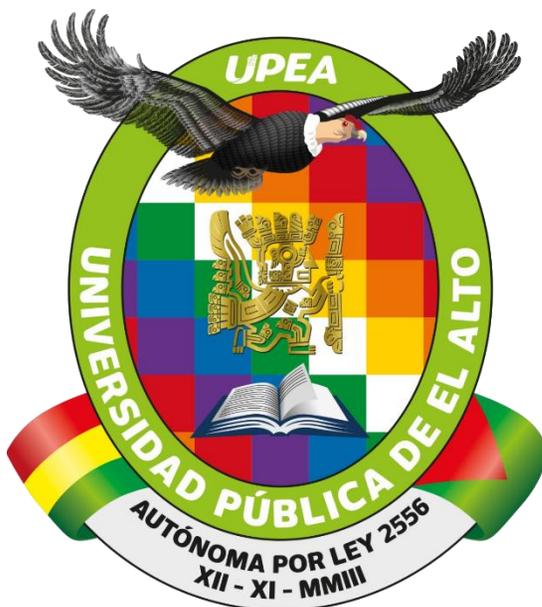


**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
MEDIANTE EL LOMBRIFILTRO, EN EL CENTRO EXPERIMENTAL
KALLUTACA**

Por:

Cesar Marcelo Chino Rodrigo

EL ALTO – BOLIVIA

Octubre, 2024

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE EL
LOMBRIFILTRO, EN EL CENTRO EXPERIMENTAL KALLUTACA**

*Tesis de Grado presentado
como requisito para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo*

Cesar Marcelo Chino Rodrigo

Asesor:

Lic. Ing. Edwin Guarachi Laura

Tribunal Revisor:

Ph. D. M. Sc. Lic. Ing. Humberto Nelson Sainz Mendoza

M. Sc. Lic. Ing. Simar Fernando Catari Condori

M. Sc. Lic. Ing. Diego Orlando Tola Aguilar

Aprobada

Presidente Tribunal Examinador



DEDICATORIA:

A Dios por darme la vida y la fortaleza para poder alcanzar todos mis sueños esperando que este solo sea uno de tantos.

A mis padres Eusebio Chino Vargas y Martina Rodrigo Villasante quienes con su ejemplo, sacrificio y amor me han guiado en la vida y cuando se han complicado las cosas sus consejos y apoyo único me han servido para seguir adelante.

A mis hermanas Maria, Edith y Gladys por su comprensión y apoyo constante, que me dio de inspiración para continuar hacia adelante con mis metas y sueños.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi profundo agradecimiento:

A quienes hicieron posible y dieron algo de si para la realización de este trabajo, a Dios Nuestro Padre, por su infinita providencia y permitirme llegar al término de la investigación.

A la Universidad Pública de El Alto, y a la carrera de Ingeniería Agronómica, por darme la oportunidad de pertenecer a dicha institución y proporcionarme los conocimientos necesarios adquiridos para mi formación académica.

De igual manera a todo el personal encargado del módulo de Bioabonos de la carrera Ingeniería Agronómica por su confianza a mi persona como tesista, quienes me brindaron el espacio del trabajo de investigación.

A mi asesor Lic. Ing. Edwin Guarachi Laura, por brindarme su conocimiento, orientación y entrañable amistad, ya que siempre me colaboro en todo momento para la presentación de este documento y por estar siempre pendiente de mi trabajo, por su constante preocupación para lograrlo.

Al tribunal revisor: Ph. D. M. Sc. Lic. Ing. Humberto Nelson Sainz Mendoza, M. Sc. Lic. Ing. Simar Fernando Catari Condori y M. Sc. Lic. Ing. Diego Orlando Tola Aguilar, por sus sugerencias y recomendaciones que enriquecieron para la culminación de este trabajo.

A toda mi familia; deseo expresar un profundo agradecimiento, a mis padres por apoyarme en mis estudios y en la realización de esta Tesis, por sus sacrificios y todo lo que me han dado. A mis Amigos y compañeros y finalmente un agradecimiento sincero a todas las personas que me han ayudado directa o indirectamente durante tiempo de realización y redacción de esta tesis.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS.....	i
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
ABREVIATURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Características de las aguas residuales.....	4
2.1.1. Aguas residuales.....	4
2.1.2. Tipos de aguas residuales	4
2.1.2.1. Aguas residuales domésticas.....	4
2.1.2.2. Aguas residuales industriales.....	5
2.1.2.3. Aguas residuales municipales.....	5

2.1.3.	Características de las aguas residuales domésticas	5
2.1.3.1.	Características físicas	5
2.1.3.1.1.	Color.....	5
2.1.3.1.2.	Sólidos.....	5
2.1.3.2.	Características químicas	6
2.1.3.3.	Características biológicas.....	7
2.2.	Tipos de tratamiento de aguas residuales domésticas	8
2.2.1.	Tratamiento preliminar	8
2.2.1.1.	Tamizado	8
2.2.1.2.	Rejas.....	9
2.2.2.	Tratamiento primario	9
2.2.2.1.	Coagulación	9
2.2.2.2.	Sedimentación	9
2.2.3.	Tratamiento secundario.....	9
2.2.3.1.	Filtros percoladores.....	10
2.2.3.2.	Biodiscos.....	10
2.2.3.3.	Lodos activados	10
2.2.4.	Tratamientos naturales o sistemas biológicos no convencionales	11
2.2.4.1.	Lagunas de estabilización facultativas.....	11
2.2.4.2.	Humedales artificiales	12
2.2.4.3.	Método del lombrifiltro	12
2.3.	Descripción del lombrifiltro	12
2.3.1.	Inicios del sistema de biofiltración con lombrices, Lombrifiltro.	13
2.3.2.	Características del Lombrifiltro	14
2.3.3.	Descripción y criterios de diseño del lombrifiltro	16
2.3.4.	Mantenimiento del Lombrifiltro	17

2.3.5.	Ventajas y desventajas del sistema de tratamiento	17
2.3.5.1.	Ventajas	17
2.3.5.2.	Desventajas	18
2.3.6.	Aplicaciones	19
2.3.6.1.	Implementación a nivel mundial	19
2.3.6.2.	Implementación en Bolivia.....	20
2.4.	La lombricultura	20
2.5.	<i>Eisenia foetida</i> o Lombriz Roja Californiana.....	21
2.5.1.	Taxonomía	22
2.5.2.	Anatomía de la lombriz Californiana.....	23
2.5.2.1.	Sistema digestivo	23
2.5.2.2.	Sistema respiratorio	23
2.5.2.3.	Sistema reproductivo.....	24
2.5.3.	Principales cualidades de la <i>Eisenia foetida</i>	24
2.5.4.	Condiciones ideales y desfavorables de su hábitat	25
2.5.4.1.	Temperatura.....	25
2.5.4.2.	Temperatura baja.....	25
2.5.4.3.	Acidez o pH.....	26
2.5.4.4.	Humedad.....	26
2.5.4.5.	Relación C/N	26
2.5.4.6.	Aireación	26
2.5.5.	El aserrín como sustrato para lombrices	27
2.5.6.	Tierra de diatomeas como material filtrante.....	27
2.6.	Marco legal	28
2.6.1.	Constitución Política del Estado	28
2.6.2.	Ley de Medio Ambiente.....	28

2.6.2.1.	Disposiciones relevantes para el Tratamiento de Aguas Residuales	28
2.6.2.2.	Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH).....	29
2.6.3.	Normas Técnicas y Específicas	29
2.6.3.1.	Norma Boliviana de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes (NB-512) 29	
2.6.3.2.	Norma Boliviana de Reúso de Aguas Residuales (NB-742)	29
2.6.4.	Planes y Políticas Nacionales	29
2.6.4.1.	Plan Nacional de Saneamiento Básico.....	29
2.6.5.	Protocolo de muestreo de aguas residuales.....	30
2.6.5.1.	Principios importantes en la toma de muestras	30
2.6.5.2.	Toma de muestras	30
2.6.5.3.	Transporte de las muestras.....	31
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1.	Localización	32
3.1.1.	Ubicación Geográfica.....	32
3.1.2.	Características Edafoclimáticas	33
3.1.2.1.	Clima.....	33
3.1.2.2.	Suelo.....	33
3.2.	Materiales	33
3.2.1.	Material biológico	33
3.2.2.	Material de escritorio.....	33
3.2.3.	Material de campo.....	34
3.3.	Metodología	34
3.3.1.	Acondicionamiento del lombrifiltro.....	34
3.3.2.	Recolección de los componentes del lombrifiltro	35
3.3.3.	Capas filtrantes del lombrifiltro en el Centro Experimental Kallutaca	35
3.3.4.	Inoculación de Lombrices.....	36

3.3.5.	Distribución de agua en el lombrifiltro.....	36
3.3.6.	Muestreo	36
3.3.7.	Parámetros a determinar in situ y en laboratorio	37
3.3.8.	Metodología para toma de datos de parámetros fisicoquímicos in situ.....	37
3.3.9.	Especificaciones técnicas del equipo empleado.....	38
3.3.10.	Metodología para colecta de muestras de agua para análisis en laboratorio 38	
3.3.11.	Conservación de las muestras	39
3.4.	Análisis estadístico	39
3.4.1.	Evaluación del sistema de tratamiento	39
3.4.2.	Determinación de la eficiencia del lombrifiltro.....	39
3.4.3.	Análisis comparativo	40
3.4.4.	Variables de estudio.....	40
3.4.5.	Esquema de la investigación.....	41
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1.	Comportamiento climático del lombrifiltro.....	42
4.2.	Análisis físicos químicos registrados in situ de los puntos de muestreo	43
4.2.1.	Temperatura	43
4.2.2.	Conductividad eléctrica	44
4.2.3.	Turbidez.....	45
4.2.4.	Sólidos disueltos totales.....	47
4.2.5.	Potencial de hidrogeno (pH).....	49
4.2.6.	Oxígeno disuelto (OD).....	51
4.3.	Análisis de los parámetros químico-biológicos determinados en laboratorio de los puntos de muestreo.....	53
4.3.1.	Aceites y grasas.....	54
4.3.2.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	56

4.3.3.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	58
4.3.4.	Coliformes fecales.....	61
4.3.5.	Coliformes totales	63
5.	CONCLUSIONES.....	66
6.	RECOMENDACIONES.....	68
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	69
8.	ANEXOS	76

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Taxonomía de la lombriz Californiana o <i>Eisenia foetida</i>	22
Cuadro 2. Parámetros físico-químicos valorados in situ con el equipo multiparamétrico en el afluente y efluente del lombrifiltro	37
Cuadro 3. Parámetros químico-biológicos valorados en laboratorio del afluente y efluente del lombrifiltro	37
Cuadro 4. Características del medidor multiparamétrico.....	38
Cuadro 5. Parámetros medidos para la verificación de la calidad del agua residual	40
Cuadro 6. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para la Turbidez	47
Cuadro 7. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para los Sólidos Disueltos Totales.....	49
Cuadro 8. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para el Potencial de Hidrógeno (pH).....	51
Cuadro 9. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para el Oxígeno Disuelto	53
Cuadro 10. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para Aceites y Grasas	55
Cuadro 11. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	57
Cuadro 12. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) .	60
Cuadro 13. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para Coliformes Fecales.....	62
Cuadro 14. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333 para coliformes totales	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Lombrifiltro Modelo Sistema Tohá.....	15
Figura 2.	Capas del lombrifiltro	16
Figura 3.	Ubicación geográfica del Centro Experimental Kallutaca	32
Figura 4.	Corte transversal del lombrifiltro en el Centro Experimental Kallutaca.....	35
Figura 5.	Esquema del lombrifiltro instalado en el Centro Experimental Kallutaca-U.P.E.A.....	41
Figura 6.	Datos climatológicos registrados con el termo-higrómetro en el lombrifiltro del Centro Experimental Kallutaca.....	42
Figura 7.	Resultados de Temperatura (°C) del Afluente y Efluente	43
Figura 8.	Resultados de Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) del Afluente y Efluente.....	44
Figura 9.	Resultados de turbidez (NTU) del Afluente y Efluente.....	46
Figura 10.	Resultados de Solidos Disueltos Totales (mg/l) del Afluente y Efluente	48
Figura 11.	Resultados de Potencial de Hidrogeno (pH) del Afluente y Efluente	50
Figura 12.	Resultados de Oxígeno Disuelto (% de Saturación) del Afluente y Efluente 52	52
Figura 13.	Resultados de análisis de laboratorio para aceites y grasas (mg/l) del Afluente y Efluente.....	54
Figura 14.	Resultados de análisis de laboratorio para Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO_5 (mg/l) del Afluente y Efluente	56
Figura 15.	Resultados de análisis de laboratorio para Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/l) del Afluente y Efluente	58
Figura 16.	Resultados de análisis de laboratorio para Coliformes fecales (NMP/100 ml) del Afluente y Efluente	61
Figura 17.	Resultados de análisis de laboratorio para Coliformes totales (NMP/100 ml) del Afluente y Efluente	63

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l, según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH)	77
Anexo 2.	Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333.....	78
Anexo 3.	Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333.....	79
Anexo 4.	Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales incluido el lombrifiltro del Centro Experimental Kallutaca	81
Anexo 5.	Rehabilitación del lombrifiltro	82
Anexo 6.	Colocado y distribución del aserrín recolectado en el lombrifiltro	82
Anexo 7.	Pesado de la lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>)	82
Anexo 8.	Inoculación de la lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>)	83
Anexo 9.	Toma de datos físicos-químicos registrados in situ con el equipo multiparamétrico en el afluente y efluente.....	83
Anexo 10.	Etiquetado y codificación de los envases para las muestras a analizar en el laboratorio.....	83
Anexo 11.	Toma de las muestras en el afluente.....	84
Anexo 12.	Toma de muestras en el efluente	84
Anexo 13.	Color visual del agua residual del tratamiento mediante el lombrifiltro.....	84
Anexo 14.	Traslado de las muestras al laboratorio de Calidad Ambiental LCA.	85
Anexo 15.	Laboratorio de calidad ambiental (LCA), UMSA	85
Anexo 16.	Informes de los análisis las muestras del Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) de la UMSA	86

ABREVIATURAS

°C	Grado Celsius
cm	Centímetro
gr	Gramo
CE	Conductividad Eléctrica
TDS	Total Dissolved Solids
OD	Oxígeno Disuelto
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
pH	Potencial de Hidrogeno
uS/cm	Microsiemens por Centímetro
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
Turb	Turbidez
mg/l	Miligramos por litro
NMP/100 ml	Número Más Probable en 100 mililitros
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SENASBA	Servicio Nacional para la Sostenibilidad de servicios de saneamiento Básico
LCA	Laboratorio de Calidad Ambiental
RMCH	Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica

RESUMEN

Evaluación del tratamiento de aguas residuales mediante el lombrifiltro en el Centro Experimental Kallutaca.

El tratamiento de aguas residuales es un desafío global, especialmente en áreas con recursos limitados. Las tecnologías convencionales son costosas y difíciles de implementar, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas más sostenibles. En este contexto, el sistema de lombrifiltro, basado en el uso de lombrices californianas (*Eisenia foetida*), ha emergido como una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales.

El objetivo de esta investigación es evaluar la eficiencia del sistema de lombrifiltro en el tratamiento de aguas residuales domésticas en el Centro Experimental Kallutaca de la Universidad Pública de El Alto. Se busca determinar su capacidad para eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos, y comparar los resultados con los estándares legales vigentes en Bolivia.

Se utilizó un lombrifiltro compuesto por capas filtrantes y lombrices californianas, distribuidas en 60 canastillas de plástico con aserrín de madera como sustrato. El estudio analizó parámetros físicos (temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos disueltos totales), químicos (pH, oxígeno disuelto, aceites y grasas, DBO₅, DQO) y biológicos (coliformes fecales y totales) en el agua antes y después del tratamiento. Los datos fueron comparados con la normativa boliviana para evaluar la eficacia del sistema.

El sistema de lombrifiltro presentó una notable eficiencia en la reducción de la turbidez y en la concentración de coliformes fecales y totales, logrando disminuciones que oscilaron entre el 86% y el 99%. No obstante, la disminución de la DBO₅ y de la DQO alcanzó un 70% y un 32%, respectivamente. A pesar de estos resultados, los valores obtenidos para la DBO₅ y la DQO se mantuvieron por encima de los límites permisibles establecidos por la Ley del Medio Ambiente N° 1333 y el Decreto Supremo 24176.

Aunque el lombrifiltro demostró ser eficaz en la reducción de la carga microbiológica, su desempeño en la eliminación de materia orgánica no fue del todo satisfactorio. Se recomienda optimizar el diseño y operación del sistema para mejorar su eficiencia, especialmente en la remoción de DBO₅ y DQO, para cumplir con la normativa ambiental vigente.

ABSTRACT

Evaluation of wastewater treatment using the vermifilter at the Kallutaca Experimental Center.

Wastewater treatment is a global challenge, especially in resource-limited areas. Conventional technologies are expensive and difficult to implement, which has led to the search for more sustainable alternatives. In this context, the vermifilter system, based on the use of Californian earthworms (*Eisenia foetida*), has emerged as a promising solution for wastewater treatment.

The objective of this research is to evaluate the efficiency of the vermifilter system in the treatment of domestic wastewater at the Kallutaca Experimental Center of the Public University of El Alto. The aim is to determine its ability to eliminate physical, chemical and biological contaminants, and compare the results with the legal standards in force in Bolivia.

A vermifilter was used consisting of filter layers and Californian worms, distributed in 60 plastic baskets with wood sawdust as a substrate. The study analyzed physical (temperature, electrical conductivity, turbidity, total dissolved solids), chemical (pH, dissolved oxygen, oils and fats, BOD₅, COD) and biological (fecal and total coliforms) parameters in the water before and after treatment. The data were compared with Bolivian regulations to evaluate the effectiveness of the system.

The vermifilter system presented notable efficiency in reducing turbidity and the concentration of fecal and total coliforms, achieving reductions that ranged between 86% and 99%. However, the decrease in BOD₅ and COD reached 70% and 32%, respectively. Despite these results, the values obtained for BOD₅ and COD remained above the permissible limits established by Environmental Law No. 1333 and Supreme Decree 24176.

Although the vermifilter proved to be effective in reducing the microbiological load, its performance in removing organic matter was not entirely satisfactory. It is recommended to optimize the design and operation of the system to improve its efficiency, especially in the removal of BOD₅ and COD, to comply with current environmental regulations.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las actividades humanas, que usan agua producen aguas residuales a medida que crece la demanda de este recurso a nivel mundial, el volumen de las aguas residuales y su grado de contaminación se encuentran en constante incremento a nivel global. Donde la mayor parte de las aguas residuales se vierten al medio ambiente sin un tratamiento previo, esto repercute negativamente en la salud humana, producción económica, principalmente en la calidad de los recursos de agua dulce y los ecosistemas (Pulido *et al.*, 2019).

Las aguas residuales domésticas son consideradas, aquellas aguas cuyas características naturales fueron alteradas, esto debido a la intervención de las actividades diarias antropogénicas, que en consecuencia contienen alta carga orgánica, que está compuesta por aguas negras y aguas grises. La mayoría de estas aguas muestran gran cantidad de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitrógeno, fósforo, metales pesados; y sobre todo muestran la presencia de Coliformes totales y fecales; parámetros que son analizados para verificar la calidad de estas aguas (Marsilli, 2005).

Según Garkal *et al.* (2015), manifiestan que el método del lombrifiltro, tiene una calidad de agua adecuada para regadío ya que sus parámetros medidos se hallan dentro de las normativas vigentes aceptables de cada país así también son considerados tratamientos secundarios, además de ser económicas de operaciones y mantenimiento limpios; que pueden ser aplicadas a poblaciones pequeñas, así como centros poblados.

1.1. Antecedentes

En Colombia, en el 2015, en la ciudad de Pamplona se realizó el diseño y la construcción de un sistema de lombrifiltros para tratar las aguas residuales domésticas. Del mencionado estudio se obtuvieron los siguientes resultados 92.10% en todo el sistema, 92.1% en la remoción de materia orgánica a partir de DQO. A las conclusiones que se llegaron fueron que dicho sistema posee resultados favorables para tratar las aguas residuales domésticas (Ramón *et al.*, 2015).

En el municipio de Achocalla del departamento de La Paz, la empresa Flor de Leche S.R.L. realizó un estudio y la implementación de un biofiltro dinámico basado en lombrices

(Lombrifiltro), se establecieron los valores estables de remoción que se encuentran entre 90 y 92,5% en remoción de materia orgánica, con cantidades de suero de 20 a 30%, realizando riegos diarios con intervalos no mayores a una hora donde se construyó e implemento con base al caudal total y de acuerdo a sus parámetros contaminantes lo que dio una superficie de 20,4 m² de lombrifiltro alcanzándose remoción promedio de DQO desde 13200 a 2500 mg/L, porcentaje de remoción de 81% (Pérez, 2019).

En el ámbito local, en 2016, el Centro Experimental Kallutaca de la Universidad Pública de El Alto, se investigó el tratamiento de aguas residuales utilizando un lombrifiltro tipo Sistema Tohá. Se emplearon lombrices californianas (*Eisenia foetida*) para reducir contaminantes en aguas residuales de la universidad. Aunque el tratamiento redujo algunos parámetros microbiológicos, como los coliformes fecales y totales, en un 96%, los resultados no fueron completamente satisfactorios, ya que la DBO₅ y la DQO solo disminuyeron en un 21% y 22%, quedando fuera de los rangos permitidos por la Ley del Medio Ambiente N°.1333 y el DS 24176 (Roque, 2016).

1.2. Planteamiento del problema

El tratamiento de las aguas residuales domésticas es un gran desafío para muchas comunidades en todo el mundo. Las tecnologías tradicionales de tratamiento de aguas residuales suelen ser costosas y requieren cantidades significativas de energía, lo que dificulta su implementación en entornos con recursos limitados. Una alternativa prometedora es el uso de lombrifiltros, que se basan en los procesos naturales de microorganismos y lombrices para tratar las aguas residuales.

