrifiltro	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,62	7,26	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,49	0,72	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,21	43,9	-

Nota. Elaboración propia a partir del quinto muestreo

En la quinta medición, realizada tras 85 días de funcionamiento del lombrifiltro, el pH del agua residual en la entrada fue de 6,62 y en la salida de 7,26. Esta variación sigue mostrando la tendencia del sistema a incrementar ligeramente la alcalinidad del efluente tratado, lo que puede ser beneficioso para ciertos usos del agua después de su tratamiento.

El oxígeno disuelto en la entrada fue de 0,49 mg/L y en la salida aumentó a 0,72 mg/L, lo que indica que el sistema sigue promoviendo una ligera mejora en la oxigenación del agua.

La tasa de absorción de oxígeno pasó de 3,21 mg/L/h en la entrada a 43,9 mg/L/h en la salida, confirmando la estabilidad y eficiencia del sistema en la reducción de la materia orgánica y en la mejora de las condiciones del agua tratada.

1.3.6. Valores de los parámetros resultantes en la caracterización seis el sistema lombrifiltro:

La caracterización seis, fue realizado transcurrido 100 días de funcionamiento del sistema de lombrifiltro.

Tabla 19
Resultados del muestreo seis

Parámetro	Unidad	Entrada al Sistema	Salida Lombrifiltro	LMP
pH	Potencial de Hidrógeno	6,63	7,56	6,5 – 8,5
Oxígeno disuelto	mg/L	0,47	0,69	-
Tasa de absorción de oxígeno	mg/L/h	3,19	43,64	-

Nota. Elaboración propia a partir del sexto muestreo

En la última medición realizada a los 100 días de funcionamiento del lombrifiltro, el pH en la entrada se registró en 6,63 y en la salida aumentó a 7,56. Esta variación es consistente con los resultados anteriores, lo que indica que el sistema ha mantenido una alcalinidad estable en el agua tratada.

El oxígeno disuelto en la entrada fue de 0,47 mg/L, mientras que en la salida aumentó a 0,69 mg/L. Aunque la diferencia no es muy marcada, sigue demostrando que el sistema favorece la oxigenación del agua residual.

El parámetro más significativo, la tasa de absorción de oxígeno, mostró un incremento de 3,19 mg/L/h en la entrada a 43,64 mg/L/h en la salida. Esto confirma que el sistema ha alcanzado un punto de estabilidad y su eficiencia se mantiene constante a lo largo del tiempo.

1.4. Porcentaje de eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial, en la absorción de oxígeno en aguas residuales del Matadero Municipal

El análisis de la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales suele basarse en la capacidad de remoción de contaminantes. Sin embargo, en este estudio se busca evaluar la efectividad del lombrifiltro y el humedal artificial en la mejora de la oxigenación del agua residual, específicamente en términos de la tasa de absorción de oxígeno.

Dado que estos sistemas no están diseñados para eliminar oxígeno, sino para aumentar su absorción mediante procesos biológicos y físicos, el cálculo de eficiencia debe reflejar el incremento de la tasa de absorción de oxígeno en lugar de su reducción. Por esta razón, se emplea la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{(\text{Concentración}_{\text{entrada}} - \text{Concentración}_{\text{salida}})}{\text{Concentración}_{\text{entrada}}} \times 100$$

A continuación, se presentan los resultados detallados del cálculo de la eficiencia en el oxígeno disuelto y la tasa de absorción de oxígeno para cada uno de los seis muestreos realizados en ambos sistemas, utilizando los valores de las tablas de los muestreos obtenidos en la investigación.

1.4.1. Resultados del porcentaje de eficiencia del oxígeno disuelto y la tasa de absorción del oxígeno del sistema humedal artificial

Tabla 20

Resultados del porcentaje de eficiencia de oxígeno disuelto – humedal artificial

Muestreo	OD Entrada (mg/L)	OD Salida (mg/L)	Eficiencia (%)
1° muestreo	0,45	0,84	86,67
2° muestreo	0,5	0,87	74,00
3° muestreo	0,48	0,85	77,08
4° muestreo	0,46	0,83	80,43
5° muestreo	0,49	0,86	75,51
6° muestreo	0,47	0,84	78,72

Nota. Elaboración propia a partir de todos los muestreos realizados de oxígeno disuelto

A continuación, se muestran los resultados de manera gráfica para su mejor comprensión y visualización:

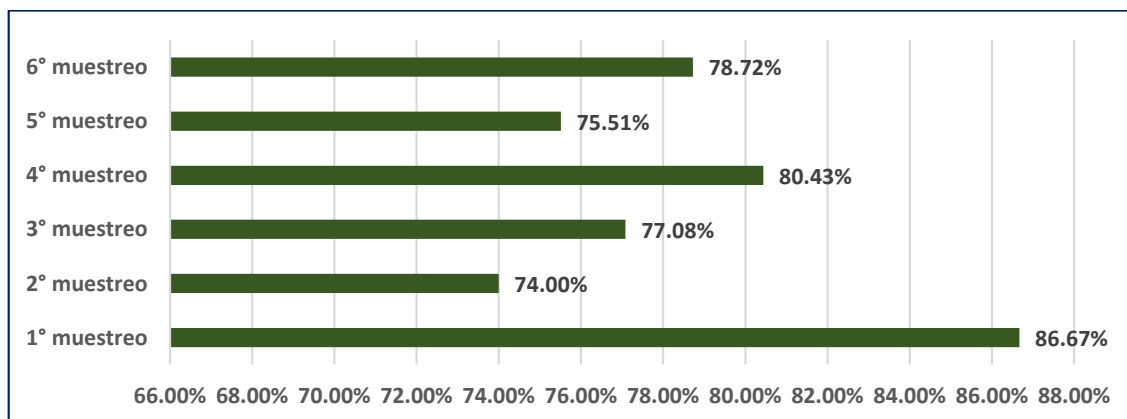


Figura 5

% eficiencia de oxígeno disuelto – humedal artificial.

Nota. Elaboración propia a partir de la tabla 20

Los resultados obtenidos en los diferentes muestreos reflejan la eficiencia del sistema en la mejora del oxígeno disuelto (OD) en el agua residual tratada. Desde el primer muestreo (0,45 mg/L de entrada y 0,84 mg/L de salida, con una eficiencia del 86,67%), se evidencia un aumento significativo en la oxigenación del agua. Este resultado inicial indica que el sistema comienza a mejorar la calidad del agua desde las primeras etapas del tratamiento, favoreciendo la difusión de oxígeno en la fase acuosa.

En el segundo muestreo, se observa una ligera variación en la eficiencia del proceso, registrando un 74,00 % de mejora en el OD. Aunque este valor es inferior al del primer muestreo, sigue demostrando un desempeño efectivo en la oxigenación del agua tratada.

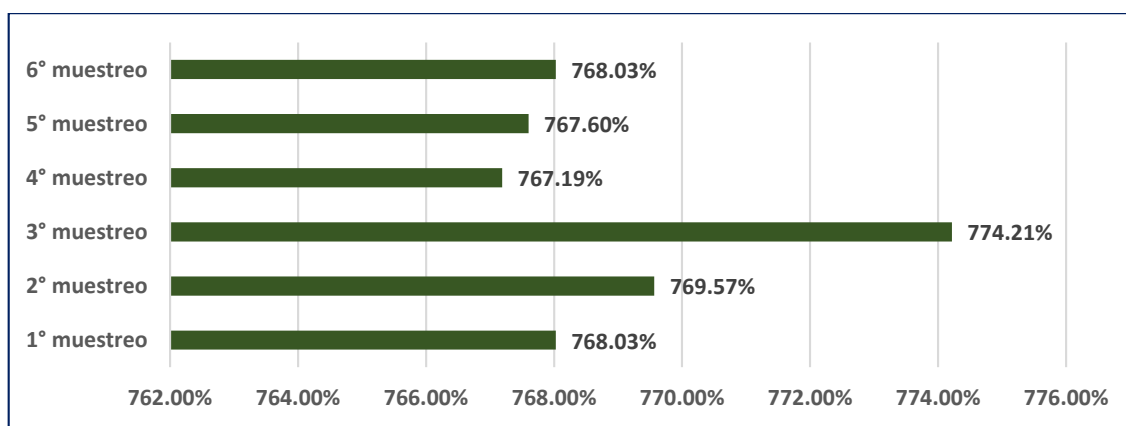
A partir del tercer muestreo (77,08 %) y el cuarto muestreo (80,43 %), se nota una tendencia de recuperación y estabilización del sistema, con valores de oxígeno disuelto que se mantienen entre 0,83 mg/L y 0,85 mg/L en la salida. En el quinto y sexto muestreo, los valores de eficiencia oscilan entre 75,51 % y 78,72 %, con una salida de oxígeno disuelto de 0,84 a 0,86 mg/L. Estas cifras indican que el proceso de tratamiento sigue siendo eficiente, aunque con pequeñas variaciones que pueden deberse a cambios en la calidad del agua residual ingresada al sistema. Sin embargo, la estabilidad de los valores muestra que el sistema ha logrado optimizar la transferencia de oxígeno, permitiendo que el agua tratada presente mejores condiciones para su disposición final o posible reutilización.