En el Centro Experimental Kallutaca se tiene implementado un sistema de lombrifiltro para el tratamiento de aguas residuales domésticas, es necesario evaluar la eficiencia de este sistema para determinar su eficacia en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales. El propósito de este estudio es evaluar el desempeño del sistema de lombrifiltro en términos de su capacidad para eliminar varios contaminantes de las aguas residuales domésticas. El estudio también examinará los efectos de diferentes parámetros, como la tasa de flujo, la tasa de carga hidráulica y las características de las aguas residuales afluentes en la eficiencia del sistema. Los resultados de este estudio proporcionarán información valiosa sobre el uso potencial del sistema de lombrifiltro para el tratamiento de aguas residuales domésticas y su idoneidad para una implementación más amplia en entornos similares.

1.3. Justificación

El manejo de las aguas residuales domésticas representa un desafío significativo para numerosas comunidades a nivel global, especialmente en áreas con recursos limitados, donde las tecnologías convencionales de tratamiento pueden ser costosas y complicadas de aplicar. Los lombrifiltros han surgido como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas residuales domésticas debido a su bajo costo, eficiencia energética y capacidad para utilizar procesos naturales para tratar las aguas residuales.

Sin embargo, a pesar del creciente interés en la lombricultura para el tratamiento de aguas residuales, todavía existe una comprensión limitada de la eficacia de los sistemas de lombrifiltros en el tratamiento de aguas residuales domésticas, particularmente en contextos específicos como el Centro Experimental de Kallutaca. Por lo tanto, existe una necesidad de investigación que evalúe la eficiencia del sistema de lombrifiltro en el tratamiento de aguas residuales domésticas en tales contextos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Evaluar el tratamiento de aguas residuales mediante el lombrifiltro en el Centro Experimental Kallutaca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar los parámetros; físico, químico y biológico de las aguas residuales domesticas del afluente y efluente del sistema.
- Determinar la eficiencia del sistema de lombrifiltro en el tratamiento de las aguas residuales en la Estación Experimental Kallutaca.
- Comparar los parámetros del agua residual tratada por el sistema del lombrifiltro, considerando la normativa vigente.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Características de las aguas residuales

Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusados, vertidos a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado (OEFA, 2014).

2.1.1. Aguas residuales

Las aguas residuales, también conocidas como aguas servidas o efluentes, son definidas como agua que ha sido utilizada y contiene materiales de desecho disueltos o suspendidos, además cuya calidad ha sido negativamente afectada por actividad antropogénica (Pulido *et al.*, 2019).

Según Pérez & Camacho (2011), declaran que las modificaciones de las características de estas aguas resultan después de haber sido usadas en los hogares, industrias o actividades de producción, entre otras. Como resultado las aguas residuales conllevan altas cargas de materia orgánica, grasas, detergentes, residuos de la industria, además de productos agroindustriales y sustancias tóxicas.

Como consecuencia la mayor parte de las aguas residuales son vertidas a los cuerpos receptores de agua (ríos, lagos y mares) y suelos, ocasionando efectos letales como la disminución del oxígeno, por la carga de contaminantes impidiendo la existencia de la vida en la flora y fauna existente en dichos cuerpos (Ocola, 2005).

2.1.2. Tipos de aguas residuales

2.1.2.1. Aguas residuales domésticas

Son aquellas que son de origen residencial y comercial que tienen contenidos de desechos fisiológicos, entre otros que provienen de la actividad humana y deben ser dispuestas adecuadamente (OEFA, 2014).

2.1.2.2. Aguas residuales industriales

Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, esto incluye a las actividades mineras, agrícolas, energética, agroindustrial, entre otros (OEFA, 2014).

2.1.2.3. Aguas residuales municipales

Son aquellas aguas residuales domesticas que están mezcladas con agua de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas es los sistemas de alcantarillado de tipo combinado (OEFA, 2014).

2.1.3. Características de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domesticas poseen una composición relativamente uniforme la cual se distingue claramente de las aguas residuales industriales, cuya variedad es en muchos casos indescriptible. La composición de los efluentes domésticos varía influenciado por factores como el consumo de agua, hábitos alimentarios, uso de productos de limpieza, etc. Dicha variación se da con respecto al tiempo, puede variar en el transcurso del día, en función de los días de la semana y se presentan variaciones estacionales (Espigares & Pérez, 1986).

2.1.3.1. Características físicas

Con mayor predominación se encuentra a los sólidos totales cuyas características están presentes en mayor cantidad, además de emitir un olor putrefacto y color marrón oscuro. La presencia de sólidos flotantes, capas de grasa en mezcla con aceite que indican residuos altamente contaminados y evidenciando la ineficiencia en el tratamiento en esta etapa (Tchobanoglus *et al.*, 2003).

2.1.3.1.1. Color

Tienden a ser gris o pardo, pero debido a los procesos biológicos anóxicos el color puede pasar a ser negro (Espigares & Pérez, 1986).

2.1.3.1.2. Solidos

Según Espigares & Pérez (1986), se clasifican en:

- a) Totales: residuos que se quedan tras la evaporación y secado de la muestra a 130°C durante 60 minutos.
- b) Fijos: residuos remanentes después de la evaporación y carbonización a 600°C, alrededor de varios minutos.

2.1.3.2. Características químicas

El agua residual tiene características químicas como las siguientes: Material orgánico; conocidos como sólidos provenientes de diferentes actividades productivas, esta materia orgánica generalmente está compuesta de Nitrógeno, Oxígeno y Carbono, también en algunos casos podemos encontrar Azufre, Fósforo, Hierro, entre otros metales originarios mayormente de las grandes minerías (Caicedo, 2017).

Asimismo, Espigares & Pérez (1986), señala que existe una diversa serie de parámetros que tienen una especial importancia para describir la composición de las aguas residuales:

- **Materia orgánica:** Constituye la tercera parte de los elementos de las aguas residuales, los compuestos que se pueden hallar son proteínas (40-60 %), carbohidratos (25-50 %), grasas y aceites (10%).
- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO):** es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para poder degradar la materia orgánica presente en el agua. Este tipo de prueba se realiza durante 5 o 3 días a 20°C por lo que se expresa como DBO o DBO₅.
- **Demanda química de oxígeno (DQO):** mide la cantidad de materia orgánica del agua, este parámetro no debe ser menor que la del DBO.
- **Carbono orgánico total (COT):** se mide mediante la introducción de una cantidad conocida de muestra en un horno a alta temperatura. Dicho carbono orgánico se oxida a CO₂, en presencia de un catalizador y que se cuantifica mediante un analizador de infrarrojos. Pero como no se oxidan todos los componentes orgánicos presentes, los valores de COT dan una estimación de carbono orgánico inferior a la real.
- **Demanda total de oxígeno (DTO):** esta prueba se realiza en una cámara de combustión catalizada con platino, en la cual se produce una transformación de la materia orgánica en productos finales estables. El oxígeno residual es analizado por cromatografía gaseosa y por diferencia obtenemos DTO.

- **Demanda teórica de oxígeno (DTeO):** se estima mediante una reacción teórica de oxidación total. Para ello, es necesario conocer la composición de las aguas residuales en carbohidratos, proteínas y grasas.
- **Oxígeno disuelto:** es necesario para la vida de todos los organismos aerobios. Por ello el crecimiento incontrolado de organismos y microorganismos en el seno de las aguas, puede conducir a su agotamiento. La presencia de oxígeno evita el desarrollo de procesos anaerobios que provocan malos olores en el agua.
- **pH:** la actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de pH generalmente estricto. Un pH que se encuentra entre los valores de 5 a 9 no suele tener un efecto significativo sobre la mayoría de las especies, aunque algunas son muy estrictas. Otro aspecto importante del pH es la agresividad de las aguas acidas, que da lugar a la solubilización de sustancias por ataque a los materiales.
- **Metales pesados:** algunos de los siguientes se pueden encontrar en las aguas residuales confiriéndoles en carácter tóxico: cobre, cromo, boro, plomo, plata, arsénico, antimonio, bario, flúor y selenio.

2.1.3.3. Características biológicas

En el agua residual existe la presencia de microorganismos que pueden causar daños a la flora y fauna y sin dejar de lado a los seres humanos, en gran cantidad encontramos a los Coliformes, conceptualizada como bacterias que se desarrollan y crecen el tracto digestivo de los seres humanos entre ellas el más letal son los llamados *E. coli*, podemos decir que cada persona evacua 105 millones de estas bacterias por día. El proceso que es estos organismos realizan inician desde la absorción de oxígeno como fuente de alimentación, y mediante las reacciones químicas resultan siendo medibles, esta cantidad de oxígeno utilizada es llamada DBO₅ y DQO, además encontramos patógenos como: virus, protozoarios, hongos y algas patógenos y bacterias (Cubillos, 2007).

Espigares & Pérez (1986), describen los principales grupos de organismos que se pueden encontrar:

- **Bacterias:** pueden ser de origen fecal o bacterias implicadas en procesos de biodegradación, tanto en la naturaleza como en las plantas de tratamiento. En las aguas residuales predominan los siguientes grupos de especies: *Escherichia*,

Salmonella, estreptococos fecales, Proteus, Pseudomonas, Aeromonas, Serratia, Nitrobacter, etc.

- **Virus:** proceden de la excreción de individuos infectados, ya sean humanos o animales. Tienen la capacidad de absorber sólidos fecales y otras materias particuladas, favoreciendo de esta forma su supervivencia durante tiempos prolongados en las aguas residuales.
- **Algas:** su crecimiento está favorecido por la presencia en las aguas residuales de distintas formas de fósforo y nitrógeno, así como de carbono y restos de elementos tales como hierro y cobalto, dando lugar a procesos de eutrofización. Este fenómeno se produce por algas de los géneros *Anacystis, Anabaena, Gleocystis, Spirogyra, Cladophora, Enteromorpha, Stigeoclonium, etc.*
- **Protozoos:** los que se encuentran más frecuentemente en las aguas residuales son amebas, flagelados y los cilios libres y fijos. Estos organismos juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en filtros percoladores y fangos activados. Pueden eliminar bacterias suspendidas en el agua, ya que estos no sedimentan, evitando la producción de efluentes con turbidez.
- **Hongos:** la mayoría son aerobios estrictos, pueden tolerar valores de pH relativamente bajos, y tienen baja demanda de nitrógeno. Esto les hace desempeñar una función importante en el tratamiento de aguas residuales industriales.

2.2. Tipos de tratamiento de aguas residuales domesticas

2.2.1. Tratamiento preliminar

Saboya (2018), menciona que el tratamiento preliminar tiene por finalidad retener los objetos de diferentes tamaños excluyendo a los de tamaños que no se visualizan fácilmente que trae el agua consigo, y que puede obstaculizar los siguientes procesos de tratamiento, mayormente los más usados son los tamices y rejas.

2.2.1.1. Tamizado

Se trata de mallas de distintos tamaños a través de las cuales circula el agua, capturando materiales de tamaño regular. Estos materiales se desprenden por sí solos, lo que previene su acumulación. Además, el mantenimiento de este equipo es sencillo gracias a su

capacidad de auto limpieza. Es una solución económica que requiere un mantenimiento mínimo.

2.2.1.2. Rejas

Es una etapa del proceso de tratamiento diseñada para impedir el paso de materiales de gran tamaño que son arrastrados por el agua, dependiendo de su naturaleza. El objetivo es proteger los procesos posteriores de posibles daños. Generalmente, estos dispositivos se fabrican con barras de metal de diferentes tamaños, ajustadas al caudal que se debe tratar. El mantenimiento puede realizarse de manera manual o mecánica.

2.2.2. Tratamiento primario

2.2.2.1. Coagulación

Al ser un tratamiento primario este prioriza la eliminación de sólidos que a simple vista no son visibles, esto mediante el uso de coagulantes, que pueden naturales o químicos según nuevos estudios por medios físicos, etc. El proceso de este consiste en una precipitación o sedimentación química en el cual se agrega el coagulante con la finalidad de remover sólidos presentes en el agua eliminando o disminuyendo en gran cantidad la turbidez del agua (Saboya, 2018).

2.2.2.2. Sedimentación

El proceso se desarrolla en grandes tanques, donde el agua a tratar entra en un estado de reposo en quietud, haciendo que los sólidos sedimentables desciendan al fondo del tanque, que según estudios anteriores muestran resultados óptimos en la remoción de los sólidos sedimentables y sólidos suspendidos (Saboya, 2018).

2.2.3. Tratamiento secundario

Este tratamiento se realiza para estabilizar la materia orgánica que no fue eliminada anteriormente en los otros procesos del agua a tratar. Este proceso utiliza reacciones asociadas al organismo vivos, los microorganismos crecen utilizando los contaminantes del agua como fuente de carbono y energía, convirtiéndolos en nuevos microorganismos, dióxido de carbono y otros compuestos inocuos (Collazos, 2008). A continuación, se describen algunas tecnologías utilizadas para el tratamiento secundario:

2.2.3.1. Filtros percoladores

Según Pérez & Camacho (2011), indican que el proceso de filtración mediante percoladores puede definirse como un sistema de lechos filtrantes, compuesto en su mayoría de materiales sintéticos o piedras de diversas formas, sobre el cual las aguas residuales ingresan de manera continua o intermitente por medio de brazos distribuidores fijos o móviles que mediante la aspersion del agua residual en toda la capa resulta una agua tratada para el uso de riego.

La eficiencia promedio que presenta este método es de 66% frente a los parámetros de DBO₅, SST, nitrógeno, fosforo y Coliformes totales (Metcalf *et al.*, 1991).

2.2.3.2. Biodiscos

Martínez (2001), indica que el método está constituido por un conjunto de discos de material plástico que esta entre 2 a 4 m de diámetro aproximadamente según sea el caudal a tratar, ya que estas cumplen un objetivo realizar la fijación bacteriana. La ubicación de los discos se da a corta distancia y se mantienen paralelos gracias a un eje central.

Cuando los Biodiscos se sumergen en el agua a tratar, comienza la creación de una especie de biomasa, formados por los microorganismos, además de la presencia de otros tipos de microorganismos, este se va exponiendo al aire a medida que el disco va girando, entre sumergirse y saliendo a la superficie teniendo un contacto con la materia orgánica; creando periodos de exposición al aire, e inmersión en el agua. Todo el proceso forma una especie de biopelícula del agua a tratar, estas son encargadas de la alta eficacia de depuración en tiempos hidráulicos del sistema (Metcalf *et al.*, 1991).

Así mismo menciona que la eficiencia promedio que muestra este sistema es de 62 % frente a los parámetros de DBO₅, SST, nitrógeno y fósforos.

2.2.3.3. Lodos activados

Según Méndez *et al.* (2004), el sistema consiste en tres etapas: sedimentación primaria, tanque de aireación y sedimentación secundaria.

El agua es tratada con microorganismos dentro de un tanque de aireación con el propósito de eliminar la materia orgánica presente en el agua residual. El tratamiento tiene un tiempo

de retención hidráulica que varía entre 4 a 8 horas. Que finalmente crean licor mezclado este por la unión de los lodos y el agua residual.

El siguiente proceso se da cuando el licor mezclado ingresa a un estanque de aireación hacia un decantador secundario, donde se realiza la separación sólido-líquido y los lodos activados sedimentan para obtener un efluente clarificado. Una parte de los lodos se retornan al estanque de aireación para mantener una adecuada población de microorganismos en relación a la carga orgánica que ingresa al reactor (Metcalf *et al.*, 1991).

De esta manera la eficiencia promedio que muestra el sistema según el mismo autor, es de 83 % ante los parámetros de DBO₅, SST, nitrógeno y fosforo.

2.2.4. Tratamientos naturales o sistemas biológicos no convencionales

También llamados Sistemas Biológicos no Convencionales, este tipo de sistema presentan una serie de singularidades que las hacen especialmente adaptables a las poblaciones medianas (mayor de 5000 habitantes) y pequeñas (menor a 5000 habitantes) presentan una gran variabilidad y adaptabilidad en el entorno natural y los costes de implementación está por debajo de los estimados en los tratamientos de las aguas residuales urbanas; además que no necesitan de mecanización, sin embargo necesitan mayor áreas de terreno para un adecuado tratamiento. En este tipo de tratamiento encontramos a lagunas de estabilización, humedales artificiales y lombrifiltros (Saboya, 2018).

2.2.4.1. Lagunas de estabilización facultativas

Las lagunas de estabilización facultativas son estanques construidas bajo tierra que sus dimensiones varían entre 1,2 y 2,4 metros de profundidad como máximo, donde las aguas residuales ingresan y son tratados por un tiempo determinado (mayor a 20 días). Los contaminantes presentes en el agua o materia orgánica son degradados naturalmente mediante el trabajo de las bacterias facultativas, aerobias y anaerobias además del medio algal (Bowman *et al.*, 2002).

La capa superficial de agua realiza oxigenación al agua residual esto por el contacto atmosférico directo, lo que hace que existan microorganismos aeróbicos. La capa inferior esta para los sólidos que se crean en el proceso de sedimentación, sin embargo, se desarrolla la descomposición del material biológico gracias a la acción de bacterias

anaeróbicas (fermentación anaeróbica). En la parte central del sistema es una mezcla entre aerobia y anaeróbica, llevando a cabo la descomposición de los residuos orgánicos a cargo de las bacterias facultativas y el medio algal. La eficiencia promedio de remoción para los parámetros más importantes de este método es de 94% (Mara, 2013).

2.2.4.2. Humedales artificiales

Según Quia (2021), los humedales artificiales son sistemas altamente eficientes, estéticamente atractivos y económicamente ventajosos para el tratamiento de aguas residuales Domesticas, un humedal artificial está compuesto de un lecho rocoso (gravas y arena), con una vegetación emergente como, las plantas que se utilizan en el tratamiento son: carrizos, juncos o totoras esto porque aprovechan las interacciones con los microorganismos y la atmosfera para remover la materia orgánica. Así mismo el mismo autor menciona que la eficiencia que muestra este sistema es de 85% y 87% ante los parámetros de DBO₅ y DQO respectivamente.

Las macrófitas emergentes airean el sistema radicular, proporcionando oxígeno a los microorganismos de la rizósfera, y son clave en la absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Además, eliminan contaminantes directamente en sus tejidos y filtran sólidos mediante el entramado de sus raíces (Núñez, 2016).

2.2.4.3. Método del lombrifiltro

Rodríguez (2011), define al método del lombrifiltro como un sistema de tratamiento de aguas residuales basado en el uso de lombrices rojas californianas de nombre científico *Eisenia foetida* que por sus características físicas o estructurales brindan un alto porcentaje en la eficiencia para la remoción de materia orgánica y organismos patógenos. Este lombrifiltro está compuesto generalmente, por 3 capas. Las capas consisten, en una base filtrante de piedras, sobre la cual se agrega una capa de ripio o grava, la parte superior se cubre con aserrín o viruta (desechos de madera), donde se mantiene un alto número de lombrices.

2.3. Descripción del lombrifiltro

El lombrifiltro es un sistema biológico empleado como tratamiento secundario o terciario de aguas residuales, donde las aguas se depuran por procesos naturales. Esta tecnología de filtración en múltiples etapas, integra un lombrifiltro o biofiltro convencional que puede estar

compuesto por capas filtrantes, humedales artificiales, lombrices y microorganismos relacionados (Asto & Castillo, 2024).

La tecnología nació como una propuesta de tratamiento de agua residual de bajo costo, a pequeña o mediana escala, los costos de implementación, operación y mantenimiento son menores en relación a otros tipos de tratamiento, por lo que es una alternativa factible en poblaciones rurales (Arango, 2003). De igual manera, su mecanismo de acción no es de alta complejidad, por lo que los requerimientos en capacitación de mano de obra no son muy exigentes, y la poca necesidad de amplios espacios le otorga una mayor facilidad de aplicación y uso descentralizado (Umasi, 2020).

Consiste en agregar el afluente en la parte superior del filtro, éste por acción de la gravedad inicia su recorrido a través de los diferentes estratos. En la capa superficial queda retenida la materia orgánica que es degradada por las lombrices que las digieren transformándolas en humus (Kusanovic, 2009).

El sistema de lombrifiltro funciona como una caja percoladora, la cual contiene una serie de capas filtrantes, la primera está llena con piedras, posteriormente el aserrín que es el sustrato donde se aloja una microflora abundante – dependiendo de la especie de madera seleccionada, y lombrices de la especie *Eisenia foetida* como degradadora biológica natural (Pérez, 2019).

Entre las principales ventajas del lombrifiltro se encuentran los altos índices de eficiencia, en reducir una serie de parámetros, como son: los sólidos suspendidos totales y volátiles, materia orgánica y Coliformes fecales (Díaz, 2016).

2.3.1. Inicios del sistema de biofiltración con lombrices, Lombrifiltro.

Pérez (2019), menciona que la búsqueda de nuevas tecnologías de tratamiento no convencionales es el inicio de este nuevo sistema, con un funcionamiento más natural y ecológico. Cumple con la normativa de descarga y presenta bajos costos de operación, lo que hace viable su implementación y funcionamiento, razón por la cual muchos investigadores han dedicado gran esfuerzo para concretar la nueva tecnología. Es así, que a partir de los trabajos realizados en EE.UU. a fines de la década de los 70, se manifestó la conveniencia de utilizar a las lombrices en el proceso de depuración y estabilización de las aguas residuales domésticas e industriales.

Al principio, las investigaciones se limitaban a utilizar lombrices en el tratamiento de lodos, que resultaban del tratamiento de aguas residuales convencionales, como la filtración, biorreactores, lodos activados, entre algunos. Estos lodos constituyen un subproducto del tratamiento de aguas, que no pueden ser fácilmente estabilizados para usarlos de forma instantánea.

En la actualidad se postula que las lombrices deben estar en una función directa en el tratamiento de las aguas, especialmente en la etapa de oxidación biológica, incluidas en el biofiltro de una planta de tratamiento de aguas residuales.

De esta manera, el investigador chileno, el Dr. José Tohá Castellá, recoge experiencias realizadas en la planta de Lufkin, Texas (1981) sobre el tratamiento de aguas residuales mediante lombricultura y comienza a experimentar con este sistema a partir del año 1986, naciendo de esta manera el Sistema Tohá (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003).

Y es así como el Lombrifiltro se convierte en una nueva biotecnología de tratamiento de aguas que posee características especialmente atractivas para aplicarse en pequeñas comunidades y/o empresa de alimentos (Pérez, 2019).