Tabla 21*Resultados del porcentaje de eficiencia de la TAO – humedal artificial*

Muestreo	Entrada (mg/L/h)	Salida (mg/L/h)	Eficiencia (%)
1° muestreo	3,19	27,69	768,03
2° muestreo	3,22	28	769,57
3° muestreo	3,18	27,8	774,21
4° muestreo	3,2	27,75	767,19
5° muestreo	3,21	27,85	767,60
6° muestreo	3,19	27,69	768,03

Nota. Elaboración propia a partir de todos los muestreos realizados de la tasa de absorción de oxígeno

A continuación, se muestran los resultados de manera gráfica para su mejor comprensión y visualización:

**Figura 6***% eficiencia de la TAO – humedal artificial.*

Nota. Elaboración propia a partir de la tabla 21

Los datos obtenidos reflejan la eficiencia del humedal artificial en la mejora de la tasa de absorción de oxígeno (TAO) en aguas residuales. En el primer muestreo, se observó un aumento significativo en la TAO, pasando de 3,19 mg/L/h en la entrada a 27,69 mg/L/h en la salida, con una eficiencia del 768,03 %. Este resultado indica que el sistema de humedal artificial comienza a estabilizarse desde las primeras etapas del tratamiento, permitiendo la oxigenación progresiva del agua residual.

En los siguientes muestreos, los valores de eficiencia se mantuvieron en un rango de 769,57 % a 774,21 %, lo que evidencia que el sistema presenta un desempeño constante y estable en la mejora de la oxigenación del agua. El tercer muestreo (774,21 %) registró la mayor eficiencia, lo que sugiere que el humedal alcanzó su máxima capacidad de absorción de oxígeno en ese periodo. Sin embargo, en los muestreos posteriores, los valores oscilaron levemente, indicando un equilibrio en la actividad de los microorganismos y la vegetación del sistema.

1.4.2. Resultados del porcentaje de eficiencia del oxígeno disuelto y la tasa de absorción del oxígeno del sistema lombrifiltro

Tabla 22

Resultados del porcentaje de eficiencia de oxígeno disuelto – lombrifiltro

Muestreo	OD Entrada (mg/L)	OD Salida (mg/L)	Eficiencia (%)
1° muestreo	0,45	0,69	53,33
2° muestreo	0,5	0,71	42,00
3° muestreo	0,48	0,7	45,83
4° muestreo	0,46	0,68	47,83
5° muestreo	0,49	0,72	46,94
6° muestreo	0,47	0,69	46,81

Nota. Elaboración propia a partir de todos los muestreos realizados de oxígeno disuelto

A continuación, se muestran los resultados de manera gráfica para su mejor comprensión y visualización:

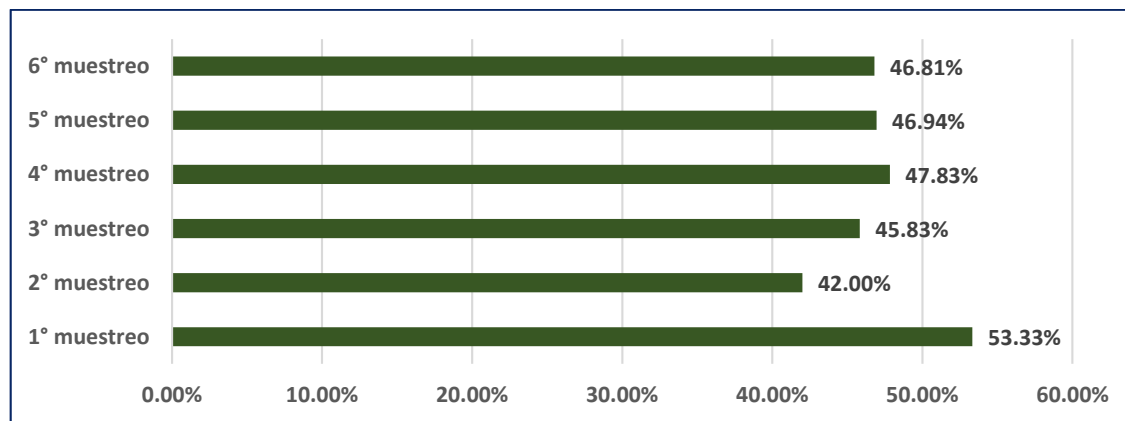


Figura 7

% eficiencia de oxígeno disuelto – lombrifiltro.

Nota. Elaboración propia a partir de la tabla 22

Los resultados muestran la eficiencia del lombrifiltro en la mejora de los niveles de oxígeno disuelto (OD) en el agua residual tratada. Desde el primer muestreo, se observa un incremento en el OD, pasando de 0,45 mg/L en la entrada a 0,69 mg/L en la salida, con una eficiencia del 53,33%. Esto indica que el sistema de lombrifiltro comienza a mejorar la oxigenación del agua desde las primeras etapas del tratamiento, permitiendo la difusión de oxígeno en el medio acuoso gracias a la acción biológica y la filtración del sistema.

En los muestreos posteriores, la eficiencia del lombrifiltro en la mejora del OD se mantiene en un rango de 42,00 % a 53,33 %, con valores de salida entre 0,68 mg/L y 0,72 mg/L. El segundo muestreo (42,00 %) presentó la menor eficiencia, lo que sugiere una posible variabilidad en la calidad del agua de entrada o en la actividad microbiana dentro del sistema. Sin embargo, a partir del tercer muestreo, se observa una recuperación en la eficiencia, estabilizándose en valores entre 45,83 % y 47,83 %, lo

que indica que el sistema ha alcanzado una fase de equilibrio en su capacidad de oxigenación.

Tabla 23

Resultados del porcentaje de eficiencia de la TAO – lombrifiltro.

Muestreo	Entrada (mg/L/h)	Salida(mg/L/h)	Eficiencia (%)
1° muestreo	3,19	43,64	1 268,03
2° muestreo	3,22	44	1 266,46
3° muestreo	3,18	43,8	1 277,36
4° muestreo	3,2	43,7	1 265,63
5° muestreo	3,21	43,9	1 267,60
6° muestreo	3,19	43,64	1 268,03

Nota. Elaboración propia a partir de todos los muestreos realizados de la tasa de absorción de oxígeno

A continuación, se muestran los resultados de manera gráfica para su mejor comprensión y visualización:

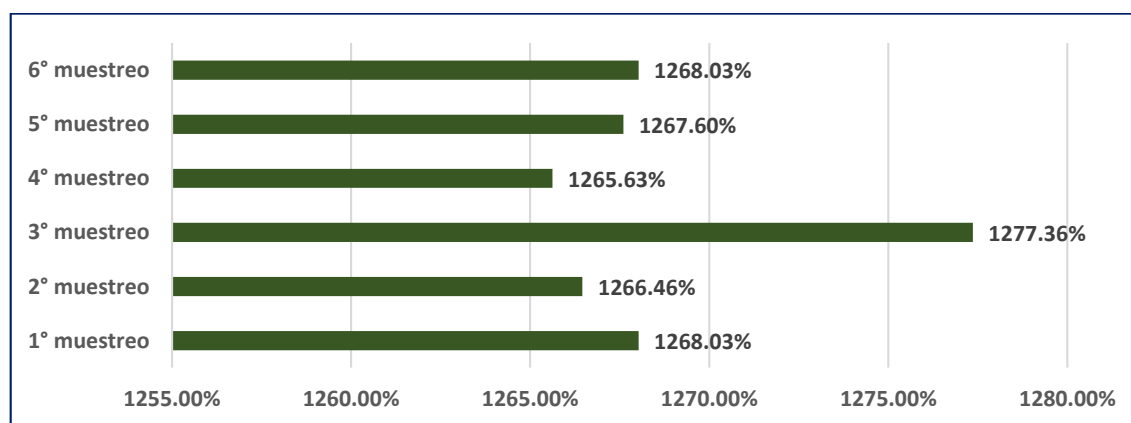


Figura 8

% eficiencia de la TAO – lombrifiltro.

Nota. Elaboración propia a partir de la tabla 23

Los resultados evidencian la alta eficiencia del lombrifiltro en la mejora de la tasa de absorción de oxígeno (TAO) en aguas residuales. En el primer muestreo, la TAO aumentó de 3,19 mg/L/h en la entrada a 43,64 mg/L/h en la salida, con una eficiencia del 1 268,03 %. Este resultado inicial demuestra que el lombrifiltro es altamente efectivo desde las primeras etapas del tratamiento, favoreciendo la oxigenación del agua gracias a la actividad biológica de lombrices y microorganismos aeróbicos.

A lo largo de los diferentes muestreos, la eficiencia del sistema se mantiene estable, con valores que oscilan entre 1 265,63% y 1 277,36 %, lo que indica que el sistema ha alcanzado un equilibrio en su funcionamiento. El tercer muestreo (1 277,36 %) registró la mayor eficiencia, lo que sugiere un punto de máximo rendimiento del sistema en términos de absorción de oxígeno. Sin embargo, en los muestreos posteriores, la eficiencia se estabiliza alrededor del 1 267 %, lo que demuestra que el sistema mantiene un desempeño uniforme sin fluctuaciones significativas.

1.4.3. Análisis estadístico para evaluar la significancia de los sistemas en la tasa de absorción de oxígeno.

El ANOVA de un factor se utilizó para comparar las medias de los valores de entrada y salida en cada sistema. Este análisis se fundamenta en la hipótesis nula (H_0), que establece que no existen diferencias significativas entre los valores antes y después del tratamiento, y en la hipótesis alternativa (H_1), que plantea que existen diferencias estadísticamente significativas.

A continuación, se presentan los valores obtenidos en el análisis ANOVA para cada sistema.

Tabla 24

Resultados del ANOVA para la TAO en ambos sistemas

Sistema	F-valor	P-valor	Nivel de Significación
Humedal Artificial	258 518,97	$2,13 \times 10^{-23}$	$p < 0,05$ (Significativo)
Lombrifiltro	449 623,69	$1,34 \times 10^{-24}$	$p < 0,05$ (Significativo)

Nota. Elaboración a partir del análisis estadístico

Los valores p obtenidos para ambos sistemas son extremadamente pequeños ($p < 0,05$), lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores de entrada y salida de la TAO en cada sistema. Esto significa que ambos tratamientos son efectivos en la mejora de la absorción de oxígeno en el agua residual.

Por su parte en el sistema humedal artificial se observa una diferencia significativa entre la entrada y salida de la TAO, con un F-valor de 258 518,97. Esto confirma que el sistema logra mejorar la oxigenación del agua, aunque de manera menos pronunciada que el lombrifiltro.

Mientras que, el sistema lombrifiltro presenta un F-valor de 449 623,69, indicando una mayor variabilidad y un efecto más fuerte en la mejora de la absorción de oxígeno. Este resultado demuestra que el lombrifiltro tiene un impacto significativamente superior en la oxigenación del agua tratada.

1.5. Discusión

Las aguas residuales del Matadero Municipal de Moyobamba presentaron una alta carga orgánica y bajos niveles de oxígeno disuelto (OD), lo que justificó la aplicación de tecnologías biológicas sostenibles. La implementación de los sistemas de lombrifiltro y humedal artificial permitió incrementar significativamente la tasa de absorción de oxígeno (TAO), con diferencias estadísticas relevantes ($p < 0,05$). Resultados similares fueron descritos por Nsiah-Gyambibi et al. (2023), quienes desarrollaron un sistema de vermifiltración asistido por macrófitas (MAV), combinando lombrices y plantas acuáticas.

Dicho sistema logró más del 60 % de remoción de sólidos y nutrientes y más del 90 % de eliminación de patógenos, demostrando que la sinergia entre lombrices y vegetación mejora la oxigenación, eficiencia y sostenibilidad del proceso, en coincidencia con los mecanismos observados en esta investigación.

El humedal artificial, plantado con *Chrysopogon zizanioides*, mostró incrementos del OD de 0,45 a 0,84 mg/L y de TAO de 3,19 a 27,69 mg/L/h, lo que evidencia su efectividad en la reoxigenación del agua. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Saeed et al. (2022), quienes obtuvieron eficiencias de remoción de hasta 96 % de DBO₅ y 99 % de DQO en humedales con *Phragmites*, lombrices y celdas microbianas, destacando la descomposición orgánica, la nitrificación y la adsorción como mecanismos principales. De igual modo, Ramírez (2023) reportó que *Canna spp.*, *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* alcanzaron remociones de hasta 95,92 % de DBO y 99,99 % de *Escherichia coli*, reafirmando que la selección de especies vegetales adecuadas puede optimizar el rendimiento de los humedales artificiales.

El lombrifiltro alcanzó una eficiencia superior, con un incremento de TAO de 3,19 a 43,64 mg/L/h (1268,03 %), confirmando su alta capacidad de aireación y degradación biológica. Estos resultados coinciden con Chino (2024), quien reportó una eficiencia de 70 % en DBO₅ y 32 % en DQO empleando *Eisenia foetida*, destacando la influencia de la temperatura y la humedad del lecho. Asimismo, Saboya (2021) evidenció que *E. foetida* presentó mayores remociones (92 % de DBO₅ y 86 % de DQO) que *Lumbricus terrestris*, lo que explica que la combinación de ambas especies en esta investigación favoreciera una descomposición más homogénea y una oxigenación constante del efluente tratado.

Los resultados también se relacionan con los de Briceño y Rivera (2024), quienes demostraron que la integración de humedales artificiales con lombrices (*Cortaderia selloana* y *Eisenia foetida*) elevó la eficiencia del tratamiento, logrando remociones de 85 % de DBO y 84 % de DQO. De manera complementaria, Rodrigo y Vega (2020) concluyeron que los humedales artificiales superan en eficiencia a los biodigestores y cumplen con los Límites Máximos Permisibles del D.S. N.º 003-2010-MINAM. Ambas investigaciones respaldan el desempeño sostenido observado en este estudio, en el que ambos sistemas biológicos mantuvieron altos niveles de eficiencia, bajo costo operativo y compatibilidad con la normativa ambiental peruana.

Los hallazgos de esta investigación confirman que el lombrifiltro y el humedal artificial son tecnologías complementarias, sostenibles y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica. El lombrifiltro presentó la mayor eficiencia en

la tasa de absorción de oxígeno, mientras que el humedal artificial contribuyó a la estabilización del pH y a la eliminación de materia orgánica. En coherencia con Nsiah-Gyambibi et al. (2023), Saeed et al. (2022) y Ramírez (2023), la combinación de lombrices y macrófitas representa una estrategia eficaz para optimizar la oxigenación y depuración del agua, consolidando una alternativa viable para comunidades rurales y garantizando la sostenibilidad del recurso hídrico y el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

CONCLUSIONES

El estudio demuestra que tanto el lombrifiltro como el humedal artificial son tecnologías efectivas en la mejora de la tasa de absorción de oxígeno (TAO) en aguas residuales de matadero. Ambos sistemas logran incrementar los niveles de oxígeno disuelto en el efluente tratado, con el lombrifiltro mostrando una mayor eficiencia en comparación con el humedal artificial, especialmente en aguas residuales con alta carga orgánica.

El lombrifiltro, a través de la acción de las lombrices y los materiales filtrantes, favorece no solo la descomposición de la materia orgánica, sino también la oxigenación del agua tratada. Esta tecnología resalta por su capacidad para mejorar los niveles de oxígeno en el efluente, lo que confirma su potencial en el tratamiento de aguas residuales con alta demanda orgánica.

El humedal artificial, por su parte, muestra un rendimiento positivo en el aumento de oxígeno disuelto, gracias al proceso de fitodepuración, donde las raíces de las plantas facilitan el intercambio de gases y la reoxigenación del agua. Aunque con un incremento más moderado en la tasa de absorción de oxígeno, el humedal demuestra ser una opción viable y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales.