2.3.2. Características del Lombrifiltro

Según Pérez (2019), el lombrifiltro representa una combinación innovadora entre la lombricultura tradicional y un filtro percolador. Esta técnica integra actividades como la cría, producción y expansión de lombrices, junto con la operación de filtración para el tratamiento de aguas residuales. El objetivo principal es eliminar la materia orgánica, el principal contaminante, que sirve de alimento para las lombrices. Al llevar a cabo estas operaciones de manera conjunta, se obtiene humus de lombriz.

El lombrifiltro se compone principalmente de tres capas y utiliza lombrices de la especie *Eisenia foetida*. La primera capa consiste en una base filtrante de bolones, seguida de una capa de ripio o grava. La capa superior se cubre con aserrín o viruta de madera de ulmo o tepa, que alberga una gran cantidad de lombrices. En Bolivia, la madera de Ochoa es ideal para el cultivo de lombrices debido a su alta disponibilidad y bajo costo. La lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) es la especie más comúnmente utilizada, trabajando en simbiosis con comunidades de microorganismos como *Achromobacter* sp., *Flavobacterium* sp., *Pseudomonas* sp., *Alcaligenes* sp., *Haerotilus natans* y *Beggiataa* sp., que son

responsables de degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas e industriales (Hernández, 2005).

En una primera etapa el agua residual es asperjada sobre el sustrato rico en lombrices y está escurre por el medio filtrante reteniendo los sólidos (Figura 1). Esta parte sólida del agua residual es consumida por las lombrices y pasa a constituir por un lado masa corporal y, por otro, sus deyecciones, que son el llamado humus de lombriz. En el caso de existir coliformes fecales en las aguas, estos son reducidos por las lombrices y los microorganismos consumidores de materia orgánica que viven junto a ellas (Parra & Chiang, 2013).

Otra característica destacada del lombrifiltro es su alto índice de absorción, atribuible, entre otros factores, a los movimientos migratorios de las lombrices. Este comportamiento acelera el proceso de filtración, evitando así la producción de olores desagradables y, como resultado, impidiendo la proliferación de vectores como moscas y otros insectos (Pérez, 2019).

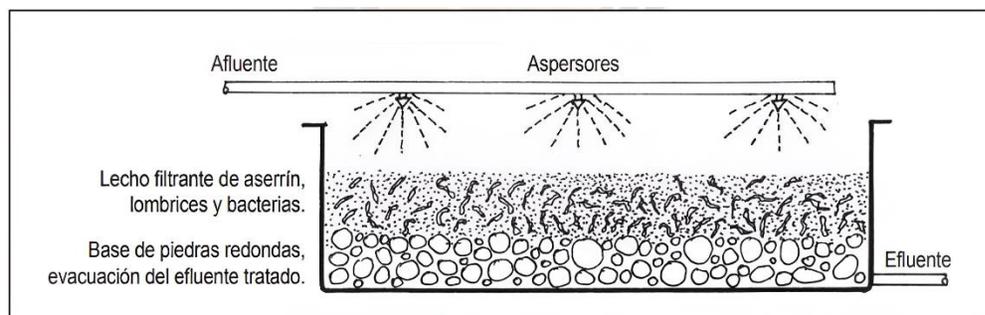


Figura 1. Lombrifiltro Modelo Sistema Tohá

Fuente: (Parra & Chiang, 2013)

Se caracteriza además por sus bajos costos operacionales, al tener bajos requerimientos energéticos, ya que básicamente requiere energía eléctrica para activar las bombas de la planta elevadora y los equipos de desinfección.

Sin embargo, como es un tratamiento biológico, es importante resaltar que su principal desventaja, común a la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, es su sensibilidad a las variaciones bruscas de carga orgánica y los parámetros químicos del agua residual. Aunque las variaciones abruptas de carga orgánica no suelen representar un riesgo significativo para el sistema, las alteraciones repentinas en los parámetros químicos o las descargas clandestinas de sustancias tóxicas sí pueden ser

peligrosas. Por ello, es crucial implementar normas adecuadas en los sectores industriales para evitar tales situaciones (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003).

2.3.3. Descripción y criterios de diseño del lombrifiltro

El lombrifiltro, está compuesto de un medio filtrante y un soporte (Figura 2), a continuación, se describe la utilidad, dimensiones y características de estos medios:

La capa inicial del lombrifiltro, que actúa como soporte y filtro, está compuesta de aserrín o viruta, preferentemente de ulmo o teja, con un espesor mínimo de 25 cm para proporcionar el ambiente operativo adecuado para las lombrices. Esta capa también sirve como alimento alternativo para las lombrices si la carga contaminante del afluente no es suficiente (Salazar, 2005).

El aserrín posee características que son adecuadas para su uso en el Lombrifiltro, como todo material complejo o lignocelulósico, ofrece una gran resistencia a la digestión biológica (Guyat *et al.*, 2005) y una relación alta de carbono – nitrógeno.

La segunda capa consiste en ripio o grava, y la tercera capa se compone de bolones con un espesor aproximado de 25 cm. Las piedras más grandes se colocan en la parte inferior y las más pequeñas en la parte superior, y esta capa se destina al drenaje y aireación del sistema. En las piedras se forma una flora bacteriana que descompone la materia orgánica del agua que pasa a través de ellas y que no fue retenida en las capas superiores del lombrifiltro. Entre las capas de aserrín y arena se coloca una malla tipo raschell, que actúa como elemento de separación y retención para el estrato de aserrín y las lombrices (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003).

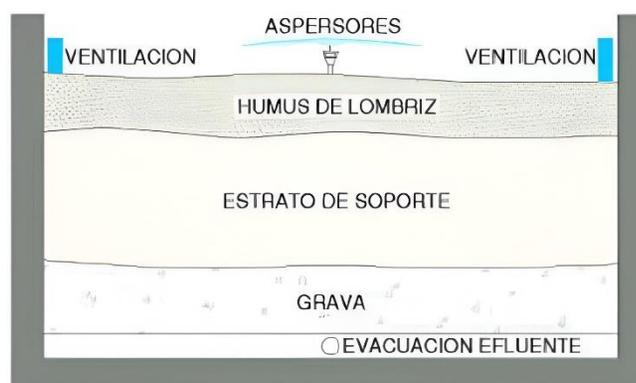


Figura 2. Capas del lombrifiltro

Fuente: (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003)

El piso del filtro, también denominado falso fondo, construido en material impermeable con cierta pendiente (aproximadamente de un 2%) para que fluya el agua hacia la canaleta de evacuación, la cual también posee una pendiente natural (Pérez, 2019).

2.3.4. Mantenimiento del Lombrifiltro

Para procurar el correcto funcionamiento del sistema del sistema Tohá, se requiere realizar las siguientes labores de mantención (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003).

- Es necesario horquetear la viruta superficial del lecho para mejorar su permeabilidad y evitar el encharcamiento de aguas. Se recomienda realizar esta tarea al menos una vez por semana, aunque si es necesario, se debe incrementarse la frecuencia.
- Para asegurar el correcto funcionamiento del lombrifiltro, el sustrato debe mantenerse en un estado de saturación sin estancamientos superficiales, ya que estos no son recomendables porque alejan a las lombrices, lo que afecta la homogeneidad del sistema. Este estado de saturación se logra mediante la descarga controlada de aguas.
- Es importante desmalezar el lecho al detectar el crecimiento de cualquier tipo de plantas.
- Con una frecuencia de 4 meses debe realizarse la adición de viruta al lecho, ante la disminución de este estrato debido al fraccionamiento alcanzado.
- Limpieza periódica de los regadores para garantizar en todo momento una uniformidad de riego en la superficie.

2.3.5. Ventajas y desventajas del sistema de tratamiento

2.3.5.1. Ventajas

De acuerdo con Lombrifiltro Chile Ingeniería Ambiental LTDA. (2017), una empresa con amplia trayectoria en la instalación de Lombrifiltros en Chile, se pueden nombrar las ventajas más sobresalientes de esta nueva tecnología:

- No produce lodos inestables: Este nuevo sistema de tratamiento degrada la totalidad de sólidos orgánicos presentes en las aguas residuales, sin producir lodos inestables como el resto de los sistemas de tratamiento, sólo es necesario instalar cámaras de rejas o canastillos para retener sólidos inorgánicos, que puedan ser

erróneamente descargados en las aguas residuales y sólidos grandes que puedan obstruir el sistema de riego.

- El lecho filtrante no se impermeabiliza: El Lombrifiltro tiene una diferencia muy importante respecto de otros sistemas de filtros, no se colmata. Esta característica se debe principalmente a la acción de las lombrices que, con su incansable movimiento, crean túneles y canales que aseguran en todo momento la alta permeabilidad del filtro. Los materiales sólidos orgánicos presentes en el agua residual, que colmatan o tapan otros filtros, en este caso son digeridos por las lombrices.
- Bajos costos operacionales: En general el Lombrifiltro tiene bajos requerimientos energéticos ya que requiere básicamente la energía necesaria para activar las bombas de la planta elevadora y los equipos de la desinfección por radiación ultravioleta. En general todos los sistemas requieren de plantas elevadoras ya que los colectores llegan a cierta profundidad al lugar de emplazamiento de las plantas de tratamiento y los procesos e instalaciones (por costos) se realizan y ubican a nivel del suelo.
- Produce un subproducto que puede ser utilizado como abono natural: Debido a que la materia orgánica de las aguas residuales es convertida en masa corporal de lombrices y en humus de lombriz, cada cierto tiempo puede extraerse los excesos de humus, y así reconstituir la estratigrafía inicial del Lombrifiltro, y ser utilizados como excelente abono agrícola cuyo uso incluso en forma excesiva no daña ni quema las plantas como es el caso de los fertilizantes químicos. Adicionalmente, se puede destacar que las lombrices pueden ser utilizadas como alimento de aves o como fuente de materia rica en proteínas y el agua tratada también puede ser utilizada.
- Presenta una alta remoción de los siguientes parámetros:
 - DBO: 95 %
 - Sólidos Totales: 95 %
 - Nitrógeno total: 60 %
 - Fósforo total: 70 %

2.3.5.2. Desventajas

Pérez (2019), menciona las siguientes desventajas:

- Requiere de grandes volúmenes de reactor para su implementación.
- No resiste periodos sin alimentación. Necesidad de suministrar nutrientes.
- Requiere de un proceso de adaptación -Arranque complejo.
- No soporta variaciones grandes de carga ni caudal, la capacidad máxima de tratamiento es de $1\text{m}^3/\text{m}^2\text{-día}$.
- No es recomendable para tratar grandes volúmenes de efluente, por el espacio que requeriría.

2.3.6. Aplicaciones

El lombrifiltro es una tecnología prácticamente nueva, al ser ecológica y natural se convierte en una opción atrayente para el tratamiento de aguas, que no tengan contenidos tóxicos. Su aplicación es en el tratamiento de aguas con alto contenido en materia orgánica, como en industrias de alimentos, granjas industriales y principalmente en aguas servidas domiciliarias, para poblaciones pequeñas, entre 20.000 a 30.000 habitantes. Poblaciones mayores a 30.000 habitantes, requerirían extensas superficies de tierra por lo que no sería muy recomendable (Pérez, 2019).

2.3.6.1. Implementación a nivel mundial

En la actualidad a nivel mundial, donde más se aplica esta tecnología es en Chile, en poblaciones pequeñas, industrias, de las cuales podemos mencionar, según la página oficial de Lombrifiltro Chile Ingeniería Ambiental LTDA.:

- Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de Planteles Reproductores de Cerdos de Agrosuper. Plantas de Tratamiento de 8 planteles reproductores totalizando 13000 m² de superficie de módulos de Lombrifiltro. Proyecto ejecutado en modalidad Llave en Mano.
- Planta de tratamiento de Aguas Servidas para Sub-Estación Charrúa, Transelec, Comuna de Cabrero, VIII Región. Planta de tratamiento para población total de 50 personas. Proyecto ejecutado en modalidad Llave en Mano por LOMBRIFILTRO CHILE.
- Planta experimental de tratamiento de aguas residuales de plantel de cerdos, la lechería, agrícola súper Ltda, AGROSUPER, Comuna de Requinoa, VI Región. Proyecto ejecutado en modalidad de diseño. Planta en etapa de operación.

Poco a poco esta nueva tecnología, por sus atrayentes ventajas, se va expandiendo a lo largo del mundo, con favorable aceptación.

2.3.6.2. Implementación en Bolivia

Según Pérez (2019), uno de los grandes problemas de contaminación que sufre Bolivia, actualmente se debe a las aguas servidas o residuales no tratadas, de carácter doméstico como industrial. Pese a existir una Ley de Medio Ambiente promulgada en el año 1992, en la cual se fijan los límites de descarga de residuos líquidos, tanto a alcantarillado como a cuerpos de agua, está muy lejos de cumplirse.

La mayor parte de los municipios de Bolivia no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados. Su funcionamiento es deficiente o se encuentran en estado de abandono, motivos por los cuales en los últimos 20 años se ha empezado a notar un impacto ambiental de las distintas cuencas hidrográficas de nuestro país (por ejemplo, la Cuenca Katari-Bahía de Cochana en La Paz). El deterioro de esta Cuenca no sólo es un problema ambiental, sino también es un problema de salud pública, ya que afecta de gran manera al desarrollo productivo de las comunidades, reduciendo así la producción local agrícola y ganadera. Las industrias en general, al igual que los municipios, en gran número no cuentan con plantas de tratamiento de residuos líquidos industriales, o éstas no logran cumplir con los parámetros de descarga de residuos industriales (SNV, 2017).

Poco a poco se vienen incorporando nuevas formas de tratamiento de residuos líquidos, es el caso de Lombrifiltros, la primera planta de tratamiento de residuos líquidos domésticos se instaló en la población de Sapina en Santa Cruz; y como aplicación innovadora en Lombricultura se tiene una empresa en Cochabamba, la cual fabrica galletas de harina de lombriz.

Así mismo, en el departamento de La Paz, municipio de Achocalla, la industria elaboradora de lácteos Flor de Leche S.R.L construyó y puso en marcha su biofiltro, "Lombrifiltro" utilizando lombrices *Eisenia foetida*, para el tratamiento de sus aguas residuales.

2.4. La lombricultura

La lombricultura denominada también vermicultura es una biotecnología que era desconocida entre nosotros hasta hace poco, se inició en EE.UU en la década de los 40, posteriormente se extendió por Europa y finalmente a todo el mundo; aplica normas y

técnicas de producción utilizando lombrices rojas californianas para biodegradar residuos orgánicos y convertirlas en fertilizante (Schuldt, 2006).

Con su actividad principal en la fertilización, aireación, formación del suelo es posible obtener materia orgánica estable en tiempos relativamente cortos para su uso en la agricultura. Se trata del humus de lombriz que en comparación es 5 veces superior en nitrógeno, fósforo, potasio y calcio (Díaz, 2002).

La lombricultura tiene un enfoque ecológico por el reciclaje que se realiza con los diferentes sustratos empleados en su alimentación (excreta bovina, basura orgánica, desperdicios industriales); tiene además un enfoque tecnológico que por los distintos fenómenos microbiológicos y bioquímicos que ocurren en el proceso de fermentación de la alimentación de las lombrices a partir de materiales orgánicos; además de brindar una respuesta simple racional y económica al problema ambiental (Somarriba & Guzmán, 2004).

A partir de la década del 50, los primeros criaderos intensivos fueron desarrollados en el estado de California, EE.UU. Desde entonces no se han dejado de efectuar estudios e investigaciones que han tenido como resultado la obtención de varios tipos de lombrices cada vez más selectas. Actualmente los tipos más utilizados en la lombricultura son tres de ocho mil especies existentes:

- *Eisenia foetida*
- *Lombricus rubellus*
- Rojo Híbrido

En el ámbito de Latinoamérica se sabe que Cuba, México y Colombia tienen regulares extensiones dedicadas a la Lombricultura (Díaz, 2016).

En nuestro país se han ido implementando criaderos de Lombrices, de la especie *Eisenia foetida*, para la degradación de desechos orgánicos e incluso como suplementos alimenticios, por su alto contenido proteico (Pérez, 2019).

2.5. *Eisenia foetida* o Lombriz Roja Californiana

Está clasificada en el reino animal como un anélido terrestre, de la clase de los Oligoquetos, siendo su principal hábitat el ambiente húmedo, no acepta la luz. Este anélido es

hermafrodita insuficiente, siendo bisexual que necesita aparearse para reproducirse (Somarriba & Guzmán, 2004).

Así mismo Mejía (2008), menciona que la *Eisenia foetida* es una lombriz extraordinariamente prolifera, muy viva, trabajadora, resistente al estrés, talvez como ninguna otra y que se ha logrado hacer trabajar en densidades de 50.000 a 60.000 lombrices por metro cuadrado, cifra que ninguna otra lombriz salvaje está en condiciones de resistir.

El mismo autor señala que la lombriz californiana está constituida por agua, ya que representa el 80% al 90% de su peso total, posee una estructura biológica simple. Presenta tonalidades que van desde rosados, negros, blancos, marrones y rojos, dicha variación es por la presencia de pigmentos protoporferina y ester metílico, esto lo protege de la radiación ultravioleta. Además, agregarle que estas pueden vivir alrededor de 15 años en cautiverio, alcanzan la adultez entre los 7 y 9 meses por otro lado, llegan a medir hasta los 10 centímetros de largo y pesar alrededor de 0,24 a 1,4 gramos.

Las lombrices llegan a consumir todo tipo de materia orgánica, digieren el equivalente a su peso, de ello el 80% es eliminado como humus y el 20% para su sostenimiento. Por ellos la cantidad de materia orgánica que haya en el agua determinará su población.

2.5.1. Taxonomía

A continuación, se describe la clasificación taxonómica de la lombriz californiana o *Eisenia foetida* (Díaz, 2002).

Cuadro 1. Taxonomía de la lombriz Californiana o *Eisenia foetida*

Taxonomia	
Reino	Animal
División	Anélidos
Clase	Clitelados
Orden	Oligoquetos
Familia	Lombricidos
Genero	Eisenia
Especie	Foetida

Fuente: (Díaz, 2002)

En el orden de los oligoquetos hay aproximadamente 1800 especies agrupadas en 5 familias distribuidas en todo el mundo. La familia de los lombricidos tiene más de 22^o especies con tamaños que oscilan desde uno pocos milímetros hasta más de un metro, pero la mayoría están comprendidas entre 2 y 20 cm (Díaz, 2002).

2.5.2. Anatomía de la lombriz Californiana

Según Díaz (2002):

- **Cutícula:** lamina quitinosa muy delgada, finamente estriada, cruzada por fibras.
- **Epidermis:** epitelio simple con células glandulares que están encargadas de producir mucus y sustancias cerosas.
- **Capas musculares**
- **Peritoneo:** es lo que limita al celoma (cavidad de la lombriz).
- **Celoma:** espacio que contiene líquido y envuelve el canal alimenticio. Este fluido se expulsa ante el peligro.
- **Tubo digestivo:** este canal corre desde la boca al ano. Detrás de la boca encontramos la cavidad bucal y dentro de ella las células de paladar (prostomio).

2.5.2.1. Sistema digestivo

El sistema digestivo de la lombriz inicia con la boca que se conecta a estructuras como la faringe, el buche, la molleja hasta llegar al intestino, el cual termina en el ano. Cada estructura cumple una función importante para poder llenar las necesidades alimenticias de las lombrices. Es importante mencionar que el alimento básico de la lombriz está compuesto por microorganismos, razón por la cual solo se alimentan de líquidos o sólidos que los contienen. Al no tener la lombriz dientes ni mandíbulas obtienen su alimento por succión al presionar sobre la superficie una pequeña estructura presente en la boca que se conoce como prostomio o lengua (Pérez, 2019).

2.5.2.2. Sistema respiratorio

Las lombrices respiran por medio de la cutícula, al no tener un sistema circulatorio organizado; la sangre circula por vasos capilares que se ubican junto a la cutícula húmeda de la pared del cuerpo lo que favorece la absorción de oxígeno y liberación de anhídrido

carbónico; por esta razón, la cutícula debe permanecer siempre húmeda, de lo contrario la lombriz se seca y muere (Pérez, 2019).

2.5.2.3. Sistema reproductivo

Las lombrices son hermafroditas, es decir están dotadas de órganos sexuales masculinos y femeninos, pero son incapaces de auto fecundarse, y se reproducen recíprocamente por fecundación cruzada (Somarriba & Guzmán, 2004)

Durante el apareamiento se intercambian espermatozoides que no fecundan inmediatamente a los óvulos. Luego de producirse la fecundación, depositan en el lugar donde se alimentan 3 cápsulas de paredes resistentes (llamados cocones) conteniendo cada una de 3 a 10 lombrices pequeñas (Mejía, 2008).

Estas lombrices, que son iguales a las adultas, pero de color blanco y más pequeñas, están sometidas a peligros que pueden ser mortales para su delicada contextura como: falta de comida, presencia de algunos productos tóxicos, enemigos naturales, etc. Haciendo que disminuya apreciablemente el número inicial, llegando aproximadamente un 5% al estado adulto (Díaz, 2002).

2.5.3. Principales cualidades de la *Eisenia foetida*

No todas las especies de lombrices son aptas para la cría, la mayoría requiere condiciones muy precisas y difíciles de lograr. Sin embargo, esta especie no sólo es la que mejor se adapta al cautiverio, sino que posee características que la hacen muy útil. La longevidad de esta especie se estima en alrededor de 15 a 16 años y no contrae ni transmite enfermedades (Pérez, 2019).

La lombriz *Eisenia foetida* es una especie Eurífaga, es decir, se alimenta con los más diversos desechos, especialmente, los de tipo orgánico, caracterizándose por su gran voracidad. En periodos cuando disminuye el aporte de nutrientes orgánicos, las lombrices pueden sobrevivir mejor en presencia de residuos carbónicos, independientemente de nutrientes orgánicos tales como nitrógeno, fósforo y potasio. Esto demuestra la importancia de la celulosa en la dieta de la *Eisenia foetida*.

Esta lombriz ingiere una cantidad de comida equivalente a su propio peso y expelen el 60% transformándolo en humus, siendo el 40% restante en síntesis celular, respiración y otros

procesos vitales. Es una especie que tiene gran tolerancia a la aglomeración, pudiendo cohabitar entre 4.000 a 50.000 individuos por metro cuadrado (Mejía, 2008).

Es una especie muy prolífica, tiene una tasa de reproducción anual de 1:16, significando que cada 3 meses duplica su población. Esta alta tasa de reproducción depende de un adecuado manejo, de una alta densidad poblacional en criadero que favorezca el factor encuentro entre animales y su copulación y de las condiciones ambientales que se les otorgue en sus lechos productivos.

La actuación de la *Eisenia foetida*, durante 24 horas tiene una zona o franja operativa de 0,25 metros. la que es notablemente inferior a la de la lombriz común, que va de 2 a 6 metros. Esto permite domesticar con facilidad y cultivar humus sin riesgo de evaporación y dilución de deyecciones (Salazar, 2005).

2.5.4. Condiciones ideales y desfavorables de su hábitat

Para el desarrollo favorable de las lombrices las condiciones ideales para su desarrollo son las siguientes características:

Una temperatura de 20°C que se considera nivel óptimo, se acerca a su temperatura corporal. Entre 15°C y 24°C es el nivel adecuado, inferiores y mayores a estos existe el peligro de muerte de las lombrices (Mejía, 2008).

Asimismo, según el manual de Lombricultura, realizado por Martínez (2006), experta en lombricultura. Los principales factores a considerar para trabajar con lombrices son:

2.5.4.1. Temperatura

Las condiciones ideales del hábitat de la lombriz corresponden a una temperatura que oscile entre los 15° y 24° C, siendo óptima aquella que se acerque lo más posible a la de su propio cuerpo (aproximadamente 20° C), (Salazar, 2005).

2.5.4.2. Temperatura baja

Cuando la temperatura desciende de los 12 hasta 8°C las *Eisenias foetidas* entran en un período de latencia, dejando de reproducirse, crecer y producir humus, además que alarga el ciclo evolutivo, puesto que los cocones (huevos) no eclosionan y pasan más tiempo encerrados los embriones, hasta que se presentan las condiciones de medio favorable,

sucediendo lo mismo con la lombriz joven, pasa más tiempo en este período, puesto que ahí soporta más tiempo las adversidades del tiempo (Pérez, 2019).

En este sentido debe indicarse que la *Eisenia Foetida* teme tanto al frío excesivo (0°C) como al calor elevado (más de 42° C), ante los cuales disminuye su actividad sexual y producción de humus (Salazar, 2005).

2.5.4.3. Acidez o pH

Al igual que la temperatura el pH es sumamente importante; lo ideal es que se encuentre entre 6,5 y 7,5, un pH básico o ácido puede ocasionar serios problemas a la lombriz y llegar a ocasionar su muerte. El método más eficiente para medir el pH es utilizando la misma lombriz, ella indicará si el material está o no listo para poder vivir en él. La lombriz acepta sustratos con pH de 4,5 a 8,5. Fuera de esta escala, la lombriz entra en una etapa de latencia (Pérez, 2019).

2.5.4.4. Humedad

Como se mencionó, la lombriz necesita de mucha humedad, ésta es requerida para que pueda moverse dentro de los desechos y facilitar la fragmentación de los mismos, así como para su respiración. La humedad recomendada es del orden de 75 a 80% (Pérez, 2019).

2.5.4.5. Relación C/N

Esta relación es básica para obtener el proceso de transformación en un tiempo corto; depende del balance entre el carbono y el nitrógeno. La relación C/N ideal para comenzar el compostaje es de 30 a 40/1, 2/3 del Carbono se elimina como sobrante por los microorganismos y el tercio restante se inmoviliza como parte del cuerpo microbiano dando una relación de 10/1, óptima para alimentar (Díaz, 2002).

2.5.4.6. Aireación

Necesitamos que proliferen microorganismos aeróbicos que requieren oxígeno para efectuar su metabolismo. Si proliferan los anaeróbicos, tendremos sus productos metabólicos como metano, ácido sulfhídrico y amoníaco con su resultado de malos olores, moscas y sus larvas (Martinez, 2006).

Otro aspecto importante a la hora de proteger el buen funcionamiento de las lombrices, se refiere a que éstas no tienen ningún órgano de defensa, por lo que cualquier animal puede dañarla o matarla y no siempre involuntariamente. Hay una serie de seres que la buscan afanosamente, la cazan y se la comen. Entre estos destacan las ratas y los ratones, las serpientes, los sapos, los topos y los pájaros, siendo estos últimos los más peligrosos debido a la facilidad con que pueden entrar en acción. Para evitar este problema sería aconsejable cubrir el lecho con sombrajos o redes antigranizo, protegiendo a las lombrices de los pájaros (Pérez, 2019).

2.5.5. El aserrín como sustrato para lombrices

Es un conjunto de partículas que se desprenden de la madera al serrarla. Su composición son la celulosa que conforma alrededor de la mitad del material total, la lignina polímero que proporciona dureza y protección, y hemicelulosa también alrededor cuya función es actuar como unión de las fibras (Vicente, 2016).

Asimismo, posee muchas cualidades por lo que la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) tiene preferencia, en todos los tamaños de partícula esto debido a su fácil descomposición en mezcla con otros materiales, razones por la que las lombrices las prefieren. El aserrín es un producto que se obtiene mayormente de la industria maderera y suele ser utilizado en la alimentación de algunas especies, su fácil accesibilidad y bajo costo lo hacen un recurso beneficioso con ciertas excepciones ya que el aserrín que poseen una coloración rojiza no suele ser utilizado ya que no sería beneficioso para las lombrices porque a mayores colores intensos, suelen acabar con la vida de estas (Vásquez, 2013).

Además, el uso de aserrín, brinda la ventaja en la creación con el humus, al tener esta mezcla, se obtendría un producto como los abonos para la mejora del suelo (Jiménez & Padilla, 2012).

2.5.6. Tierra de diatomeas como material filtrante

Según estudios y observaciones las diatomitas a pesar de su granulometría llegan a ser consideradas como un suelo fino, al no tener presencia de arcillas, lo que permite que pueda ser utilizado en los procesos de filtración. También hay que tener en cuenta que cuando la tierra de diatomea entra en contacto con el agua, esta se solidifica y presenta una aglomeración por ser químicamente este es un material silicoso (Estrada, 2016).

En ciertas actividades como también las de bebidas de consumo, llegan a utilizar este filtro en ciertas etapas de la producción del agua y así mejorar su calidad.

Con respecto a la producción mundial de la diatomita el 61% es utilizado principalmente como filtro, en primer lugar, en las bebidas como cerveza, vinos, etc. En las industrias el 39% de este material es utilizado como un agente de carga, destacando la fabricación de pintura y plástico (Caballero & Zuni, 2017).

2.6. Marco legal

En Bolivia se implementaron varias normas para promover una cultura ambiental en las actividades económicas que se llevan a cabo en el país.

2.6.1. Constitución Política del Estado

La Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia establece en su artículo 33 que toda persona tiene derecho a un ambiente saludable, protegido y equilibrado. Este principio fundamental orienta la legislación y las políticas públicas relacionadas con la protección y gestión del medio ambiente, incluyendo las aguas residuales (Plurinacional, 2009).

2.6.2. Ley de Medio Ambiente

La ley del Medio Ambiente (Ley 1333), promulgada el 27 de abril de 1992, es el marco normativo principal que regula las actividades relacionadas con la protección del medio ambiente en Bolivia. Esta ley establece las bases para la prevención y control de la contaminación, la conservación de los recursos naturales y la gestión ambiental sostenible (MMAyA, 2021).

2.6.2.1. Disposiciones relevantes para el Tratamiento de Aguas Residuales

- **Artículo 4 (Principios Generales):** La gestión ambiental debe ser preventiva y precautoria, asegurando que las actividades humanas no causen daños irreparables al medio ambiente.
- **Artículo 5 (Instrumentos de gestión ambiental):** La ley establece diversos instrumentos de gestión ambiental, como la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), el control de la contaminación y los planes de manejo ambiental.

- **Artículo 10 (Prevención y Control de la Contaminación):** Se establece que todas las actividades que generen residuos, incluidas las aguas residuales, deben implementar medidas de prevención y control de la contaminación.

2.6.2.2. Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH)

El presente reglamento se aplicará a toda persona natural o colectiva, pública o privada, cuyas actividades industriales, comerciales, agropecuarias, domésticas, recreativas y otras, puedan causar contaminación de cualquier recurso hídrico.

El RMCH tiene por objeto regular las descargas de aguas residuales dependiendo al cuerpo de agua del destino final. También nos da una lista de las muestras de control que deben ser cumplidas antes de la descarga de las aguas residuales tratadas (anexo 1).

2.6.3. Normas Técnicas y Específicas

2.6.3.1. Norma Boliviana de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes (NB-512)

Esta norma establece los límites permisibles de contaminantes en las aguas residuales que pueden ser descargadas al ambiente, asegurando que no se afecte la calidad de los cuerpos de agua receptores.

2.6.3.2. Norma Boliviana de Reúso de Aguas Residuales (NB-742)

Establece los requisitos para el reúso de aguas residuales tratadas, promoviendo su aprovechamiento en actividades como la agricultura, siempre y cuando se cumplan los estándares de calidad especificados.

2.6.4. Planes y Políticas Nacionales

2.6.4.1. Plan Nacional de Saneamiento Básico

El gobierno de Bolivia ha desarrollado planes a políticas para mejorar la infraestructura de saneamiento, incluyendo el tratamiento de aguas residuales, como parte de su compromiso con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), específicamente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento).

2.6.5. Protocolo de muestreo de aguas residuales

El Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico (SENASBA) y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Estado Plurinacional de Bolivia (MMyA), presentaron la Guía para la toma de muestras de agua residual, con el apoyo de la cooperación Alemana por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ), a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y su Programa para Servicios Sostenibles de Agua Potable y Saneamiento en Áreas Periurbanas (PERIAGUA, 2015).

2.6.5.1. Principios importantes en la toma de muestras

En general, el objetivo es lograr una muestra de una composición representativa que nos indique el estado promedio de la PTAR. Es por eso que estos cuatro principios nos ayudarán a conseguir una muestra con esas cualidades:

- **Lugar:** Elegir un lugar adecuado para tomar la muestra.
- **Tiempo:** Considerar el tiempo adecuado para tomar la muestra.
- **Frecuencia:** Tomar las muestras en la frecuencia adecuada.
- **Técnica:** Usar una técnica del muestreo adecuada (PERIAGUA, 2015).

2.6.5.2. Toma de muestras

Una vez que ya conocimos las técnicas del muestreo, existen algunos aspectos que no debemos dejar de tomar en cuenta:

- El recipiente con el que se toma la muestra de una foza se llama muestreador de aguas residuales (Anexo 11) y siempre tiene que estar limpio y sin restos de agua de la muestra anterior.
- Siempre tome la muestra en la mitad del flujo de agua. Nunca toque el fondo o las paredes. Si se toca el fondo, los sedimentos en la muestra pueden provocar malos resultados. Al contrario, el flujo superior contendría menos partículas que también pueden causar malos resultados.
- Tome la muestra en contracorriente.
- Si hay espuma o algas y grasas flotantes, intente no tomarlas junto con el agua que se saca para la muestra.

- Para que las **muestras de diferentes días sean comparables, tómalas en el mismo lugar de la misma manera.**

El tipo de recipiente, la mayoría de las veces, el laboratorio donde se realizan los análisis de la calidad del agua entrega los frascos necesarios para la toma de la muestra, los cuales ya cumplen con ciertas características.

En el caso que no se tenga estos materiales previamente a la toma de las muestras, se debe elegir el material de los frascos, que debe tener un volumen de al menos 500 ml a 1 litro.

El material del frasco depende del parámetro que será determinado, es decir que en el caso de los parámetros que generalmente se analizan para verificar el funcionamiento de la PTAR (DBO_5^1 , DQO^2 , $\text{NH}_4\text{-N}^3$ y Sólidos Suspendidos) se debe tomar en cuenta frascos de vidrio o de plástico ya que los resultados no se verán afectados (PERIAGUA, 2015).

2.6.5.3. Transporte de las muestras

Se debe transportar las muestras con cuidado, prestando atención que no se caigan o derramen. Para transportarlas se puede usar una conservadora. Las condiciones perfectas para transportar las muestras son: oscuridad y una temperatura entre 1 – 5 °C. Pero las muestras no deben estar congeladas. En circunstancias así las muestras son estables hasta 24 horas.

Se usan bolsas de gel o paquetes fríos para conservar las muestras. Si se utiliza hielo existe el problema que provoque mucha agua en la conservadora, y se corra el peligro de contaminar las muestras o afectar las etiquetas (PERIAGUA, 2015).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación Geográfica

El Centro Experimental de Kallutaca dependiente de la Carrera de Ingeniería Agronómica U.P.E.A., se encuentra en la Comunidad Kallutaca, Municipio de Laja, Provincia Los Andes (Figura 3). Geográficamente se encuentra entre los paralelos $16^{\circ}31'22''$ de Latitud Sur y los paralelos $68^{\circ}18'29''$ de Longitud Oeste del meridiano de Greenwich. A una altitud de 3903 msnm. Sobre la carretera internacional a Desaguadero (Mamani, 2014).

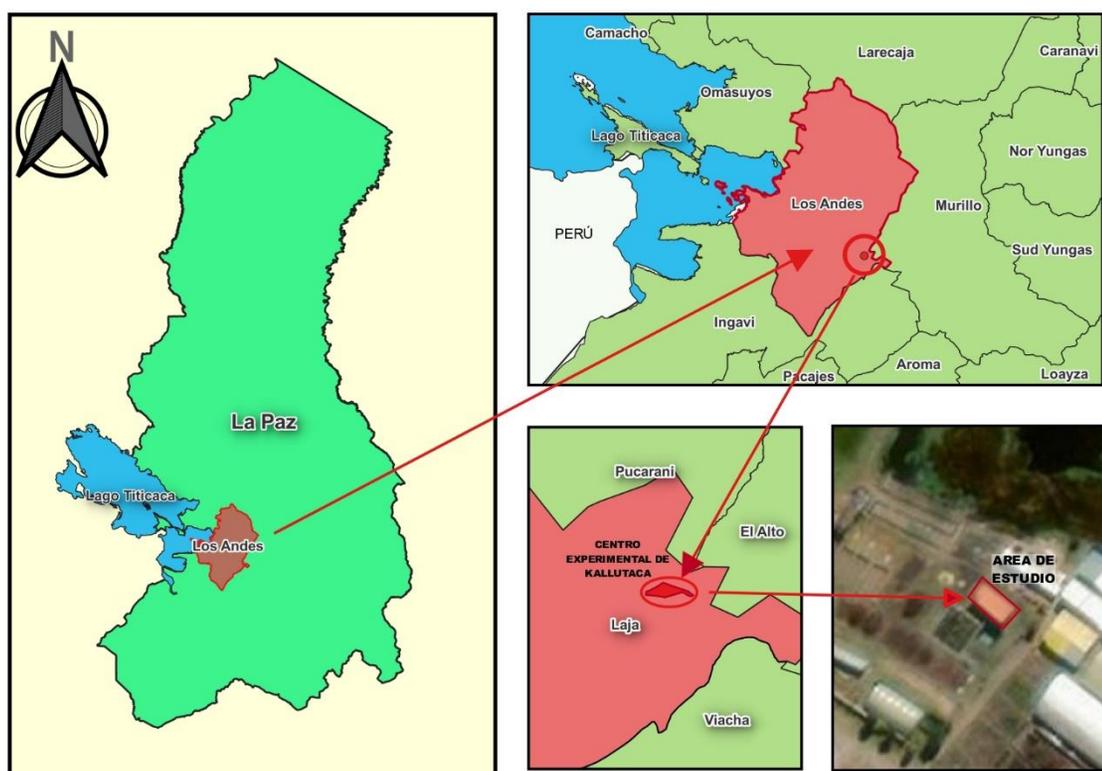


Figura 3. Ubicación geográfica del Centro Experimental Kallutaca
Fuente: Elaboración propia (QGIS, google earth, 2024)

3.1.2. Características Edafoclimáticas

3.1.2.1. Clima

Según Callizaya (2020), las características climáticas de la zona de estudio son las siguientes: la temperatura promedio oscila entre 6.8 y 7.9°C, con mínimos extremos de -10.8 a -12.2°C y máximos extremos de 18.3 a 21.3°C. La velocidad del viento es de 9.6 km/h. La evapotranspiración media durante los meses de septiembre a febrero varía entre 5.2 y 6.5 mm, mientras que de marzo a julio disminuye a entre 4.1 y 4.9 mm, con una acumulación anual de 57.8 mm. La precipitación anual es de 615.3 mm, y la humedad relativa (HR%) registra valores de 58.7 a 65.1% entre diciembre y marzo, y de 12.7 a 21.4% entre junio y agosto, con un promedio anual de 39.2 a 40.1%.

3.1.2.2. Suelo

Según Carita (2014), indica que los suelos predominantes en el Centro Experimental Kallutaca, son de tipo franco arcilloso limoso y franco arcillosos, no es tolerante a la compactación y presenta resquebrajamiento en las épocas secas e inundación en las épocas lluviosas, con un declive de 2-5%, la condición física del suelo es arable, los suelos son poco profundos de 10 a 45 cm, la capa arable presenta una retención de agua moderada. El pH del agua es ligeramente de acida a neutro 6.0 a 6.7 y el pH del suelo es ligeramente acida 6.1, y el contenido de la materia orgánica varía de 0.05 a 3.07%.

3.2. Materiales

3.2.1. Material biológico

Para el presente trabajo de investigación se utilizó 6 kilogramos de lombrices rojas californiana (*Eisenia foetida*).

3.2.2. Material de escritorio

- Computadora (Laptop)
- Balanza de precisión
- Libreta de campo
- Planillas de registro

- Material de escritorio
- Cámara fotográfica
- Hojas bond tamaño carta
- Impresora

3.2.3. Material de campo

- Equipo, Multiparametro
- Envases esterilizados
- Muestreador de pozo
- Caja térmica de poliestireno expandido (cooler)
- Guantes de polietileno
- Barbijos
- Agua destilada
- Malla Raschel
- Aserrín

3.3. Metodología

3.3.1. Acondicionamiento del lombrifiltro

Para iniciar con el trabajo de investigación, se realizaron varios trabajos entre ellos, limpieza del área de estudio, la adición de aserrín al lecho, limpieza de los micro aspersores para garantizar en todo momento una uniformidad de riego en la superficie del lombrifiltro.

3.3.2. Recolección de los componentes del lombrifiltro

- Se recolecto 6 kg. de *Eisenia foetida* (Lombriz roja californiana) del lombricario perteneciente al módulo de bioabonos de la carrera Ingeniería Agronómica, que se encuentra en el Centro Experimental Kallutaca.
- Se recolecto 30 sacos de aserrín de madera blanca, que fueron recolectados de carpinterías de la ciudad de El Alto.
- Se acondiciono la tierra de diatomeas que ya contaba el lombrifiltro.
- Se acondicionaron las piedras, grava mediana del lombrifiltro.

3.3.3. Capas filtrantes del lombrifiltro en el Centro Experimental Kallutaca

Para esto, de manera manual se adecuo cada una de las capas del material filtrante que conforman el lombrifiltro, son el colocado de grava, tierra de diatomea y aserrín, además se separó la capa de aserrín de la capa que contiene tierra de diatomeas con la malla Raschel, para evitar que las lombrices escapen a otras capas, como se observa en la figura 4.

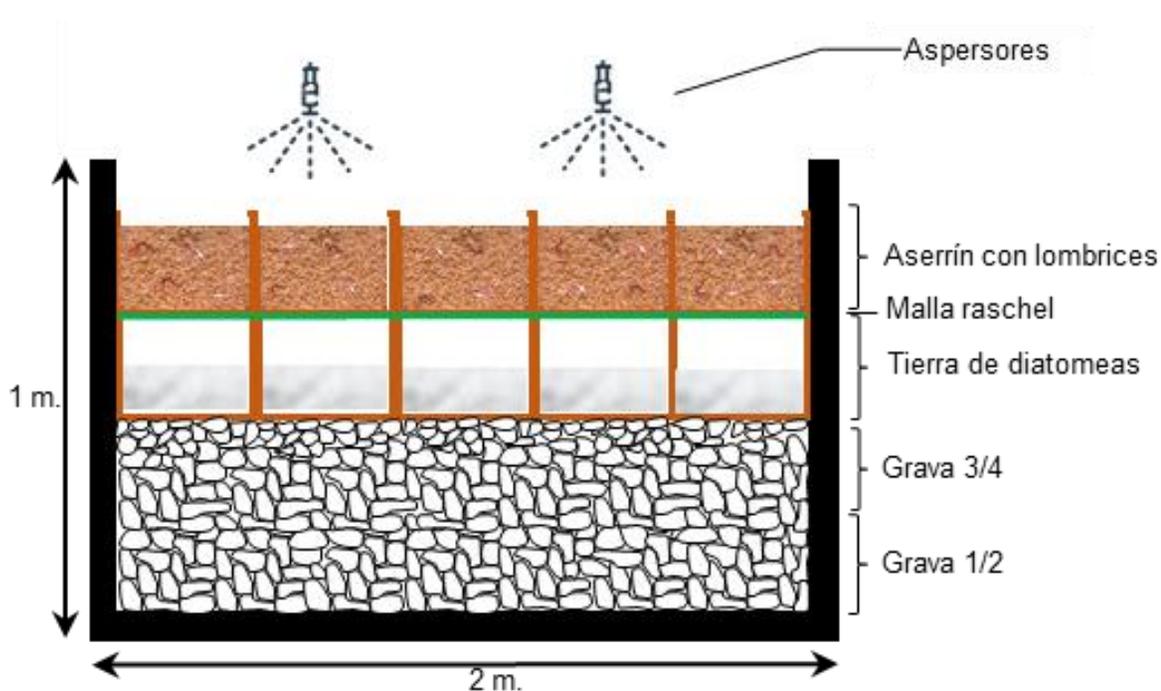


Figura 4. Corte transversal del lombrifiltro en el Centro Experimental Kallutaca

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

3.3.4. Inoculación de Lombrices

La inoculación de las lombrices rojas californianas, se realizó en la capa de aserrín, que están dispuestos en los canastillos de plástico a razón de 100 gr. por canastillo, un total de 6 kg. de lombrices para todo el sistema (anexo 8). Posteriormente se hizo ingresar el agua residual mediante el riego con micro aspersores al sustrato de las lombrices. Posterior a la inoculación de las lombrices, se tuvo un tiempo de adaptación (2 semanas) hasta la primera toma de muestras, de esta manera para que el tratamiento del agua residual resulte efectivo. Además, se realizó la prueba de puño para verificar el porcentaje de humedad que es uno de los parámetros importantes para la supervivencia de las lombrices; y se dio la inoculación de las lombrices en cada recipiente. Para el proceso de adaptación se tomó como referencia a (Mendieta & Bravo, 2012) donde nos menciona que la aclimatación adoptada para dicha investigación, fue de 14 días.