Ambos sistemas presentan ventajas significativas por ser tecnologías sostenibles y de bajo costo, ambas tienen la capacidad para aumentar el oxígeno disuelto, el pH y la biodegradabilidad del agua, mejorando así su calidad. Muy favorables para ser usadas especialmente para comunidades rurales.

Los sistemas de lombrifiltro y humedal artificial constituyen soluciones efectivas y prácticas para el tratamiento de aguas residuales, con resultados que contribuyen a la mejora de la calidad del agua y la sostenibilidad ambiental. Estas tecnologías ofrecen una alternativa viable para su implementación en zonas con necesidades de tratamiento de aguas residuales, apoyando la transición hacia un manejo más ecológico y accesible de los recursos hídricos.

RECOMENDACIONES

Evaluar diferentes especies de lombrices en el lombrifiltro para identificar aquella que maximice la absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero y mejore la eficiencia del tratamiento.

Evaluar distintos materiales filtrantes en el lombrifiltro, como granulometrías de grava y sustratos naturales, con el fin de optimizar el diseño y el rendimiento del sistema.

Evaluar diversas especies vegetales en el humedal artificial para identificar aquellas con mayor capacidad de reoxigenación y mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Profundizar en el uso combinado del lombrifiltro y el humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales, a fin de potenciar la remoción de contaminantes y mejorar la calidad del agua tratada.

Impulsar el uso de lombrifiltros y humedales artificiales en comunidades rurales con recursos limitados, promoviendo su implementación por parte de autoridades locales y entidades ambientales como alternativa económica y sostenible.

Analizar parámetros como DBO y DQO en futuros estudios para complementar la evaluación de la calidad del agua tratada y fortalecer los resultados obtenidos en el análisis de la TAO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2022). *Measurement of oxygen transfer in clean water (ASCE/EWRI 2-22)*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415641>
- Barrett, L. M. (2014). *Wastewater treatment: processes, management strategies and environmental/health impacts*. Nova Science Publishers, Inc.
- Bernal, D., Restrepo, I., & Grueso-Casquete, S. (2021). *Key criteria for considering decentralization in municipal wastewater management*. *Heliyon*, 7 (3), e06375. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06375>
- Briceño, D. D., & Rivera, L. K. (2024). *Eficacia de un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales domésticas del sector Alto Shamana Huamachuco, La Libertad, 2024* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/44488>
- Bustillo-Lecompte, C., & Mehrvar, M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances.. *Journal of environmental management*, 161, 287-302 . <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.008>
- Castillo Sanchez, J. G., & Chimbo Solorzano, J. E. (2021). Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales. *Enfoque UTE*, 12 (2), 80-99. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.746>
- Chino Rodrigo, C. M. (2024). *Evaluación del tratamiento de aguas residuales mediante el lombrifiltro, en el Centro Experimental Kallutaca* [Tesis de grado, Universidad Pública de El Alto]. Repositorio Institucional UPEA. <http://repositorio.upea.bo/jspui/handle/123456789/1730>
- Delgadillo, A., García-Lorenzo, C., & García-Rodríguez, M. I. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. *Revista Ibérica de Recursos Hídricos / Aguasresiduales*. <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales>

- Drinan, J., & Spellman, F. R. (2013). *Water and wastewater treatment: a guide for the nonengineering professional* (2nd ed). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12354>
- Fahim, I. S., & Said, L. (2023). *Wastewater treatment: Recycling, management, and valorization of industrial solid wastes*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Galindo Montero, A. A., Berrio Arrieta, Y. M., & Pimienta Serrano, E. V. (2024). Treatment of Slaughterhouse Wastewater through a Series System: Upflow Anaerobic Reactor and Artificial Wetland. *Water*, 16(5), 700. <https://doi.org/10.3390/w16050700>
- Hannan, J. (2020). *Meatsplaining: the animal agriculture industry and the rhetoric of denial*. Sydney University Press.
- Ilyas, M., Ahmad, W., Khan, H., Yousaf, S., Yasir, M., & Khan, A. (2019). Environmental and health impacts of industrial wastewater effluents in Pakistan: a review. *Reviews on Environmental Health*, 34, 171 - 186. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0078>
- Jones, E. R., van Vliet, M. T. H., Qadir, M., & Bierkens, M. F. P. (2021). Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 13, 237–254. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>
- Kumar, M., Singh, N. K., & Mathuriya, A. S. (2025). *Integrated bioelectrochemical-constructed wetland system for future sustainable wastewater treatment*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-96-2814-8>
- Langergraber, G., Dotro, G., Nivala, J., Rizzo, A., & Stein, O. R. (2020). *Wetland technology : practical information on the design and application of treatment wetlands*. IWA Publishing.
- Liu, W., Jordan, C. M., Cherubini, F., Hu, X., & Fu, D. (2021). Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: A case study in Kunshan, China. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125046>
- Montero-Vega, F., Molina-Cedeño, C., Pillco-Herrera, B., Sarduy-Pereira, L., & Diéguez-Santana, K. (2020). Evaluación del impacto ambiental de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales. *Caso río Pindo Chico, Puyo, Pastaza, Ecuador*. , 3, 23-39. <https://doi.org/10.22206/cac.2020.v3i1.pp23-39>

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2009). Decreto Supremo N.º 022-2009-VIVIENDA, que modifica la Norma Técnica OS.090 "Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales" del Reglamento Nacional de Edificaciones. Diario Oficial El Peruano
- National Academy Press (NAP). (2002). *Estimating the public health benefits of proposed air pollution regulations*. National Academies Press.
- Nsiah-Gyambibi, R., Acheampong, E., Von-Kiti, E., & Larbi Ayisi, C. (2023). Performance evaluation of developed macrophyte-assisted vermifiltration system designed with varied macrophytes and earthworm species for domestic wastewater treatment. *PLoS ONE*, 18(3), e0281953. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281953>
- Panduro Aliaga, R. J. (2017). *Tratamiento integral de las aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Moyobamba en un biorreactor anaeróbico tipo UASB a nivel piloto* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. *Repositorio Institucional UNSM*. <http://hdl.handle.net/11458/2389>
- Parray, J. A., Li, W.-J., & Haghi, A. K. (2025). *Zero liquid discharge wastewater treatment system : from introduction to application*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-84909-1>
- Passos Pequeno, A. (2022). *Monitoreo sanitario de cerdos en mataderos: una revisión anatómica, etiológica y patológica*. EUNA.
- Poole, D., & Jones, A. (2017). Measurement of the maximum oxygen uptake Vo_{2max} : $\dot{V}o_{2peak}$ is no longer acceptable.. *Journal of applied physiology*, 122 4, 997-1002 . <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01063.2016>
- Ramirez, K. M. (2023). *Eficiencia técnica para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno y Eschericia Coli. Aplicando humedal artificial, Lima, 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/33764>
- Rodrigo, E. C., & Vega, O. J. (2020). *Estudio comparativo de la eficiencia entre los biodigestores y los humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/23900>
- Rivera Díaz, F. A., & Arévalo Sánchez, K. L. (2015). *Dimensionamiento de un humedal artificial como alternativa para el tratamiento de las aguas residuales en la*