3.3.5. Distribución de agua en el lombrifiltro

Una vez establecido el lombrifiltro e inoculadas las lombrices, se procedió a asperjar el lombrifiltro con las aguas servidas provenientes de un pozo cercano. Para este propósito, se utilizó una electrobomba de agua con una capacidad de 0,75 HP y micro aspersores que distribuyeron el agua uniformemente. El agua residual utilizada fue previamente filtrada y tratada en estanques artificiales con grava para separar los residuos sólidos.

La distribución del agua residual en el lombrifiltro se realizó por aspersion, con el objetivo de lograr una distribución uniforme y no afectar a las lombrices. Distribuir el agua por inundación o en exceso podría matar a las lombrices y sobrepasar la capacidad y los principios de funcionamiento del lombrifiltro.

3.3.6. Muestreo

La toma de muestras se llevó a cabo en el lombrifiltro de la planta modular de tratamiento de aguas residuales del Centro Experimental Kallutaca, perteneciente al Área Ciencias Agrícolas, Pecuarias y Recursos Naturales de la Universidad Pública de El Alto.

A fin de evaluar la eficiencia del lombrifiltro, como tratamiento terciario del sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro Experimental Kallutaca, se ha visto por conveniente identificar y seleccionar 2 puntos de muestreo (1 afluente, antes de entrar al lombrifiltro y 1 efluente, a la salida del lombrifiltro) de los cuales se determinaron los

parámetros fisicoquímicos y microbiológicos analizados in situ y en laboratorio (Anexo 11 y 12).

3.3.7. Parámetros a determinar in situ y en laboratorio

Cuadro 2. Parámetros físico-químicos valorados in situ con el equipo multiparamétrico en el afluente y efluente del lombrifiltro

LOMBRIFILTRO CENTRO EXPERIMENTAL KALLUTACA - IN SITU			
N°	PARAMETRO	UNIDAD	CANTIDAD
1	TEMPERATURA	°C	10
2	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	uS/cm	10
3	TURBIDEZ	NTU	10
4	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES	mg/l	10
5	PH	ph	10
6	OXIGENO DISUELTO	mg/l	10
TOTAL			60

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3. Parámetros químico-biológicos valorados en laboratorio del afluente y efluente del lombrifiltro

LOMBRIFILTRO CENTRO EXPERIMENTAL KALLUTACA - LABORATORIO			
N°	PARAMETRO	UNIDAD	CANTIDAD
1	ACEITES Y GRASAS	mg/l	10
2	DBO-5	mg/l	10
3	DQO	mg/l	10
4	COLIFORMES TOTALES	NMP/100 ml	10
5	COLIFORMES FECALES	NMP/100 ml	10
TOTAL			50

Fuente: Elaboración propia

3.3.8. Metodología para toma de datos de parámetros fisicoquímicos in situ

La realización de los parámetros fisicoquímicos in situ se siguió el criterio de la “Guía para la toma de muestras de agua residual”, del Servicio Nacional para la Sostenibilidad de servicios de saneamiento Básico (SENASBA), dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Agua.

La primera evaluación se realizó a los 14 días después de la inoculación de las lombrices *Eisenia foetida* al lombrifiltro, asegurándonos de que se adaptaran favorablemente al

sistema. A partir de esa fecha, se realizaron las evaluaciones y la toma de muestras del afluente y el efluente cada 7 días durante 1 mes, que fue la duración del estudio.

Para el análisis de parámetros in situ (básicos) se utilizó el equipo Multiparamétrico: medidor de pH, T, Turb, OD, TDS y CE. de la carrera Ingeniería Agronómica, U.P.E.A. Todos los parámetros medidos in situ fueron registrados en las fichas de campo, además de incluir descripción del lugar de estudio, datos técnicos, datos ambientales y otros.

3.3.9. Especificaciones técnicas del equipo empleado.

Cuadro 4. Características del medidor multiparamétrico

EQUIPO	MARCA/MODELO	DESCRIPCIÓN	VALOR BASICO
Medidor Multiparamétrico: Medidor Portátil de calidad de agua	HORIBA Serie U-50	pH	Método de electrodo de vidrio Rango 0 a 14
		Conductividad eléctrica	Método de cuatro electrodos de CA Rango 0 mS/cm a 100 mS/cm
		Temperatura	Método sensor de temperatura de platino Rango -10 °C a 55 °C
		Oxígeno disuelto (OD)	Método polarográfico Rango 0 mg/l a 50,0 mg/l.
		Sólidos Totales Disueltos (TDS)	Método de conversión de conductividad eléctrica Rango 0 g/l a 100 g/l
		Turbidez	Método LED adelante 30° transmisión/ método de dispersión 0 NTU a 800 NTU

Fuente: Detalles técnicos: Multi Wáter Quality Cheker, serie U-50 Manual [ES]/Especificaciones del medidor.

3.3.10. Metodología para colecta de muestras de agua para análisis en laboratorio

Para el muestreo de los parámetros químicos y microbiológicos, de igual forma se siguió el criterio de la “Guía para la toma de muestras de agua residual”, del Servicio Nacional para la Sostenibilidad de servicios de saneamiento Básico (SENASBA), dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Agua. De manera similar a la toma de datos de los

parámetros fisicoquímicos in situ, la primera evaluación se llevó a cabo a los 14 días después de la introducción de las lombrices *Eisenia foetida* en el lombrifiltro, asegurando su adaptación favorable al sistema. A partir de ese momento, se recolectaron muestras del afluente y el efluente cada 7 días durante 1 mes, que fue la duración total del estudio.

Se recolectaron muestras puntuales directamente en los frascos y con el dispositivo de muestreo adecuado. Estos frascos fueron previamente esterilizados, luego se codificó el frasco de muestreo.

Una vez colectadas las muestras de agua estas fueron llevadas inmediatamente a las instalaciones del Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) del Instituto de Ecología de la Universidad Mayor de San Andrés, ubicada Calle 27, zona Cota Cota, Campus Universitario, para su posterior análisis.

3.3.11. Conservación de las muestras

Las muestras se mantuvieron en una conservadora con hielo durante el tiempo de transporte al laboratorio, el mismo día de haber tomado la muestra.

3.4. Análisis estadístico

3.4.1. Evaluación del sistema de tratamiento

Para este trabajo se utilizó la interpretación de los resultados obtenidos del sistema de tratamiento se realizó de dos maneras. Un análisis estadístico descriptiva y la aplicación de graficas comparativas de los diferentes factores físicas, químicas y biológicas de datos de cada parámetro de estudio. En el análisis comparativo, se realizaron comparaciones de los valores de los parámetros medidos con los establecidos por el reglamento en materia de contaminación hídrica (RMCH) y la Ley 1333, se determinaron cuáles de estos parámetros excedían los valores estipulados en dicho reglamento. Bajo el siguiente detalle:

3.4.2. Determinación de la eficiencia del lombrifiltro

Para evaluar la remoción del lombrifiltro de tres capas con la especie (*Eisenia foetida*) se determinó el porcentaje de eficiencia de los parámetros analizados con la ecuación propuesta por (Caicedo, 2017), la cual es la siguiente:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(\text{Concentracion inicial}) - (\text{Concentracion final})}{(\text{Concentracion inicial})} * 100$$

3.4.3. Análisis comparativo

Los resultados del análisis obtenido por laboratorio y de los parámetros medidos in situ, se compararon con los límites permisibles de la clasificación de aguas, estipulado por el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333 de Medio Ambiente, basada en su aptitud de uso y de acuerdo a políticas ambientales vigentes en Bolivia.

3.4.4. Variables de estudio

Cuadro 5. Parámetros medidos para la verificación de la calidad del agua residual

PARAMETROS	PARAMETRO	UNIDAD
Parámetros físicos	Temperatura	°C
	Conductividad eléctrica	μS/cm
	Turbidez	NTU
	Sólidos disueltos totales	mg/l
Parámetros químicos	pH	pH
	Oxígeno disuelto	mg/l
	Aceites y grasas	mg/l
	DBO ₅	mg/l
	DQO	mg/l
Parámetros biológicos	Coliformes totales	NMP/100 ml
	Coliformes fecales	NMP/100 ml

Fuente: Elaboración propia

3.4.5. Esquema de la investigación

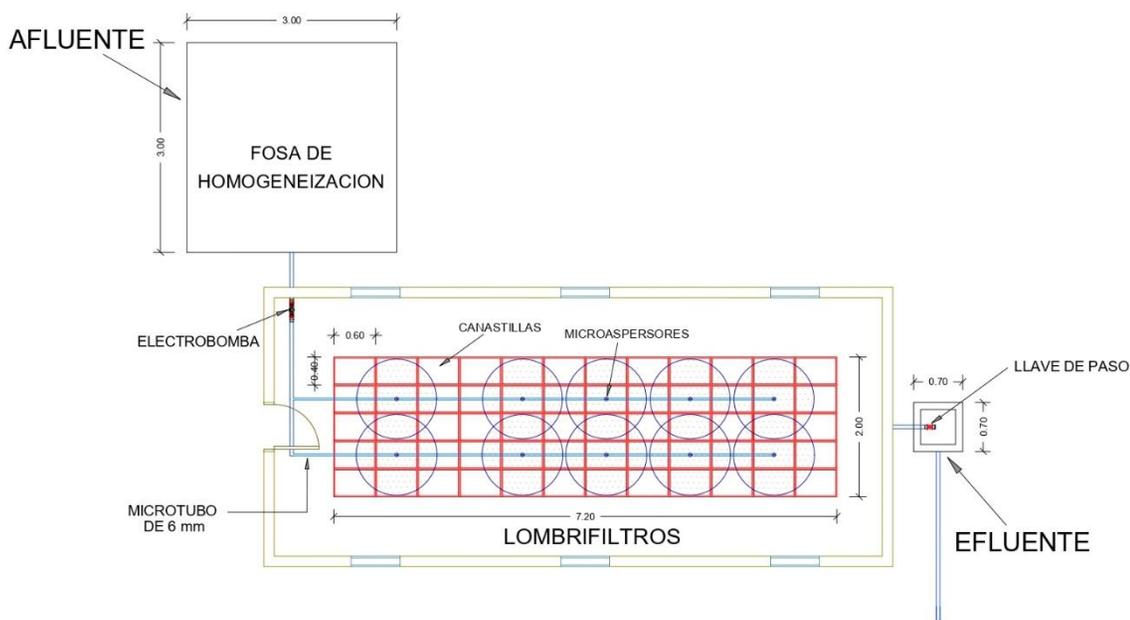


Figura 5. Esquema del lombrifiltro instalado en el Centro Experimental Kallutaca-U.P.E.A.

Fuente: Elaboración propia

El estudio se realizó en el área del módulo de Bioabonos del Centro Experimental Kallutaca, en un ambiente protegido con una temperatura promedio de 18°C. El lombrifiltro tiene una superficie de 14,4 m², 1 m de profundidad con diferentes capas (Figura 4). La capa con el lecho de lombrices se realizó dentro de canastillas de plástico (0,60 x 0,40 x 0,20 m). Se introdujo 0,048 m³ de aserrín de madera blanca a cada canastilla y 2,88 m³ para el total de la superficie.

Para lograr un riego homogéneo, se empleó una electrobomba para extraer el agua de la fosa, seguida de la utilización de 10 micro aspersores Green Spin, operando durante 1 hora al día. Este sistema permitió tratar y utilizar 2.000 litros diarios de agua residual.

La densidad de lombrices utilizadas fue de 100 gramos por canastilla, lo que equivale a un total de 6 kg de lombrices en todo el sistema. Esto se traduce en una densidad de aproximadamente 2,08 kg/m³ dentro del lombrifiltro.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros físico químicos registrados in situ y de los parámetros químico-biológicos analizados en laboratorio.

4.1. Comportamiento climático del lombrifiltro

Como parte de la investigación, se registraron los valores de la temperatura máxima y mínima, así como la humedad relativa del lombrifiltro durante el tiempo que duró el estudio. Los valores registrados fueron los siguientes:

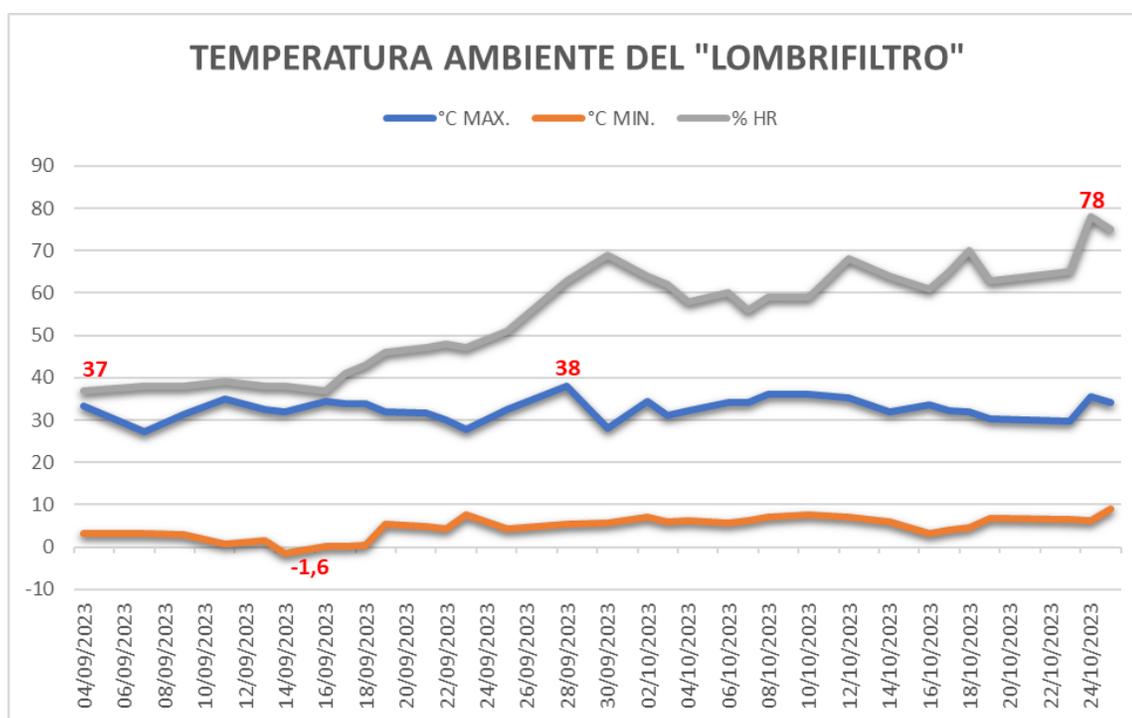


Figura 6. Datos climatológicos registrados con el termo-higrómetro en el lombrifiltro del Centro Experimental Kallutaca

Fuente: Elaboración propia

La Figura 6, muestra el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa en el interior del lombrifiltro desde la inoculación de las lombrices *Eisenia foetida*, el 4 de septiembre hasta la finalización del estudio registrada el 25 de octubre de 2023.

La temperatura del lombrifiltro se registró y se midió a las 12:00 p.m. día por medio, con ayuda de un Termo – Higrómetro digital, el cual guarda los valores establecidos de temperatura y humedad en su memoria. Las temperaturas mínimas llegaron medir una

temperatura hasta $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a mediados del mes de septiembre y las temperaturas máximas llegando a medir hasta $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ a finales del mes de septiembre de 2023, que fue la más elevadas en el transcurso de tiempo en la investigación. De la misma manera se realizó el registro de la humedad relativa, con ayuda del Termo – Higrómetro, alcanzando una menor humedad relativa promedio de 37%, al comienzo de la investigación, inicios del mes de septiembre, y a finales del mes de octubre y cerca a la conclusión de la investigación se alcanzó la mayor humedad relativa con 78% en el lombrifiltro del Centro Experimental Kallutaca.

4.2. Análisis físicos químicos registrados in situ de los puntos de muestreo

Los parámetros básicos, que fueron medidos in situ con el equipo multiparamétrico son: temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos disueltos totales, pH y oxígeno disuelto.

4.2.1. Temperatura

La temperatura de las aguas residuales del afluente y del efluente fueron tomadas en el lugar de la investigación con el equipo multiparamétrico, tanto al ingreso del lombrifiltro (fosa de homogeneización), como en el desemboque de las aguas residuales tratadas por el lombrifiltro.

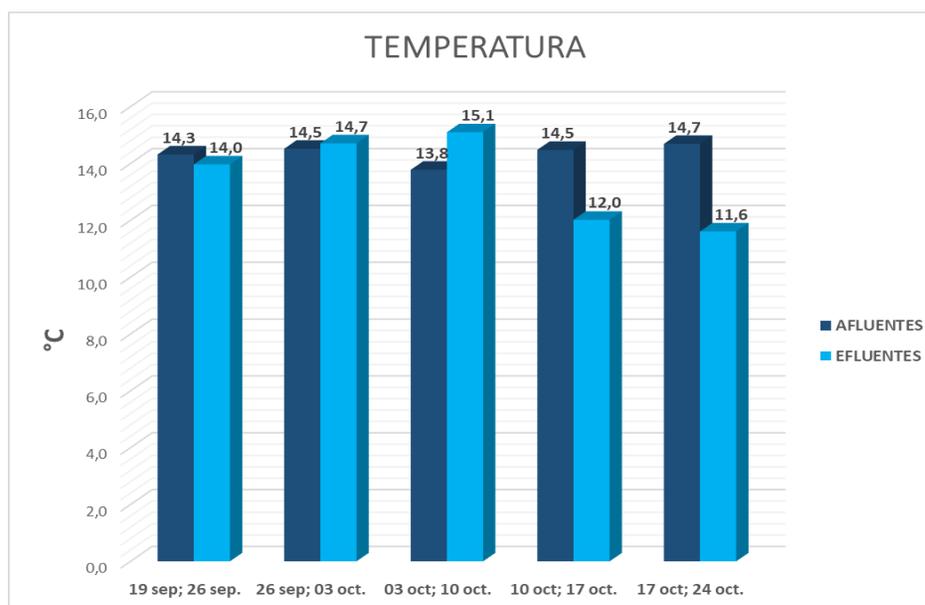


Figura 7. Resultados de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del Afluente y Efluente

Si bien este parámetro no tiene un valor límite establecido por el reglamento en materia de contaminación hídrica (RMCH), en la Figura 7, se observa el comportamiento de la temperatura, los valores en el afluente y el efluente muestran una media de 14,4 °C y 13,5 °C respectivamente.

Roque (2016), menciona que la determinación de temperatura es un parámetro importante en el tratamiento de aguas residuales, porque es el factor que determina el desarrollo de la actividad bacteriana, influyendo en el metabolismo, productividad, respiración y descomposición de la materia orgánica.

4.2.2. Conductividad eléctrica

La medición de la conductividad eléctrica en las aguas residuales, tanto del afluente como del efluente, se realizó in situ utilizando el equipo multiparamétrico. Estos datos fueron recopilados en dos puntos clave del proceso: primero, al ingreso del lombrifiltro, específicamente en la fosa de homogeneización, y segundo, en el punto de salida de las aguas residuales una vez tratadas por el lombrifiltro

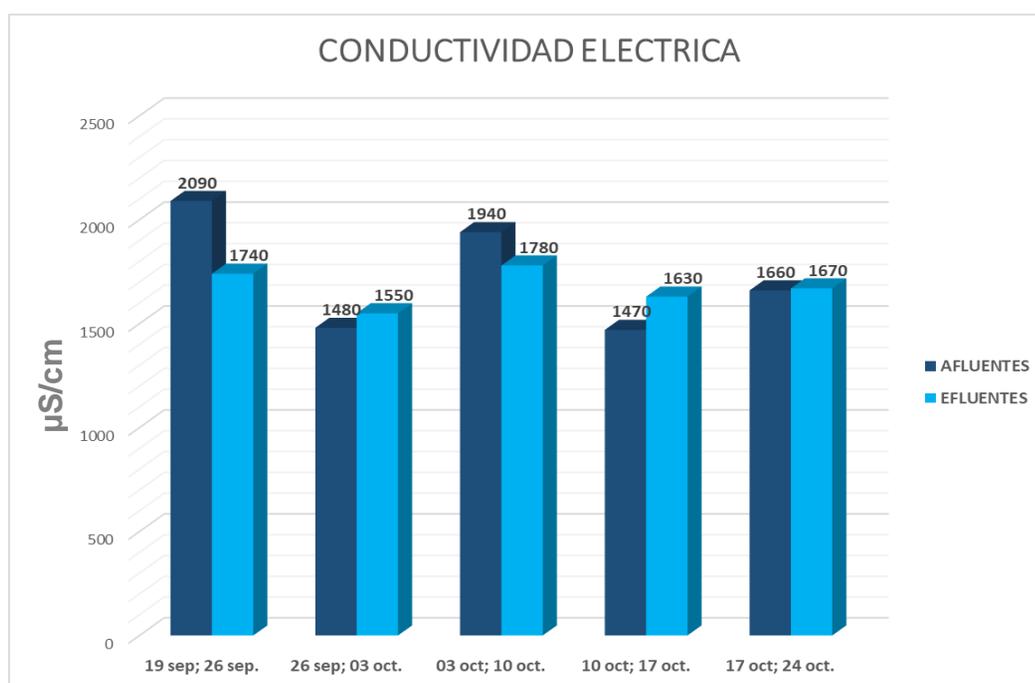


Figura 8. Resultados de Conductividad Eléctrica (µS/cm) del Afluente y Efluente

La Figura 8, muestra que el sistema de lombrifiltro muestra una capacidad variable para reducir la conductividad eléctrica del agua residual, con reducciones significativas en

algunas semanas y ligeros incrementos en otras. Para la primera semana del 19 al 26 de septiembre se observa una reducción significativa en la conductividad eléctrica del afluente al efluente (Afluente: 2090 $\mu\text{S/cm}$; Efluente: 1740 $\mu\text{S/cm}$), lo que indica una disminución de la cantidad de iones disueltos en el agua después de pasar por el lombrifiltro.

La semana del 26 de septiembre al 3 de octubre, registra un ligero incremento en la conductividad eléctrica del efluente en comparación con el afluente (Afluente: 1480 $\mu\text{S/cm}$; Efluente: 1550 $\mu\text{S/cm}$), lo cual puede sugerir una acumulación de iones disueltos en el proceso. Para la semana del 3 al 10 de octubre nuevamente, se observa una reducción en la conductividad eléctrica del afluente al efluente (Afluente: 1940 $\mu\text{S/cm}$; Efluente: 1780 $\mu\text{S/cm}$), aunque no tan pronunciada como en la primera semana. La cuarta semana del 10 al 17 de octubre, la reducción en la conductividad eléctrica es notable (Afluente: 1630 $\mu\text{S/cm}$; Efluente: 1470 $\mu\text{S/cm}$), mostrando que el sistema de lombrifiltro sigue siendo eficaz en la disminución de iones disueltos en el agua residual.

En la última semana del 17 al 24 de octubre se puede observar una ligera reducción en la conductividad eléctrica (Afluente: 1660 $\mu\text{S/cm}$; Efluente: 1570 $\mu\text{S/cm}$), indicando que el sistema mantiene su capacidad de tratamiento, aunque con menor eficiencia en comparación con algunas semanas anteriores. Estos resultados indican que el rendimiento del lombrifiltro puede depender de varios factores, como la composición del afluente y las condiciones operativas del sistema.

Este parámetro no tiene un valor límite establecido por el RMCH.

4.2.3. Turbidez

La medición de los datos de la turbidez en las aguas residuales, tanto del afluente como del efluente, se realizó in situ utilizando el equipo multiparamétrico, en unidades de NTU (Nephelometric Turbidity Units).

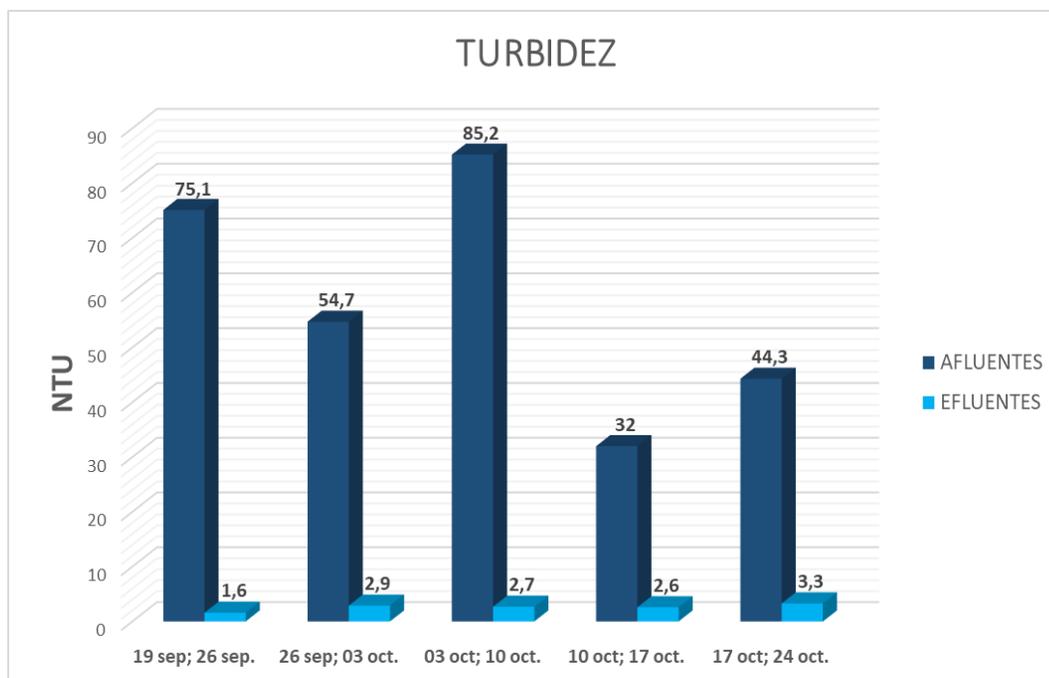


Figura 9. Resultados de turbidez (NTU) del Afluente y Efluente

Los datos ilustrados en la Figura 9, indican una notable reducción de la turbidez en el efluente en comparación con el afluente, lo que sugiere una mejora significativa en la calidad del agua después del tratamiento. Particularmente, en la semana del 19 al 26 de septiembre, la turbidez se redujo de 75.1 NTU en el afluente a 1.6 NTU en el efluente con una eficiencia de 98%. De manera similar, en la semana del 3 al 10 de octubre, la turbidez disminuyó de 85.2 NTU a 2.7 NTU dando una eficiencia de 97%. Estas reducciones consistentes en todas las semanas evaluadas reflejan la eficacia del lombrifiltro en la remoción de partículas suspendidas en el agua residual, mejorando así su claridad y calidad. La capacidad del lombrifiltro para reducir la turbidez de manera constante destaca su potencial como una solución eficaz para el tratamiento de aguas residuales.

Así también Xing *et al.* (2010), mencionan que la temperatura “influye en la remoción de la turbidez, ya que afecta directamente en la reproducción y fecundidad de las lombrices, indican que entre 18 a 25 grados centígrados es considerada óptima, estas temperaturas conllevan al máximo rendimiento de las lombrices para la remoción de los contaminantes. Cuando la temperatura desciende por debajo de 15° C las lombrices entran en un período de latencia, disminuyendo su actividad van dejando de reproducirse, crecer; los cocones (huevos) no eclosionan y pasan más tiempo encerrados los embriones, hasta que se presentan condiciones favorables”.

Cuadro 6. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para la Turbidez

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite
Turbidez		Unidad	<10	<50	<100	<200	
19-sep-23	Afluente	NTU			75,1		
26-sep-23	Efluente	NTU	1,6				
26-sep-23	Afluente	NTU			54,7		
03-oct-23	Efluente	NTU	2,9				
03-oct-23	Afluente	NTU			85,2		
10-oct-23	Efluente	NTU	2,7				
10-oct-23	Afluente	NTU		32			
17-oct-23	Efluente	NTU	2,6				
17-oct-23	Afluente	NTU		44,3			
24-oct-23	Efluente	NTU	3,3				

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 6, nos muestra claramente el comportamiento de la turbidez, que una vez que el agua residual ingresa en el lombrifiltro, los efluentes tienen una reducción considerable, con respecto al afluente. Según D. S. N° 24176 (8 de dic. de 1995) RMCH y Ley 1333, está en el grado permisible (Clase "A") al ver que todos los efluentes evaluados cada 7 días en el sistema de filtración del lombrifiltro son <10, y se considera apta para su uso en riego, consumo humano (previo a un tratamiento físico - químico, completo: coagulación, floculación, filtración y desinfección) y animal.

4.2.4. Sólidos disueltos totales

La Figura 10, muestra los resultados de la medición de sólidos disueltos totales (mg/l), evaluados in situ con el equipo multiparamétrico del afluente y efluente del sistema de lombrifiltro durante cinco semanas.

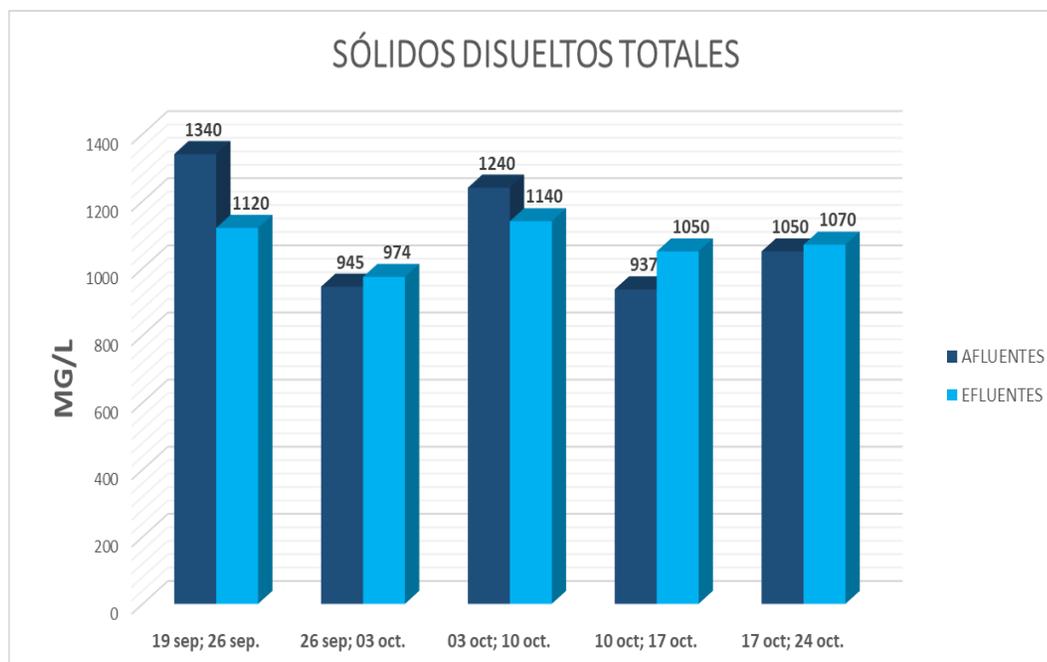


Figura 10. Resultados de Sólidos Disueltos Totales (mg/l) del Afluyente y Efluente

En la primera semana (19-26 de septiembre), se observa una reducción de 1340 mg/l en el afluyente a 1120 mg/l en el efluente, indicando una disminución en la concentración de sólidos disueltos. La segunda semana (26 de septiembre - 3 de octubre) muestra una leve variación, con valores de 945 mg/l en el afluyente y 974 mg/l en el efluente, sugiriendo un ligero aumento en la concentración después del tratamiento. En la tercera semana (3-10 de octubre), los valores son de 1240 mg/l en el afluyente y 1140 mg/l en el efluente, demostrando una reducción significativa. La cuarta semana (10-17 de octubre) muestra nuevamente un ligero incremento de 937 mg/l en el afluyente a 1050 mg/l en el efluente. En la última semana (17-24 de octubre), se observa un incremento leve de 1050 mg/l en el afluyente a 1070 mg/l en el efluente, lo que sugiere una acumulación o variación en el proceso de tratamiento. En síntesis, el sistema de lombrifiltro presenta una capacidad variable para reducir los sólidos disueltos totales, con mayor efectividad en algunas semanas y ligeros incrementos en otras, lo que puede depender de la composición del afluyente y las condiciones operativas del sistema.

Según Roque (2016), la medición de sólidos permite evaluar el rendimiento del lombrifiltro, ya que su acumulación puede provocar la formación de lodos y malos olores, lo que reduce la eficiencia en la eliminación de contaminantes. Además, el aumento de los sólidos totales se atribuye a la actividad de las lombrices y la generación de vermicompost, lo que incrementa su concentración al entrar en contacto con el agua residual durante el riego.

Cuadro 7. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para los Sólidos Disueltos Totales

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite
Sólidos Disueltos Totales	Unidad		<1000	<1000	<1500	<1500	
19-sep-23	Afluente	mg/l				1340	
26-sep-23	Efluente	mg/l				1120	
26-sep-23	Afluente	mg/l	945				
03-oct-23	Efluente	mg/l	974				
03-oct-23	Afluente	mg/l				1240	
10-oct-23	Efluente	mg/l				1140	
10-oct-23	Afluente	mg/l	937				
17-oct-23	Efluente	mg/l				1050	
17-oct-23	Afluente	mg/l				1050	
24-oct-23	Efluente	mg/l				1070	

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 7, muestra que los niveles de SDT en el afluente, están en los límites permisibles para las clases "C" y "D" y algunas semanas registraron para las clases "A" y "B", indicando una alta concentración de sólidos disueltos antes del tratamiento. De igual forma, después del tratamiento en el lombrifiltro, los niveles de SDT en el efluente disminuyen en algunas semanas, logrando estar dentro de los límites permisibles para las clases "C" y "D", aunque aún fuera de los límites para las clases "A" y "B" en otras semanas. Esto sugiere que el sistema de lombrifiltro tiene una eficacia variable en la reducción de sólidos disueltos, con una mejora notable pero no suficiente para cumplir consistentemente con los estándares más estrictos de calidad del agua, según D. S. N° 24176 (8 de dic. de 1995) RMCH y Ley 1333 en su anexo A-2.

4.2.5. Potencial de hidrogeno (pH)

En la Figura 11, se puede observar el comportamiento del pH, evaluado in situ con el equipo multiparamétrico. El pH del afluente varía entre 8.85 y 8.67, mientras que el pH del efluente fluctúa entre 6.7 y 6.24

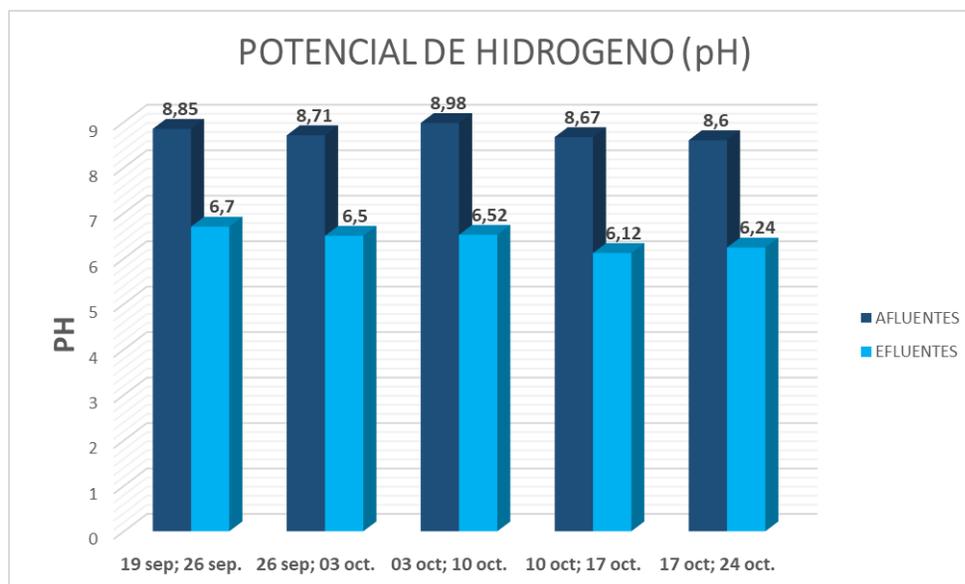


Figura 11. Resultados de Potencial de Hidrogeno (pH) del Afluente y Efluente

En la semana del 19 al 26 de septiembre, el pH del afluente es 8.85 y el del efluente es 6.7, indicando una disminución significativa en la alcalinidad del agua después del tratamiento. La semana del 26 de septiembre al 3 de octubre muestra valores de 8.71 en el afluente y 6.5 en el efluente, confirmando una tendencia similar. En la tercera semana, del 3 al 10 de octubre, el pH del afluente es 8.98 y el del efluente 6.52, nuevamente mostrando una reducción. La semana del 10 al 17 de octubre presenta una disminución del pH de 8.67 a 6.12, lo que refleja un cambio considerable en la acidez del agua tratada. Finalmente, del 17 al 24 de octubre, el pH del afluente es 8.6 y el del efluente es 6.24, manteniéndose la tendencia de reducción. Dicho de otro modo, el sistema de lombrifiltro muestra una capacidad consistente para reducir el pH del agua residual, transformándola de alcalina a más cercana a un nivel neutro, lo cual es beneficioso para ciertos usos del agua tratada.

Las lombrices estabilizan la acidez del agua a través de sus glándulas calcíferas, ubicadas en su esófago. Estas glándulas segregan carbonato cálcico cuando el material orgánico llega al estómago, neutralizando los ácidos presentes en los alimentos ingeridos. Tras pasar por el sistema digestivo, las lombrices excretan el material, añadiendo calcio de manera gradual y contribuyendo indirectamente al equilibrio del pH en el agua residual (Chavez & Fuentes, 2013).

Álvarez *et al.* (2011), afirma que el pH debe mantenerse idealmente en el rango 6,5 – 7.5 ya que a menores o elevado pH suele acabar con la vida de las lombrices, un pH ácido es

mortal debido a que la piel de las lombrices es muy sensible a cambios bruscos en el medio, mientras que a un pH muy alcalino su alimentación y digestión suele ser lenta por las mismas características del agua.

Cuadro 8. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para el Potencial de Hidrógeno (pH)

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN						
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite	
		6-8,5	6-9	6-9	6-9		
19-sep-23	Afluente	-		8,85			
26-sep-23	Efluente	-	6,7				
26-sep-23	Afluente	-		8,71			
03-oct-23	Efluente	-	6,5				
03-oct-23	Afluente	-		8,98			
10-oct-23	Efluente	-	6,52				
10-oct-23	Afluente	-		8,67			
17-oct-23	Efluente	-	6,12				
17-oct-23	Afluente	-		8,6			
24-oct-23	Efluente	-	6,24				

Fuente: Elaboración propia

El Cuadro 8, muestra los valores de pH (Potencial de Hidrógeno) medidos en diferentes fechas para los afluentes y efluentes. Estos resultados se comparan con los límites permisibles establecidos por la normativa boliviana según el Decreto Supremo N° 24176 RMCH, en el marco de la Ley 1333. Todos los valores de pH para los afluentes están fuera del límite para la Clase "A", lo que indica un pH ligeramente más alto de lo permitido en esta categoría. Sin embargo, los valores de pH para los efluentes están dentro de los límites permisibles para todas las clases (6 – 8,5), lo que sugiere que el proceso de tratamiento del agua está siendo efectivo en ajustar el pH dentro de los parámetros normativos.

4.2.6. Oxígeno disuelto (OD)

El siguiente gráfico muestra los resultados de la medición del oxígeno disuelto (% de saturación) en el afluente y efluente del lombrifiltro, in situ con el equipo multiparamétrico.

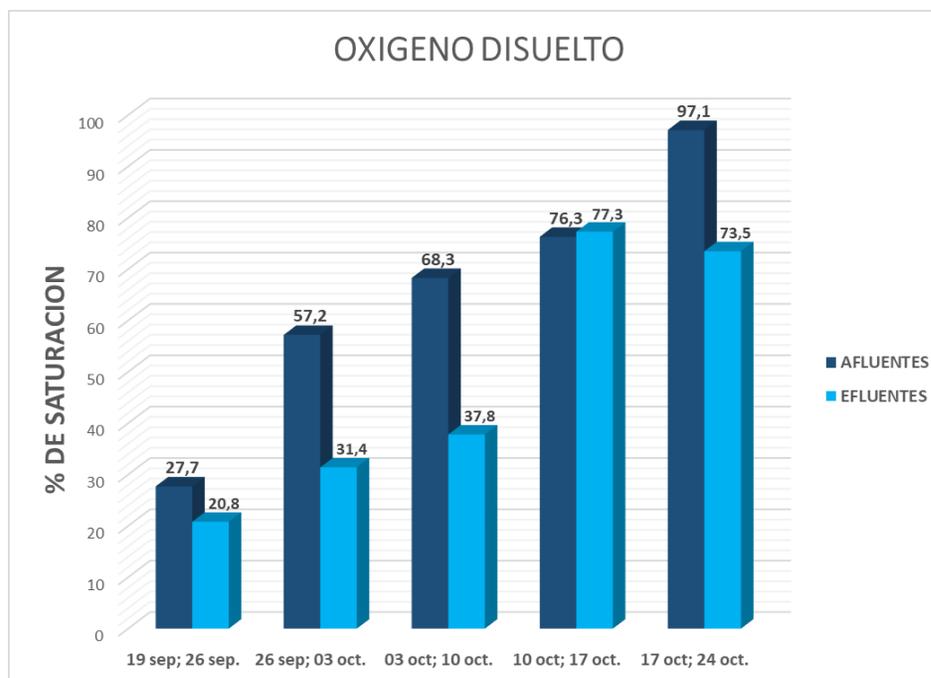


Figura 12. Resultados de Oxígeno Disuelto (% de Saturación) del Afluente y Efluente

En la primera semana (19-26 de septiembre), el oxígeno disuelto en el afluente es de 27.7%, mientras que en el efluente es del 20.8%, indicando una reducción en los niveles de saturación de oxígeno después del tratamiento. En la segunda semana (26 de septiembre - 3 de octubre), el oxígeno disuelto en el afluente es del 57.2%, mientras que en el efluente es del 31.4%, mostrando nuevamente una reducción. En la tercera semana (3-10 de octubre), los valores de oxígeno disuelto son del 68.3% en el afluente y del 37.8% en el efluente, manteniéndose la tendencia de disminución tras el tratamiento. En la cuarta semana (10-17 de octubre), se observa un incremento en el efluente, con valores del 77.3% frente al 76.3% en el afluente, lo que muestra una mejora en esta ocasión. En la quinta semana (17-24 de octubre), el valor del oxígeno disuelto vuelve a disminuir de 97.1% en el afluente a 73.5% en el efluente. A modo de conclusión, el sistema del lombrifiltro nos muestra una reducción en los niveles de saturación de oxígeno disuelto en el agua residual tratada, con la excepción de la cuarta semana, donde se observa una mejora. Esta reducción podría indicar la existencia de la actividad biológica que consume oxígeno durante el proceso de tratamiento.

Cuadro 9. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para el Oxígeno Disuelto

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite
Oxígeno Disuelto	Unidad		>80	>70	>60	>50	
19-sep-23	Afluente	% saturación					27,7
26-sep-23	Efluente	% saturación					20,8
26-sep-23	Afluente	% saturación				57,2	
03-oct-23	Efluente	% saturación					31,4
03-oct-23	Afluente	% saturación			68,3		
10-oct-23	Efluente	% saturación					37,8
10-oct-23	Afluente	% saturación		76,3			
17-oct-23	Efluente	% saturación		77,3			
17-oct-23	Afluente	% saturación	97,1				
24-oct-23	Efluente	% saturación		73,5			

Fuente: Elaboración propia

El Cuadro 9, muestra los valores de oxígeno disuelto, expresados en porcentaje de saturación. Estos valores se comparan con los límites permisibles establecidos por la normativa boliviana según el Decreto Supremo N° 24176 RMCH, en el marco de la Ley 1333. Los valores de oxígeno disuelto al inicio de las mediciones son bajos, tanto para el afluente y efluente, indicando una posible falta de oxígeno en el agua que podría afectar negativamente a los organismos acuáticos. Esto sugiere la presencia de materia orgánica en descomposición u otros contaminantes que consumen oxígeno. A medida que avanzan las fechas, tanto en los afluentes como en los efluentes, se observa una mejora en la saturación de oxígeno, lo que sugiere una mejora en la calidad del agua tras el tratamiento, alcanzando niveles óptimos para la mayoría de las clases estipuladas por la normativa.