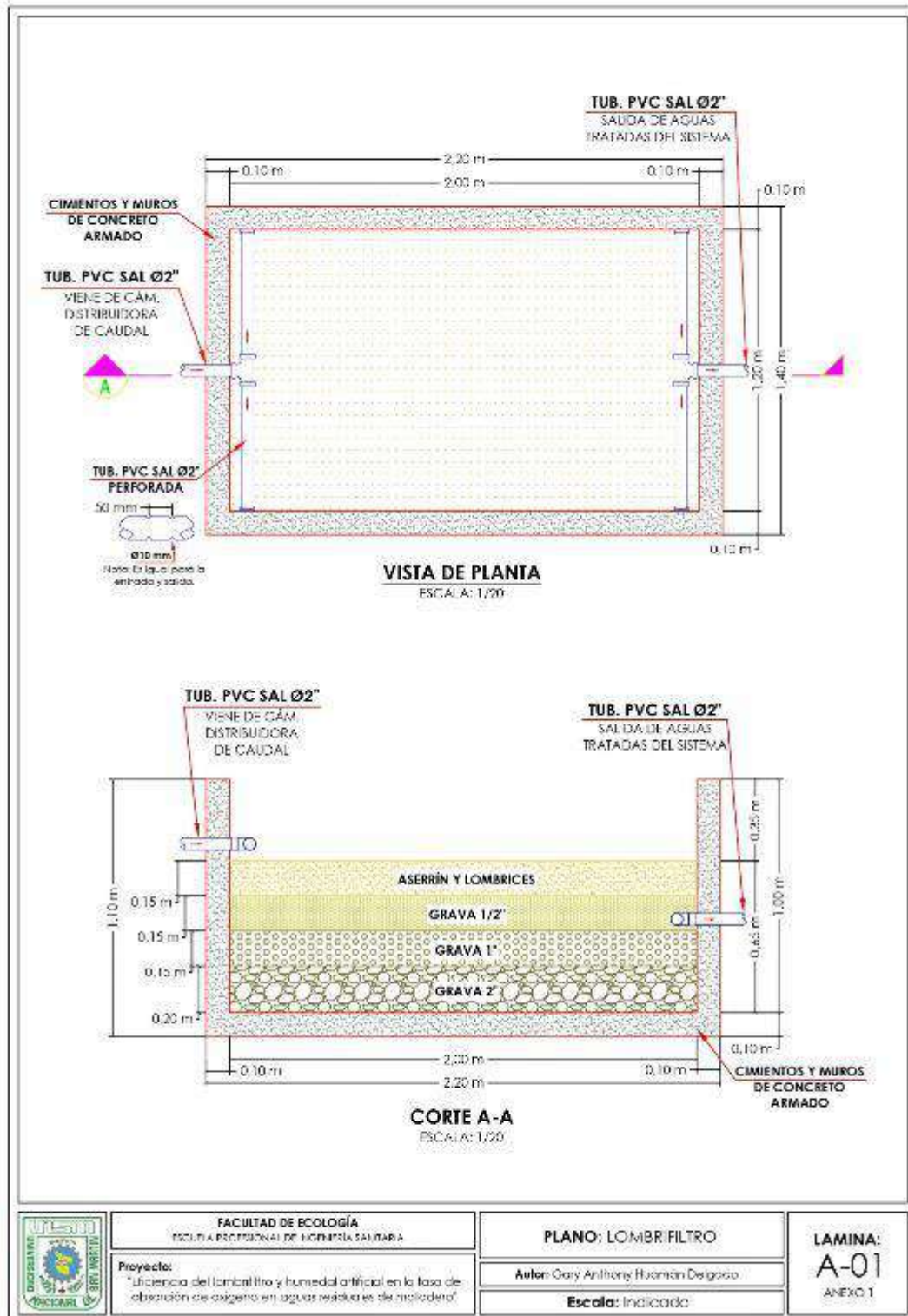
Universidad Nacional de Ucayali [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. *Repositorio Institucional UNU*.

- Romero Rojas, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño* (3.ª ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rouland, G., Safferman, S. I., Schwehofer, J. P., & Garmyn, A. J. (2024). Characterization of Low-Volume Meat Processing Wastewater and Impact of Facility Factors. *Water*, 16(4), 540. <https://doi.org/10.3390/w16040540>
- Saapi, S. S. Y., Andrianisa, H. A., Zorom, M., Lawani, M. A., Kouassi, H. A. A., & Ahossouhe, M. S. (2024). New developments on vermifiltration as a bio-ecological wastewater treatment technology: Mechanism, application, performance, modelling, optimization, and sustainability. *Heliyon*, 10(4), e25795. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25795>
- Saboya Rios, X. V. (2018). *Eficiencia del método de lombrifiltro en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas en el Distrito de Chachapoyas-Amazonas*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. Repositorio Institucional UNTRM. <http://hdl.handle.net/20.500.12840/1123>
- Saboya Ríos, X. V. (2021). Eficiencia del método de lombrifiltro en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas. *Maro de la Investigación*, 6(1), 1–14. <https://doi.org/10.17162/rmi.v6i1.1439>
- Saeed, T., Majed, N., Yadav, A. K., Hasan, A., & Miah, M. J. (2022). Constructed wetlands for drained wastewater treatment and sludge stabilization: Role of plants, microbial fuel cell and earthworm assistance. *Chemical Engineering Journal*, 430 (Part 2), 132907. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132907>
- Saldaña Yrigoín, E. F. (2019). *Efecto del biol y biosol obtenidos de aguas residuales del matadero municipal de Moyobamba en el rendimiento de Lactuca sativa ("Lechuga") – 2017* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio Institucional UNSM. <http://hdl.handle.net/11458/3761>
- Sandoval, M. A., & Salazar, R. (2021). Electrochemical treatment of slaughterhouse and dairy wastewater: Toward making a sustainable process. *Current Opinion in Electrochemistry*, 26, 100662. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.100662>
- SENASA. (2020). *Procedimientos operativos estandarizados de saneamiento e inocuidad (POE)*. Lima, Perú: SENASA.

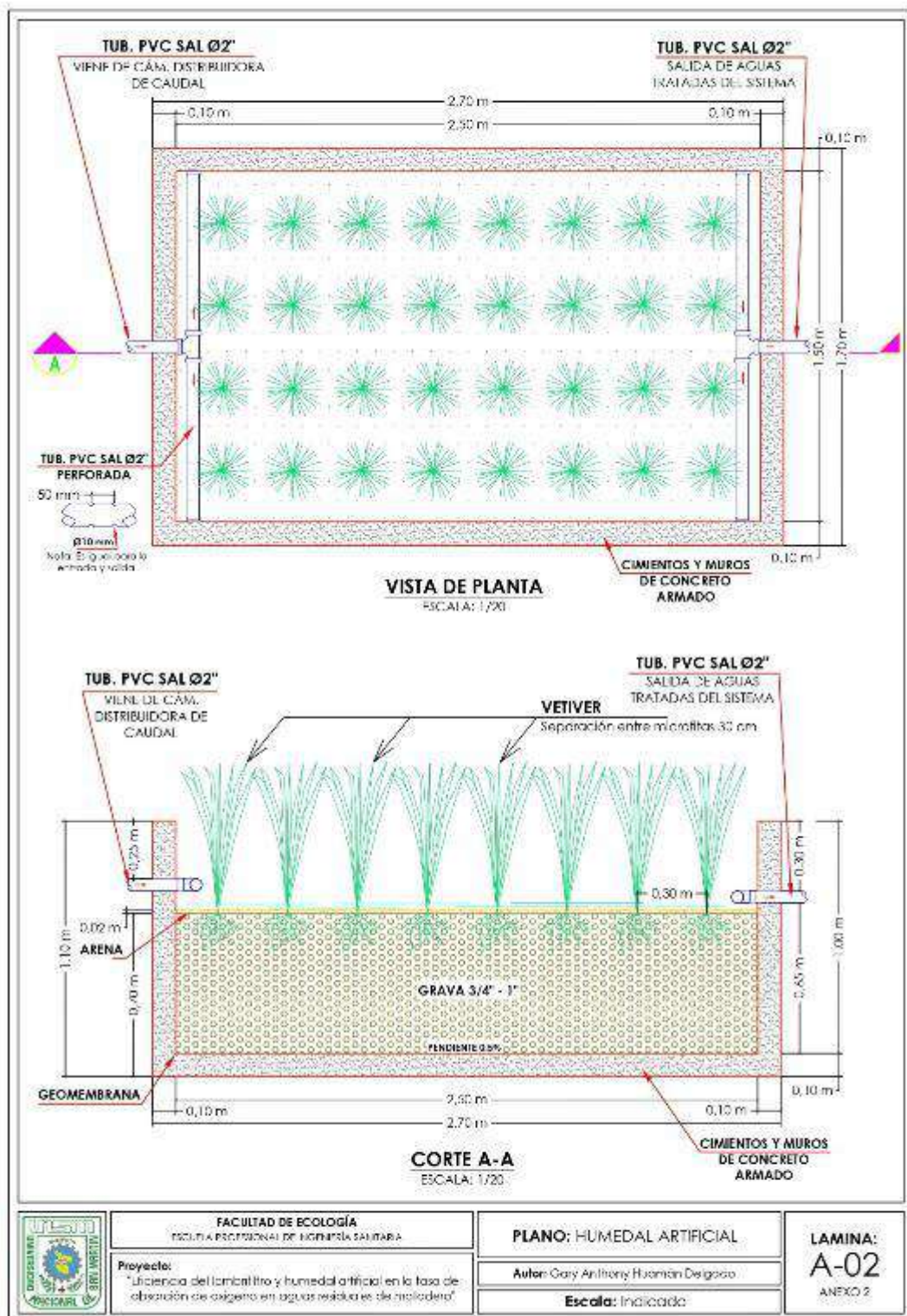
- Shah, M. P. (2023). *Recent trends in constructed wetlands for industrial wastewater treatment*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-2564-3>
- Shah, M. P. (2022). *Wastewater treatment: molecular tools, techniques, and applications*. CRC Press.
- Stefanakis, A. (2022). *Constructed wetlands for wastewater treatment in hot and arid climates*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-03600-2>
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS). (2015). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento*. Tarea Asociación Gráfica Educativa.
- Tohá, J. (2016). *Vermifiltración: Tratamiento de aguas residuales con lombrices de tierra*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Vásquez Romero, R., & Ballesteros Chavarro, H. (2008). *Manual de lombricultura : crianza de la lombriz roja Californiana (Eisenia foetida)*. Produmedios.
- Valenzuela Contreras, L. E. (2021). *Comparación de eficiencias de dos filtros lentos usando zeolita y antracita como medios filtrantes para el tratamiento del efluente de un reactor UASB* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. *Repositorio Institucional UNI*. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/22300>

ANEXOS

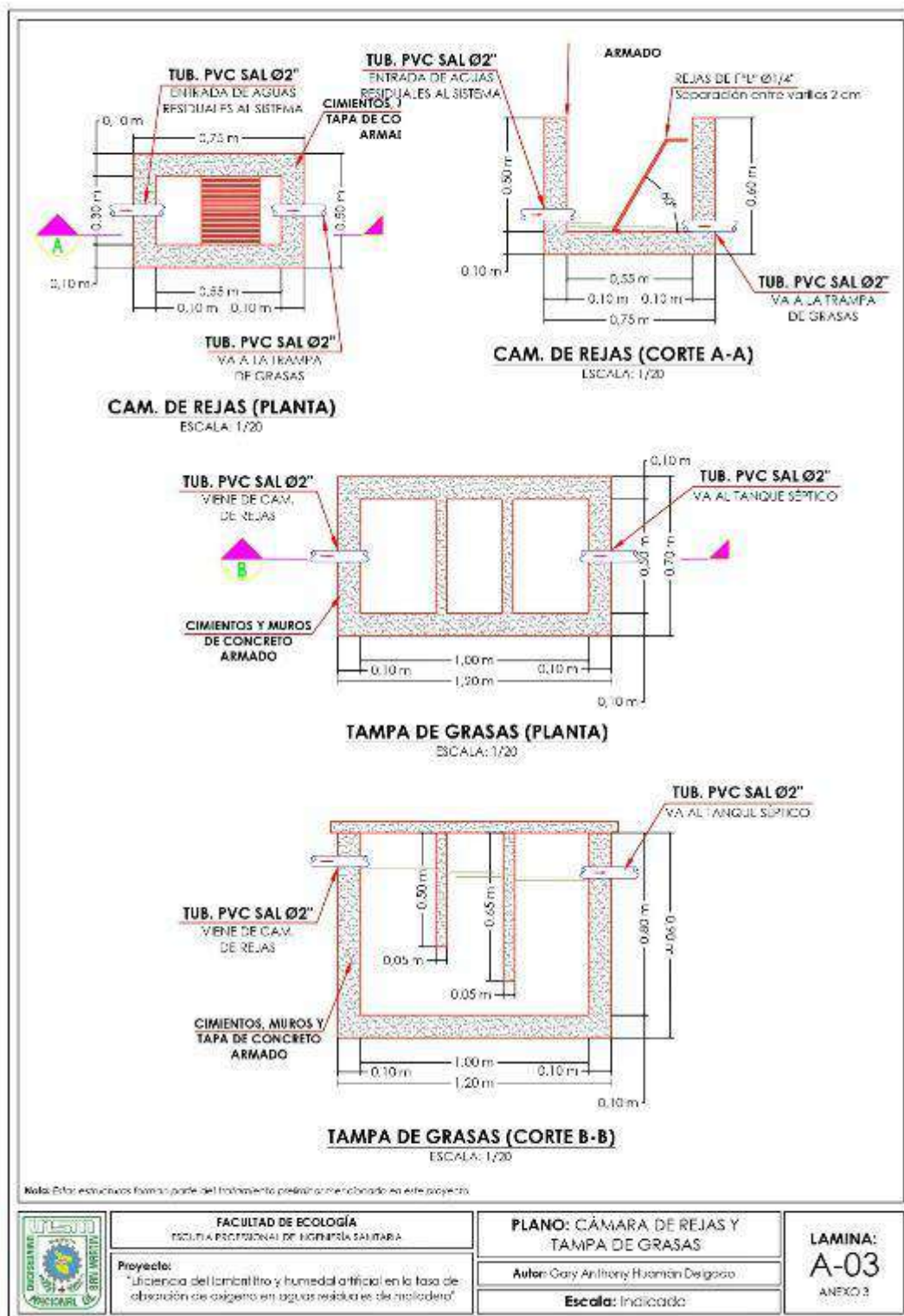
Anexo 1. Plano de lombrifiltro



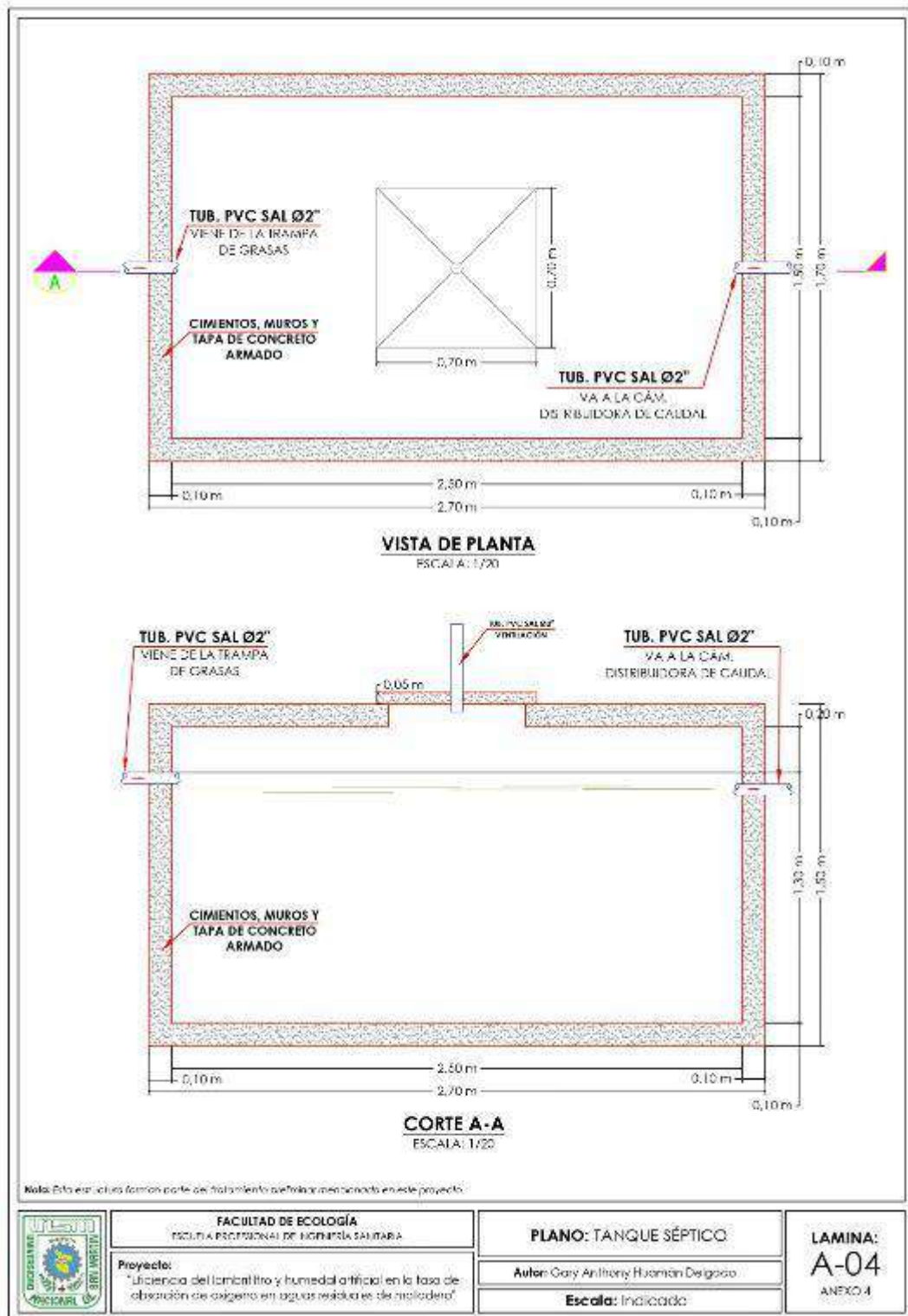
Anexo 2. Plano del humedal artificial



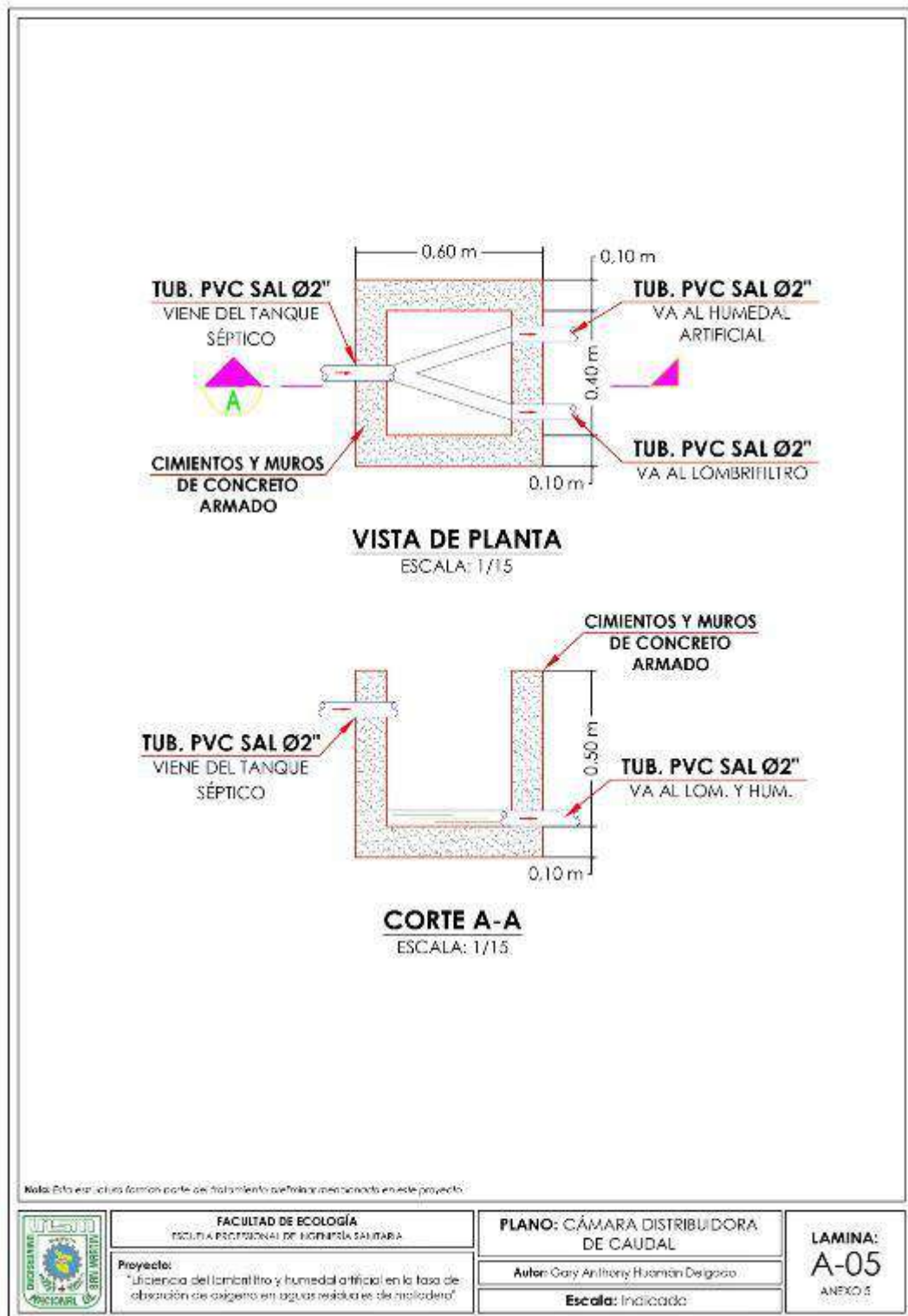
Anexo 3. Plano de cámara de rejillas y trampa de grasas