4.3. Análisis de los parámetros químico-biológicos determinados en laboratorio de los puntos de muestreo

Los protocolos analíticos aplicados por el Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA), lugar donde se realizaron los análisis de los parámetros propuestos en este estudio, se basaron

en las técnicas recomendadas y establecidas por el Standards Methods of Examination of Water and Wastewater y Enviromental Protection Agency Sampllig and Analysis Methods.

4.3.1. Aceites y grasas

En la Figura 13, se observa los resultados del análisis de laboratorio para el parámetro de aceites y grasas en mg/l de las aguas residuales tratadas en el lombrifiltro del Centro Experimental Kallutaca durante un periodo de 5 semanas, con mediciones cada 7 días en dos puntos: afluente (antes del tratamiento) y efluente (después del tratamiento).

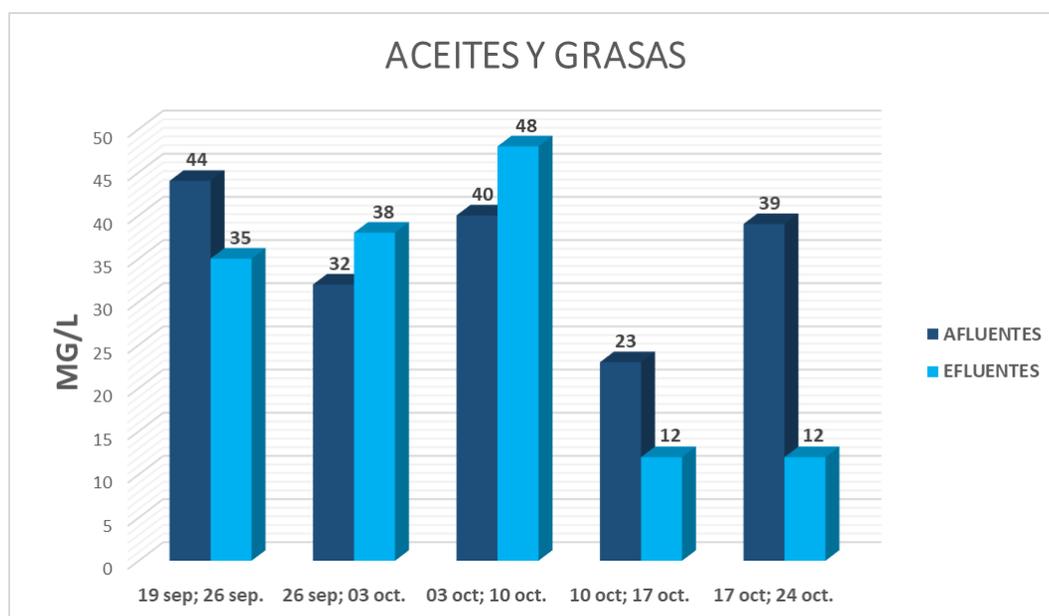


Figura 13. Resultados de análisis de laboratorio para aceites y grasas (mg/l) del Afluente y Efluente

Los resultados ilustrados en la figura 13, indican que los niveles de aceites y grasas en el afluente varían entre 23 mg/l y 44 mg/l, mientras que en el efluente los niveles van fluctuando entre 12 mg/l y 38 mg/l. También se observa un comportamiento inusual en las evaluaciones del 26 de septiembre al 3 de octubre y del 3 al 10 de octubre, donde los resultados de aceites y grasas en el efluente son mayores que en el afluente. En la evaluación del 26 de septiembre al 3 de octubre, los niveles en el efluente suben a 38 mg/l mientras que en el afluente son de 32 mg/l. De manera similar, en la evaluación de la siguiente semana (3 al 10 de octubre), el efluente muestra 48 mg/l, superando al afluente con 40 mg/l.

Este aumento inesperado en el afluente podría indicar un problema en el funcionamiento del lombrifiltro durante esos periodos. Sin embargo, en la siguiente medición (del 10 al 17 de octubre), los niveles de aceites y grasas en el efluente vuelven a ser significativamente menores que en el afluente. Las mayores reducciones se observan en la última medición, donde los niveles en el afluente fueron de 39 mg/l y en el efluente de 12 mg/l, lo que representa una disminución del 69%.

Cuadro 10. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para Aceites y Grasas

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite
Aceites y Grasas	Unidad		-	-	0,3	1	
19-sep-23	Afluente	mg/l					44
26-sep-23	Efluente	mg/l					35
26-sep-23	Afluente	mg/l					32
03-oct-23	Efluente	mg/l					38
03-oct-23	Afluente	mg/l					40
10-oct-23	Efluente	mg/l					48
10-oct-23	Afluente	mg/l					23
17-oct-23	Efluente	mg/l					12
17-oct-23	Afluente	mg/l					39
24-oct	Efluente	mg/l					12

Fuente: Elaboración propia

El Cuadro 10, muestra los resultados de la medición de aceites y grasas en afluentes y efluentes entre el 19 de septiembre y el 24 de octubre de 2023, los cuales fueron analizados en el laboratorio de calidad ambiental (LCA). Los valores de aceites y grasas en el agua afluente comienzan altos, con 44 mg/l el 19 de septiembre, y disminuyen a lo largo del tiempo hasta alcanzar 12 mg/l el 17 de octubre. Sin embargo, estos valores exceden consistentemente los límites permisibles establecidos por la normativa para Clase "D" (1 mg/l), lo que indica una contaminación significativa por aceites y grasas en el agua tanto antes como después del tratamiento. Aunque los efluentes muestran una reducción en las concentraciones a lo largo del período de estudio, siguen estando fuera del límite normativo,

lo que sugiere que el sistema de tratamiento actual no es suficiente para reducir estos contaminantes a niveles aceptables según la normativa boliviana. Esto resalta la necesidad de mejorar el tratamiento o implementar medidas adicionales para cumplir con los estándares ambientales establecidos.

4.3.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La Figura 14, muestra los resultados del análisis de laboratorio de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) en mg/l para las aguas residuales en el sistema de lombrifiltro, evaluado en el Centro Experimental Kallutaca durante 5 semanas con mediciones semanales en dos puntos: afluente (antes del tratamiento) y efluente (después del tratamiento).

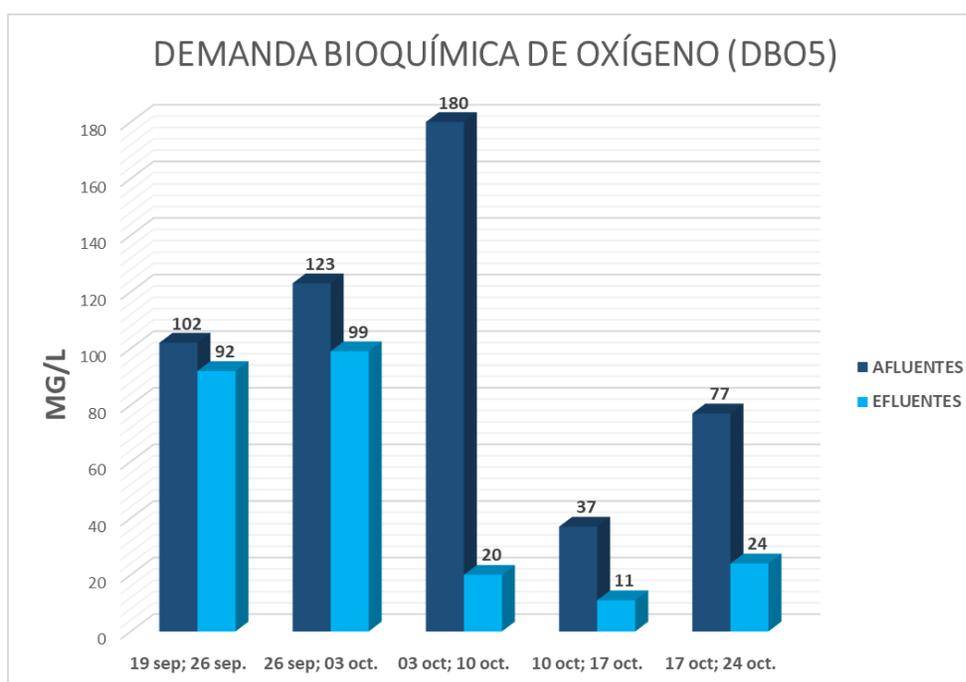


Figura 14. Resultados de análisis de laboratorio para Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO₅ (mg/l) del Afluente y Efluente

Los niveles de DBO₅ en el afluente oscilan entre 37 mg/l y 180 mg/l, mientras que en el efluente los niveles son consistentemente más bajos, variando entre 11 mg/l y 99 mg/l. Este descenso en los valores de DBO₅ en el efluente indica que el lombrifiltro reduce efectivamente la carga orgánica biodegradable en el agua residual, disminuyendo la demanda de oxígeno necesaria para la descomposición de materia orgánica. La mayor reducción se observa en la medición del 10 al 17 de octubre, donde la DBO₅ se reduce de 37 mg/l en el afluente a 11 mg/l en el efluente, lo que representa una disminución del 70%.

Estos resultados sugieren que el lombrifiltro es eficaz en la mejora de la calidad del agua, disminuyendo significativamente la DBO₅ a lo largo de las semanas evaluadas.

Según Saboya (2018), menciona que la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), es una de las pruebas más importantes para determinar el grado de contaminación en materia orgánica biodegradable, en aguas residuales domésticas e industriales, cuando la reducción es efectiva en este parámetro, es un alto indicador de que sus futuros usos son beneficiosos para fines de riego y bebidas de animales según normativa de cada país.

Así también el mismo autor señala que la reducción se debe principalmente a la actividad simbiótica de las lombrices y microorganismos aerobios que aceleran y optimizan la descomposición de la materia orgánica, ello se debe a que las lombrices trabajan como catalizadores biológicos que resultan de las reacciones bioquímicas.

Cuadro 11. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Unidad		<2	<5	<20	<30	
19-sep-23	Afluente	mg/l					102
26-sep-23	Efluente	mg/l					92
26-sep-23	Afluente	mg/l					123
03-oct-23	Efluente	mg/l					99
03-oct-23	Afluente	mg/l					180
10-oct-23	Efluente	mg/l			20		
10-oct-23	Afluente	mg/l					37
17-oct-23	Efluente	mg/l			11		
17-oct-23	Afluente	mg/l					77
24-oct	Efluente	mg/l				24	

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 11, presenta los resultados de la medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) en afluentes y efluentes desde el 19 de septiembre hasta el 24 de octubre

de 2023. Los valores de DBO₅ en los afluentes oscilan significativamente, comenzando con 102 mg/l el 19 de septiembre y alcanzando un pico de 180 mg/l el 3 de octubre. Posteriormente, los valores disminuyen, pero permanecen muy por encima del límite permisible para Clase "D" (30 mg/l). Los efluentes también muestran valores elevados, aunque tienden a disminuir con el tiempo, con un valor final de 24 mg/l el 24 de octubre, que finalmente cumple con los límites de la Clase "D". A pesar de esta mejora, la mayoría de los valores registrados tanto para afluentes como para efluentes están fuera de los límites normativos, lo que indica una alta carga orgánica en el agua, insuficiente reducción de la DBO₅ durante el proceso de tratamiento y la necesidad de optimizar los métodos de depuración para cumplir consistentemente con los estándares ambientales establecidos.

4.3.3. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Figura 15, presenta los resultados del análisis de laboratorio de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en mg/l en las aguas residuales tratadas mediante el lombrifiltro en el Centro Experimental Kallutaca, evaluado durante 5 semanas con mediciones semanales en dos puntos: afluente (antes del tratamiento) y efluente (después del tratamiento).

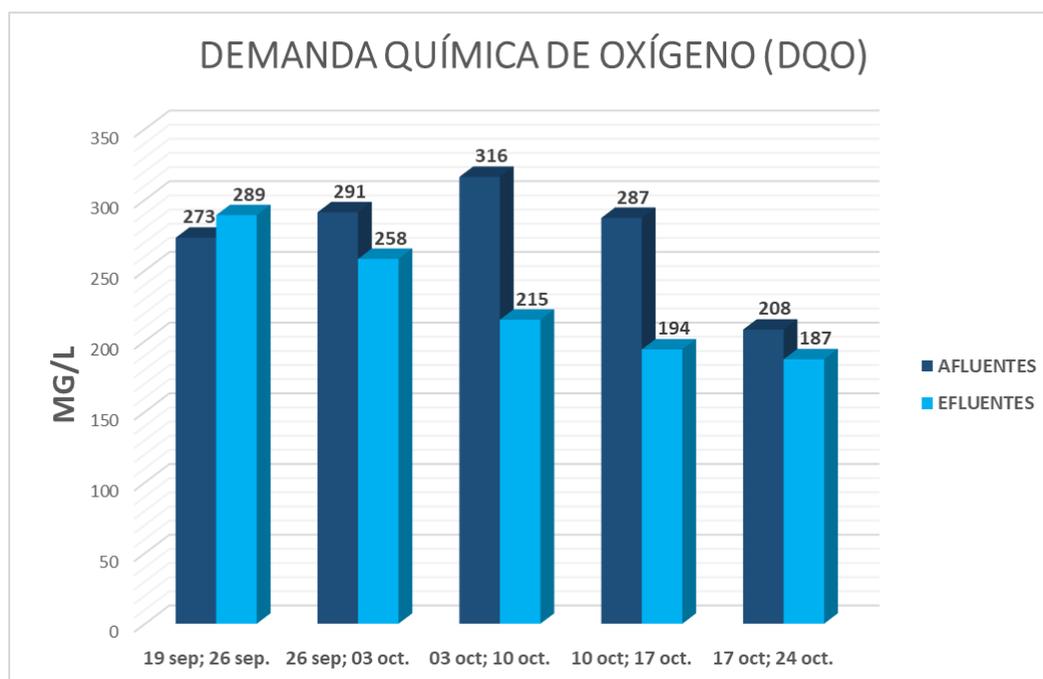


Figura 15. Resultados de análisis de laboratorio para Demanda Química de Oxígeno, DQO (mg/l) del Afluente y Efluente

Los niveles de DQO en el afluente varían entre 208 mg/l y 316 mg/l, mientras que en el efluente se observan valores más bajos, fluctuando entre 187 mg/l y 258 mg/l, excepto la primera evaluación que muestra un ligero incremento en el efluente de 289 mg/l a 273 mg/l del afluente. A pesar de ello, estos datos reflejan una reducción en la DQO tras el tratamiento, lo que indica que el lombrifiltro es eficaz en la eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua residual. La mayor reducción se registra en la medición del 03 al 10 de octubre, donde la DQO disminuye de 316 mg/l en el afluente a 215 mg/l en el efluente, representando una reducción del 32%. Aunque la disminución en la DQO no es tan pronunciada como en otros parámetros, los resultados sugieren que el lombrifiltro contribuye de manera consistente a la mejora de la calidad del agua tratada, reduciendo la carga contaminante en cada una de las semanas evaluadas.

Según Saboya (2018), indica que la “medición de DQO en una muestra de agua, está directamente relacionado con su grado de contaminación, así como con la naturaleza de la materia que compone los desechos sólidos, ya que a través de esta prueba es posible estimar que proporción del total de la materia orgánica es biodegradable.

La reducción de la DQO se debe a la actividad biológica, donde los microorganismos desnitrificadores, en condiciones aeróbicas, llevan a cabo procesos de oxidación. Estos microorganismos descomponen los compuestos orgánicos, consumiendo oxígeno y transformándolo en dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), que en parte se libera en la atmósfera. Otra porción es absorbida por los microorganismos y las lombrices, que integran estos compuestos en sus cuerpos y los convierten en humus tras el proceso digestivo (Saboya, 2018).

Esta reducción se debe a que las capas del lombrifiltro absorben y digieren la materia orgánica reduciendo la carga contaminante, las que son tratadas por mecanismos naturales que actúan simultáneamente, tales como: filtración lenta y pasiva; absorción, adsorción e intercambio iónico; biodegradación y desinfección (Garzón *et al.*, 2012).

Cuadro 12. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN						
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Unidad	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite	
		<5	<10	<40	<60		
19-sep-23	Afluente	mg/l					273
26-sep-23	Efluente	mg/l					289
26-sep-23	Afluente	mg/l					291
03-oct-23	Efluente	mg/l					258
03-oct-23	Afluente	mg/l					316
10-oct-23	Efluente	mg/l					215
10-oct-23	Afluente	mg/l					287
17-oct-23	Efluente	mg/l					194
17-oct-23	Afluente	mg/l					208
24-oct	Efluente	mg/l					187

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 12, presenta los resultados de la medición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en afluentes y efluentes desde el 19 de septiembre hasta el 24 de octubre de 2023. Los valores de DQO en los afluentes comienzan elevados, con 273 mg/l el 19 de septiembre, y continúan aumentando, alcanzando un máximo de 316 mg/l el 3 de octubre. Aunque los valores de DQO en los efluentes muestran una ligera disminución con el tiempo, pasando de 289 mg/l el 26 de septiembre a 187 mg/l el 24 de octubre, todos los valores registrados están significativamente fuera del límite permisible de la Clase "D" (60 mg/l). Esto indica que la carga de contaminantes orgánicos es considerable y que los procesos de tratamiento actuales no son suficientes para reducir la DQO a niveles aceptables según la normativa. Estos resultados subrayan la necesidad de mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales para cumplir con los estándares ambientales establecidos y minimizar el impacto ambiental.

4.3.4. Coliformes fecales

La Figura 16, muestra los resultados de los análisis de laboratorio para Coliformes Fecales en el afluente y efluente del sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el lombrifiltro en el centro experimental de Kallutaca.

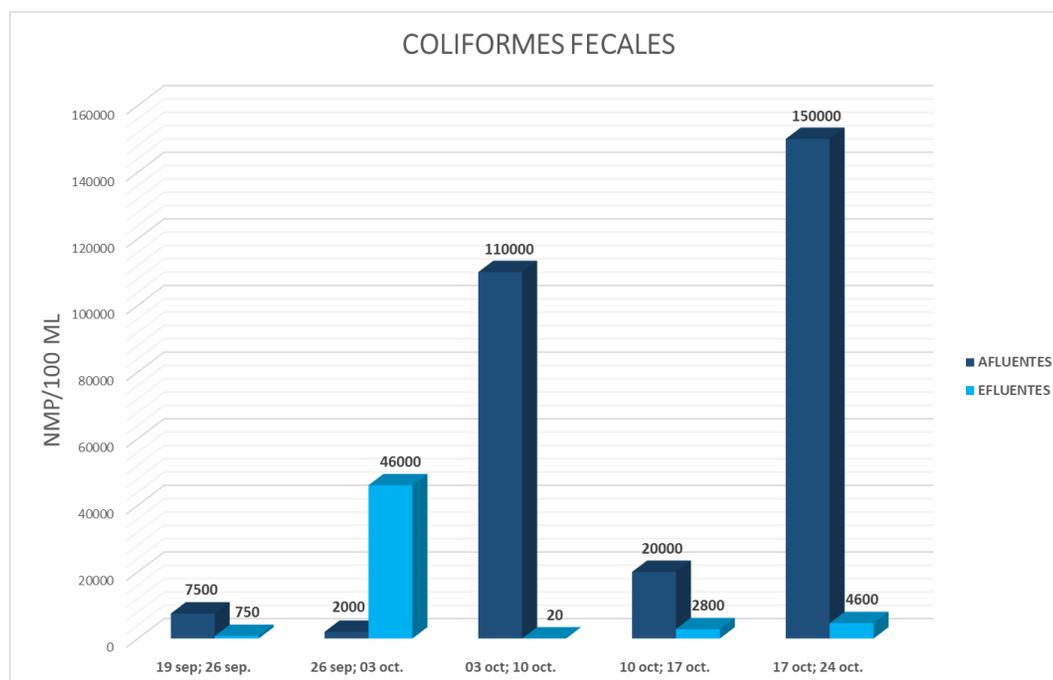


Figura 16. Resultados de análisis de laboratorio para Coliformes fecales (NMP/100 ml) del Afluente y Efluente

Los resultados muestran que los niveles de Coliformes Fecales en el afluente varían significativamente a lo largo de las semanas, con valores que van desde 2,000 NMP/100 ml hasta 150,000 NMP/100 ml. En comparación, los valores de Coliformes Fecales en el efluente son consistentemente más bajos, demostrando la efectividad del lombrifiltro en la reducción de estos contaminantes. Estos resultados indican que el sistema de lombrifiltro es bastante efectivo en la remoción de Coliformes Fecales, con una eficiencia de remoción que varía entre el 86% y el 99.98%. Sin embargo, es importante notar que hay una fluctuación en la eficacia del sistema entre las diferentes semanas, sobre todo en la segunda semana que muestra un incremento notable, lo que podría deberse a variaciones en las condiciones de operación o en la carga contaminante del afluente. El sistema mostró su mayor eficacia en la semana del 3 al 10 de octubre, alcanzando casi una eliminación total de los coliformes fecales.

Los biofiltros aeróbicos que emplean lombrices de tierra, como *Eisenia foetida*, son altamente eficaces en la eliminación de materia orgánica y patógenos, gracias a sus propiedades físicas y estructura. La aplicación intermitente de agua residual y el drenaje vertical del lecho facilitan que las reacciones aeróbicas ocurran rápidamente, lo que explica la efectividad en la remoción de estos elementos (Vizcaíno & Fuentes, 2016).