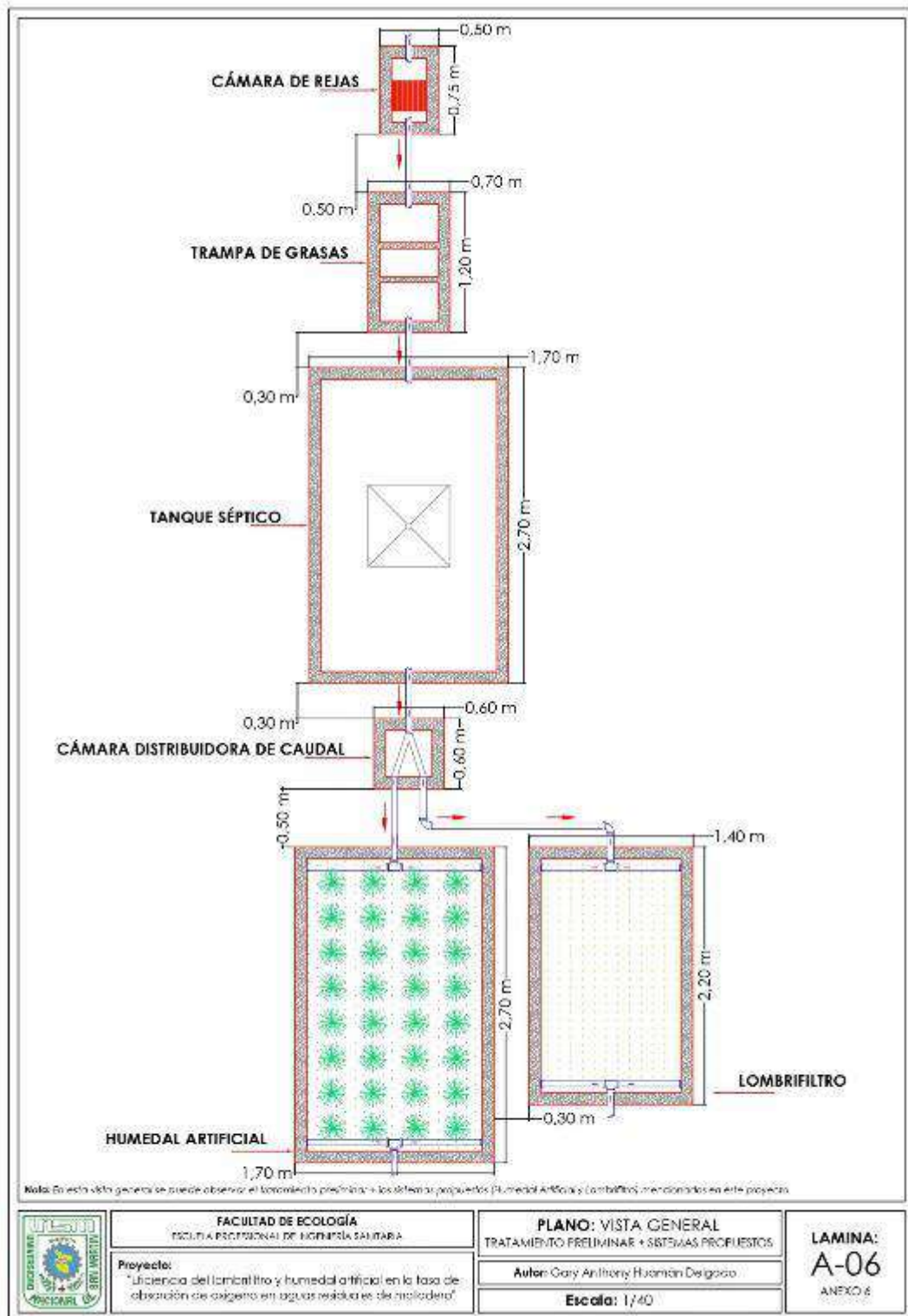
Anexo 4. Plano de tanque séptico



Anexo 5. Plano de cámara distribuidora de caudal



Anexo 6. Plano de vista general



Anexo 7. Registro fotográfico



Fotografía 1. Efluente del camal municipal (aguas no tratadas).



Fotografía 2. Aguas residuales pasando por primer parte del tratamiento preliminar



Fotografía 3. Vista general del tratamiento preliminar: Cámara de rejas (1), trampa de grasas (2) y tanque séptico (3). Ubicados en ese orden sucesivamente.



Fotografía 4. Llegada de aguas residuales a la cámara distribuidora de caudal.



Fotografía 5. Lombrifiltro en funcionamiento.



Fotografía 6. Humedal artificial en funcionamiento.



Fotografía 7. Lombrifiltro y humedal artificial en funcionamiento.



Fotografía 8. Efluente de los sistemas propuestos (aguas tratadas).



Fotografía 9. Análisis de los parámetros físicos en el laboratorio.



Fotografía 10. Análisis de los parámetros químicos en el laboratorio.

Anexo 8. Metrados y presupuestos (lombrifiltro)

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	METRADO	PARCIAL (S/.)
01	LOMBRIFILTRO			2545.54
01.01	TRABAJOS PRELIMINARES			12.84
01.01.01	LIMPIEZA DE TERRENO MANUAL	m ²	4.25	7.48
01.01.02	TRAZO, NIVELES Y REPLANTEO PARA ESTRUCTURAS	m ²	3.08	5.36
01.02	MOVIMIENTO DE TIERRAS			187.84
01.02.01	EXCAVACIÓN (PULSO) EN TERRENO NORMAL	m ³	2.16	30.41
01.02.02	REFINE, NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN EN TERRENO NORMAL	m ²	3.08	69.82
01.02.03	EXCAVACIÓN MANUAL DE ZANJAS, T-NORMAL, A=0.15M, H=0.30M	m	0.50	5.88
01.02.04	REFINE, NIVELACIÓN Y CONFORMACIÓN DE FONDOS DE ZANJA, A=0.15 M	m	0.50	5.88
01.02.05	CAMA DE APOYO CON MATERIAL PROPIO SELECCIONADO PARA TUBERÍA, A=0.15 M, E=0.10 M	m	0.50	6.49
01.02.06	PROTECCIÓN DE TUBERÍA 0.30MP/E DE CLAVE C/ MAT. PROPIO SELECCIONADO, A=0.15M	m	0.50	7.66
01.02.07	RELLENO COMPACTADO DE ZANJA PARA TUBERÍA CON MATERIAL PROPIO, H=0.30M, A=0.15M	m	0.50	7.66
01.02.08	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE (PULSO), DP 30M	m ³	2.80	53.26
01.03	OBRAS DE CONCRETO ARMADO			2003.32
01.03.01	CIMENTOS			769.08
01.03.01.01	ACERO CORRUGADO FY=4200 KG/CM2 GRADO 60	kg	33.05	645.47
01.03.01.02	CONCRETO F'C =175 KG/CM2 EN CIMENTOS	m ³	0.31	123.61
01.03.02	CONCRETO ARMADO EN MUROS			1234.24
01.03.01.01	ACERO CORRUGADO FY=4200 KG/CM2 GRADO 60	kg	30.64	598.40
01.03.01.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN MUROS	m ²	12.96	386.08
01.03.01.03	CONCRETO F'C =175 KG/CM2 EN MUROS	m ³	0.65	249.76
01.04	SUMINISTRO E INSTALACION DE ACCESORIOS			124.52
01.04.01	SUMINISTRO E INST. TUBERÍA PVC SAL DE Ø 2"	m	3.10	85.50
01.04.02	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE ACCESORIOS EN LOMBRIFILTRO	und	1.00	39.02
01.05	VARIOS			217.80
01.05.01	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ASERRÍN	m ³	0.36	15.03
01.05.02	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE GRAVA DE 1/2"	m ³	0.36	25.85
01.05.03	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE GRAVA DE 1"	m ³	0.36	25.85
01.05.04	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE GRAVA DE 2"	m ³	0.48	25.82
01.05.05	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE LOMBRICES	kg	3.00	125.28
COSTO TOTAL DEL LOMBRIFILTRO				S/. 2545.54

Nota: Los datos obtenidos al metrar esta estructura fueron procesados en el programa S10 Presupuestos, posteriormente, fueron copiados en esta tabla.

Anexo 9. Metrados y presupuestos (humedal artificial)

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	METRADO	PARCIAL (S/.)
01	HUMEDAL ARTIFICIAL			4889.36
01.01	TRABAJOS PRELIMINARES			131.44
01.01.01	LIMPIEZA DE TERRENO MANUAL	m ²	6.00	42.30
01.01.02	TRAZO, NIVELES Y REPLANTEO PARA ESTRUCTURAS	m ²	4.59	89.14
01.02	MOVIMIENTO DE TIERRAS			234.42
01.02.01	EXCAVACIÓN (PULSO) EN TERRENO NORMAL	m ³	3.21	45.20
01.02.02	REFINE, NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN EN TERRENO NORMAL	m ²	4.59	104.06
01.02.03	EXCAVACIÓN MANUAL DE ZANJAS, T-NORMAL, A=0.15M, H=0.30M	m	0.50	3.46
01.02.04	REFINE, NIVELACIÓN Y CONFORMACIÓN DE FONDOS DE ZANJA, A=0.15 M	m	0.50	3.46
01.02.03	CAMA DE APOYO CON MATERIAL PROPIO SELECCIONADO PARA TUBERÍA, A=0.15 M, E=0.10 M	m	0.50	4.07
01.02.04	PROTECCIÓN DE TUBERÍA 0.30MP/E DE CLAVE C/ MAT. PROPIO SELECCIONADO, A=0.15M	m	0.50	7.66
01.02.07	RELLENO COMPACTADO DE ZANJA PARA TUBERÍA CON MATERIAL PROPIO, H=0.30M, A=0.15M	m	0.50	7.66
01.02.05	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE (PULSO), DP 30M	m ³	4.18	58.85
01.03	OBRAS DE CONCRETO ARMADO			2588.88
01.03.01	CIMENTOS			1199.18
01.03.01.01	ACERO CORRUGADO FY=4200 KG/CM2 GRADO 60	kg	52.01	1015.76
01.03.01.02	CONCRETO F'C =175 KG/CM2 EN CIMENTOS	m ³	0.46	183.42
01.03.02	CONCRETO ARMADO EN MUROS			1389.70
01.03.01.01	ACERO CORRUGADO FY=4200 KG/CM2 GRADO 60	kg	37.92	740.58
01.03.01.02	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO NORMAL EN MUROS	m ²	16.00	346.08
01.03.01.03	CONCRETO F'C =175 KG/CM2 EN MUROS	m ³	0.76	303.04
01.04	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE ACCESORIOS			139.43
01.04.01	SUMINISTRO E INST. TUBERÍA PVC SAL DE Ø 2"	m	4.10	100.41
01.04.02	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE ACCESORIOS EN HUMEDAL	und	1.00	39.02
01.05	VARIOS			1795.13
01.05.01	SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE GEOMEMBRANA, E=1MM	m ²	10.15	252.63
01.05.02	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE GRAVA DE 3/4" A 1"	m ³	2.63	214.74
01.05.03	SUMINISTRO DE ARENA PARA SOPORTE DE MACRÓFITAS	m ³	0.19	16.14
01.05.04	SUMINISTRO Y PLANTACIÓN DE PLANTAS MACRÓFITAS	und	32.00	1311.68
COSTO TOTAL DEL HUMEDAL ARTIFICIAL				S/. 4889.36

Nota: Los datos obtenidos al metrar esta estructura fueron procesados en el programa S10 Presupuestos, posteriormente, fueron copiados en esta tabla.

Gary Anthony Huamán Delgado

Eficiencia del lombrifiltro y humedal artificial en la tasa de absorción de oxígeno en aguas residuales de matadero

 INFORME DE TESIS

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:573420507

Fecha de entrega

31 mar 2026, 9:11 GMT-5

Fecha de descarga

31 mar 2026, 9:21 GMT-5

Nombre del archivo

INFORME FINAL DE TESIS DE GARY ANTHONY HUAMÁN DELGADO 12-03-26.docx

Tamaño del archivo

9.1 MB

70 páginas

15.361 palabras

86.566 caracteres




14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 9%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.