Cuadro 13. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333, para Coliformes Fecales

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite
	Coliformes Fecales	Unidad	<50	<1000	<5000	<50000	
19-sep-23	Afluente	NMP/100 ml				7500	
26-sep-23	Efluente	NMP/100 ml		750			
26-sep-23	Afluente	NMP/100 ml			2000		
03-oct-23	Efluente	NMP/100 ml				46000	
03-oct-23	Afluente	NMP/100 ml					110000
10-oct-23	Efluente	NMP/100 ml	20				
10-oct-23	Afluente	NMP/100 ml				20000	
17-oct-23	Efluente	NMP/100 ml			2800		
17-oct-23	Afluente	NMP/100 ml					150000
24-oct	Efluente	NMP/100 ml			4600		

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 13, muestra los resultados de las mediciones de coliformes fecales en afluentes y efluentes, comparando estos valores con los límites máximos permitidos según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333 de Bolivia. Los valores registrados en los afluentes son alarmantemente altos, alcanzando un máximo de 150,000 NMP/100 ml el 17 de octubre, muy por encima del límite para la Clase "D" (50,000 NMP/100 ml). Aunque los valores en los efluentes son significativamente menores en comparación con los afluentes, también superan los límites permisibles para las clases más restrictivas, particularmente los valores de 750 NMP/100 ml el 26 de septiembre, 20 NMP/100 ml el 17 de octubre y 4,600 NMP/100 ml el 24 de octubre. Estos resultados indican que el tratamiento de las aguas residuales no es lo suficientemente eficaz para reducir la presencia de

coliformes fecales a niveles que cumplan con la normativa vigente, a excepción del efluente evaluado en fecha 10 de octubre, con valores de 20 NMP/100 ml, ubicándose dentro de la clase “A” <50 NMP/100 ml. Sin embargo, en general no deja de representar un riesgo significativo para la salud pública y el medio ambiente. Es evidente la necesidad de mejorar los procesos de tratamiento para cumplir con los estándares regulatorios y asegurar la calidad del agua en cuerpos receptores.

4.3.5. Coliformes totales

La Figura 17, muestra los resultados de los análisis de laboratorio para Coliformes Totales en el afluente y efluente del sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el lombrifiltro del Centro Experimental Kallutaca.

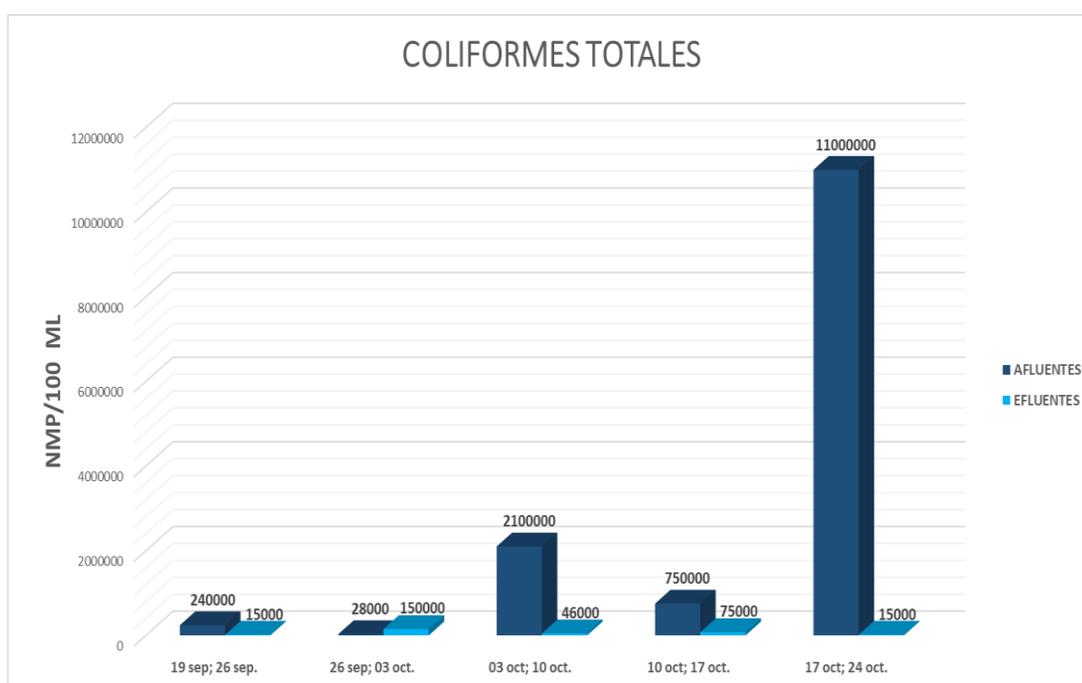


Figura 17. Resultados de análisis de laboratorio para Coliformes totales (NMP/100 ml) del Afluente y Efluente

Los valores de Coliformes Totales en el afluente varían considerablemente, comenzando en 240,000 NMP/100 ml y alcanzando un pico de 11,000,000 NMP/100 ml. En contraste, los valores en el efluente son significativamente más bajos en cada semana, lo que indica una reducción notable de Coliformes Totales gracias al tratamiento. Estos resultados muestran que el lombrifiltro es efectivo en la reducción de Coliformes Totales, con una eficiencia de remoción variable. Sin embargo, se observa un incremento en la segunda

semana, donde los valores de Coliformes Totales aumentan de 28,000 NMP/100 ml en el afluente a 150,000 NMP/100 ml en el efluente, es un resultado inusual que podría deberse al ambiente del lombrifiltro, habiendo favorecido el crecimiento de microorganismos, incluyendo coliformes, debido a condiciones como temperatura y humedad registrados en esos días.

Durante la primera y última semana, se observa una remoción superior al 90%, a excepción de la segunda semana que muestra un fallo temporal del sistema. En general, el lombrifiltro muestra una alta eficacia en la mayoría de las semanas, especialmente cuando se enfrenta a altas cargas contaminantes, como en la última semana de evaluación, donde la eficiencia de remoción alcanza el 99,86%.

La notable y óptima remoción se puede atribuirse a las diversas acciones y sustancias generadas por las lombrices y microorganismos consumidores de materia orgánica, que viven junto con las lombrices, tales como la acción enzimática intestinal, secreción de los celomas estos son fluidos que tienen propiedades antibacterianas, y el pastoreo selectivo que estos realizan (Saboya, 2018).

Cuadro 14. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333 para coliformes totales

Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según la Ley 1333			LÍMITES PERMISIBLES				
PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"	Fuera del límite
	Coliformes Totales	Unidad	<50	<1000	<5000	<50000	
19-sep-23	Afluente	NMP/100 ml					240000
26-sep-23	Efluente	NMP/100 ml				15000	
26-sep-23	Afluente	NMP/100 ml				28000	
03-oct-23	Efluente	NMP/100 ml					150000
03-oct-23	Afluente	NMP/100 ml					2100000
10-oct-23	Efluente	NMP/100 ml				46000	
10-oct-23	Afluente	NMP/100 ml					750000
17-oct-23	Efluente	NMP/100 ml					75000
17-oct-23	Afluente	NMP/100 ml					11000000
24-oct	Efluente	NMP/100 ml				15000	

Fuente: Elaboración propia.

El Cuadro 14, refleja los resultados de las mediciones de Coliformes Totales del afluente y efluente a lo largo de varias fechas en septiembre y octubre de 2023. Los valores obtenidos en el efluente indican que en todas las fechas las concentraciones de Coliformes Totales se encuentran por encima de los límites permisibles establecidos por la normativa boliviana según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333. Según la norma, para cuerpos de agua clase "D" (el tipo de cuerpo receptor menos restrictivo), el límite máximo es de 50,000 NMP/100 ml. Sin embargo, los valores medidos en las muestras de efluente superan significativamente este límite, con concentraciones que varían desde 15,000 hasta 11,000,000 NMP/100 ml, indicando un incumplimiento sistemático y grave de la normativa, lo cual representa un riesgo considerable para la calidad del agua y la salud pública. Este resultado sugiere que el tratamiento aplicado a las aguas residuales no es suficiente para reducir los niveles de coliformes a niveles aceptables según la regulación vigente, lo que podría requerir una revisión y mejora del proceso de tratamiento de aguas.

5. CONCLUSIONES

Según los objetivos planteados y los resultados obtenidos en el presente estudio, nos permite sustentar las siguientes conclusiones:

- El tratamiento con lombrifiltro mostró una notable capacidad para modificar los parámetros físico-químicos del agua residual. Redujo la conductividad eléctrica y la turbidez, mejorando la claridad del agua, sin embargo, en algunos casos no se alcanzaron valores óptimos. La temperatura del efluente se mantuvo en rangos aceptables, aunque variaciones extremas afectaron la eficiencia del sistema. El pH se mantuvo dentro de un rango adecuado, crucial para la estabilidad de los procesos biológicos y químicos en el lombrifiltro.
- En el caso de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), El sistema mostró una notable capacidad para reducir la DQO, lo que indica una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica disuelta, la mayor reducción se registra en la tercera semana de evaluación, donde la DQO disminuye de 316 mg/l en el afluente a 215 mg/l en el efluente, representando una reducción del 32%. Sin embargo, los resultados variaron a lo largo del tiempo, sugiriendo la influencia de factores externos en la eficiencia del proceso.
- Así mismo para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la reducción de la DBO en el efluente fue efectiva, reflejando la capacidad del lombrifiltro para degradar la materia orgánica biodegradable, la mayor reducción se observa en la cuarta semana de evaluación, donde la DBO₅ se reduce de 37 mg/l en el afluente a 11 mg/l en el efluente, lo que representa una disminución del 70%, aunque con fluctuaciones que podrían estar relacionadas con la carga contaminante y las condiciones operativas. En el caso del oxígeno disuelto, los niveles en el efluente fueron generalmente adecuados, lo que es crucial para la vida acuática. Sin embargo, se observaron algunas fluctuaciones, lo que sugiere la necesidad de un control más preciso de la aireación en el sistema.
- El sistema de lombrifiltro evaluado en el Centro Experimental Kallutaca demostró ser efectivo en la remoción de contaminantes biológicos; coliformes fecales y totales, alcanzando eficiencias de remoción que variaron entre el 86% y el 99.98%. No obstante, en ciertas ocasiones, los valores de coliformes en el efluente superaron los límites

establecidos por la normativa boliviana, lo que sugiere la necesidad de optimizar el sistema para un tratamiento consistente y cumplir con los estándares legales.

- Las variaciones climáticas, especialmente en términos de temperatura y humedad, afectaron el desempeño del lombrifiltro. Se observó que, durante períodos de temperaturas extremas y alta humedad, la eficiencia del sistema disminuyó, lo que sugiere la necesidad de optimizar las condiciones de operación para mantener un rendimiento constante sobre todo en regiones con climas variables.
- El sistema mostró una alta eficiencia en la mayoría de los parámetros evaluados, los resultados sugieren que el tratamiento mediante el lombrifiltro, tal como fue implementado, no siempre cumple con los estándares de calidad de agua establecidos por la normativa boliviana, D.S. N° 24176 RMCH., Ley 1333. Esto subraya la necesidad de mejoras adicionales en el proceso o la incorporación de etapas de tratamiento secundarias para asegurar la conformidad con la ley.

6. RECOMENDACIONES

En base a los objetivos, resultados y conclusiones del presente trabajo, se pueden formular las siguientes recomendaciones:

- Es fundamental establecer un plan de monitoreo continuo que permita identificar y corregir rápidamente cualquier variación en el rendimiento del sistema. Esto incluye la supervisión constante de los parámetros físico-químicos y biológicos del agua tratada.
- Dado que los niveles de coliformes en el efluente no siempre cumplieron con los límites establecidos, se recomienda explorar la posibilidad de incorporar tratamientos adicionales o secundarios que garanticen la calidad del agua tratada, alineándose con la normativa vigente.
- Se sugiere llevar a cabo investigaciones adicionales para explorar el impacto de diferentes tipos de aguas residuales y condiciones operativas en la eficiencia del lombrifiltro. Esto ayudará a optimizar su aplicación en diversos contextos y mejorar su capacidad de tratamiento.
- Realizar un cronograma de actividades para establecer las responsabilidades de operación y mantenimiento del sistema.
- Mantener las áreas de tratamiento sin la presencia de maleza y con las condiciones óptimas.
- Se recomienda para futuras investigaciones realizar estudios donde se tengan en cuenta otros factores como los metales pesados, que no fueron incluidos en este trabajo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Álvarez, A.; Jiménez, J.; & Camargo, Y. 2011. Biofiltración para la remoción de sulfuro de hidrógeno en la estación de bombeo norte de aguas residuales. Inge Cuc. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/2694>
- Arango, J. 2003. Evaluación ambiental del sistema Tohá en la remoción de salmonella en aguas servidas domésticas. Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile, Santiago. 92 p. <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Arango%20Jessica.pdf>
- Asto, A.; Castillo, M. 2024. Reutilización de aguas negras mediante un sistema de biofiltros en el cementerio ecológico de Huancayo, 2021. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14236>
- A.V.F. Ingeniería Ambiental. 2003. Fundación para la Transferencia Tecnológica. Recuperado el 2017, de www.biofiltro.cl.
- Bowman, R.; Gloyna, E.; Middlebrooks, E.; Pearson, G.; Reed, S.; Reid, L. 2002. Wastewater Technology Fact Sheet: Facultative Lagoons. Office of Water, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Caballero, P.; Zuni, D. 2017. Elaboración de filtros de diatomita activada con adición de quitosano para la descontaminación de las aguas del río Chili a nivel de laboratorio. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/ccf7ddf6-1897-4d64-9262-26d522c28c21>
- Caicedo, J. 2017. Diseño, construcción y evaluación de un prototipo biológico compuesto de *Eisenia fetida* y *Agave filifera*, para el tratamiento de aguas residuales en la granja del Ministerio de Agricultura, Acuicultura, Ganadería y Pesca, Riobamba 2015. [B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6321>

- Callizaya, E. 2020. Evaluación del comportamiento agronómico de la dosificación de niveles de biol en relación de diferentes sustratos de post repique de pino (*Pinus radiata*) en el vivero forestal del Centro Experimental de Kallutaca. Universidad Pública de El Alto (UPEA).
- Carita, E. 2014. Biotransformación de residuos de la hoja de coca (*Erythroxylum coca*) mediante vermicompostaje en el Centro Experimental de Kallutaca. Universidad Pública de El Alto (UPEA).
- Chavez, C.; Fuentes, A. 2013. Determinación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lixiviado obtenido del estiércol de bovino utilizando *Eisenia foetida* (Lombriz roja californiana) [PhD Thesis, Universidad de El Salvador]. <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/3255/>
- Collazos, C. 2008. Tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. https://www.academia.edu/download/39326350/TTO_AGUAS_RESIDUALES_UNAL.pdf
- Cubillos, A. 2007. Parámetros y características de las aguas residuales. Proyecto de desarrollo tecnológico de las instituciones de abastecimiento de agua potable y alcantarillado, 31.
- Díaz, D. 2016. Sistema de tecnología no convencional de tratamiento de aguas residuales mediante las lombrices Eisenias Foetidas para el sector lacteos de Soalpro S.R.L. Universidad Mayor de San Andrés.
- Díaz, E. 2002. Guía de lombricultura. Lombricultura una alternativa de producción. Agencia de Desarrollo Económico y Comercio Exterior Municipio Capital de la Rioja. Argentina, Buenos Aires.
- Espigares, M.; Pérez, J. 1986. Aguas residuales. Composición. In U. de Granada Ed. Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. <http://cidta.usal>.

es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion. pdf.

- Estrada, D. 2016. Disminución de arsénico mediante un filtro de diatomita del agua de afloramiento subterráneo en el campamento Cedro-Pataz. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/6790>
- Garkal, D.; Mapara, J.; Prabhune, M. 2015. Domestic waste water treatment by bio-filtration: A case study. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 4(1), 140–145.
- Garzón, M.; Buelna, G.; Moeller, G. 2012. La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(3), 153–161.
- Guyat, M.; Alderete, E.; Velásquez, D.; Manzanares, K.; López, I. 2005. Producción y biofertilizante a partir del aserrín. *Revista Forestal Baracoa*. 24.
- Hernández, Y. 2005. Anteproyecto de construcción para aplicación de Lombricultura al tratamiento de planta Llau-Llao de Salmonera Invertec SA [PhD Thesis, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcih557a/doc/bmfcih557a.pdf>
- Jiménez, M.; Padilla, G. 2012. Evaluación del potencial de absorción del aserrín para remover aceites pesados en cuerpos de agua a escala laboratorio. <https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/84>
- Kusanovic, M. 2009. Planta de tratamiento de riles. Universidad Magallanes. Punta Arenas, Chile. https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Kusanovic%2C+M.+%282009%29.+Planta+de+tratamiento+de+riles.+Universidad+de+Magallanes.&btnG=

- Lombrifiltro Chile Ingeniería Ambiental LTDA. 2017. Lombrifiltro. [Html].
<http://www.lombrifiltro.cl/Lombrifiltro>.
- Mamani, M. 2014. Efecto del rhizobium (*Rhizobium leguminosarum* v. Vicia) en el comportamiento agronómico de tres ecotipos de haba (*Vicia faba* L.) en la Estación Experimental de Kallutaca. Universidad Pública de El Alto (UPEA).
- Mara, D. 2013. Domestic wastewater treatment in developing countries. Routledge.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781849771023/domestic-wastewater-treatment-developing-countries-duncan-mara>
- Marsilli, A. 2005. Tratamiento de aguas residuales. Consultado por última vez el, 22.
- Martínez, A. 2001. Biodiscos: Una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno. Tecnología en marcha, 13(4), 57–59.
- Martinez, C. 2006. Manual de lombricultura. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación.
- Mejía, P. 2008. Agroflor. Manual de lombricultura. (En línea). Chile, Agroflor.
- Méndez, L.; Miyashiro, V.; Rojas, R.; Cotrado, M.; Carrasco, N. 2004. Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 7(14), 74–83.
- Mendieta, J.; Bravo, S. 2012. Tratabilidad de las aguas residuales industriales de una empacadora de camarón en la degradación de la materia orgánica mediante la adaptación y aplicación de lombrices acuáticas. Universidad de Guayaquil. 7.
- Metcalf, L.; Eddy, H.; Tchobanoglous, G. 1991. Wastewater engineering: Treatment, disposal, and reuse (Vol. 4). McGraw-Hill New York.
<https://library.wur.nl/WebQuery/titel/1979505>

- MMAyA. 2021. Compendio normativo de Gestión Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Viceministerio de Medio Ambiente, Biodiversidad, Cambios Climáticos y de Gestión y Desarrollo Forestal.
- Núñez, R. 2016. Tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel familiar, con Humedales Artificiales de flujo subsuperficial Horizontal, mediante la especie macrófita emergente *Cyperus Papyrus* (Papiro). https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/20.500.12840/555/1/Reyna_Tesis_bachiller_2016.pdf
- Ocola, J. 2005. Protección del Agua-Vigilancia y control de vertimientos–PAVER. Autoridad Nacional del Agua, 8.
- OEFA. 2014. Fiscalización ambiental en aguas residuales. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA. <http://repositorio.oefa.gob.pe//handle/20.500.12788/287>
- Parra, I.; Chiang, G. 2013. Integrated model of biopurification system for home sewage. A proposal for peri-urban communities from south center of Chile; Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Gestión y Ambiente*, 16. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22206036>
- Pérez, F.; Camacho, K. 2011. Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas [PhD Thesis].
- Pérez, M. 2019. Aplicación de sistema biológico para tratamiento de las aguas residuales de la planta de lácteos “Flor de leche” S.R.L. [Proyecto de Grado]. Universidad Mayor de San Andrés.
- PERIAGUA. 2015. Guía para la toma de muestras de agua residual. Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico. Ministerio de Medio Ambiente y Agua del Estado Plurinacional de Bolivia.

- Plurinacional, A. L. 2009. Constitución Política del estado. La Paz Bolivia.
<https://magistratura.organojudicial.gob.bo/consejo/descargas/files/52-2023/centralizado%20conv%2052.pdf>
- Pulido, A. L.; Torralba, R.; Piqueras, J. 2019. Contribuciones para el tratamiento de aguas residuales con sistemas alternativos de bajo coste, en España = Contributions for the treatment of waste water by means of low-cost alternativa systems in Spain. *Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, 6, Article 6.
- Quia, J. 2021. Evaluación del tratamiento de agua residual en humedales artificiales con la totora (*Schoenoplectus Californicus* spp totora) en la Estación Experimental de Kallutaca [Tesis de Grado]. Universidad Pública de El Alto (UPEA).
- Rodríguez, P. 2011. Análisis de la Situación de las Aguas Servidas en Zonas Rurales de la IV, VI y RM de Chile y Proposición de un Sistema Sustentable para su Tratamiento.
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104031>
- Roque, I. 2016. Tratamiento de agua residual con la implementación de biofiltro en la Estación Experimental de Kallutaca.
- Saboya, X. 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 Grado]. Universidad Peruana Union.
- Salazar, P. 2005. Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales. Recuperado de Austral-de-Chile. pdf.
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcis161s/sources/bmfcis161s.pdf>
- Schuldt, M. 2006. Lombricultura. Teoría y práctica. Ediciones Mundi-Prensa.
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=QaISAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Schuldt,+M.+\(2006\).+Lombricultura.+Teor%C3%ADa+y+pr%C3%A1ctica+\(p.+20\).+Mundi-Prensa+Libros.&ots=z4ITeEvNcB&sig=FUaQ7W7YHlxRIjcPtax8EriKyCM](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=QaISAQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Schuldt,+M.+(2006).+Lombricultura.+Teor%C3%ADa+y+pr%C3%A1ctica+(p.+20).+Mundi-Prensa+Libros.&ots=z4ITeEvNcB&sig=FUaQ7W7YHlxRIjcPtax8EriKyCM)

- SNV. 2017. Incorporación del Saneamiento Descentralizado en las EPSAs. Reusso.
- Somarriba, R.; Guzmán, G. 2004. Análisis de la influencia de la cachaza de caña y estiércol bovino como sustrato de la lombriz roja californiana para producción de humus [PhD Thesis, Universidad Nacional Agraria, UNA]. <http://repositorio.una.edu.ni/775/>
- Tchobanoglus, G.; Burton, F.; Stensel, D. 2003. Wastewater engineering: Treatment and reuse. American Water Works Association. Journal, 95(5), 201.
- Umasi, E. 2020. Evaluación de la eficiencia de un lombrifiltro (tres capas) para el tratamiento de las aguas residuales domésticas en el distrito de Cusipata-Cusco. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4739>
- Vásquez, M. 2013. Crean filtro con aserrín para tratar aguas contaminadas.
- Vicente, J. 2016. Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales. Enfoque UTE, 7(3), 41–56.
- Vizcaíno, L.; Fuentes, N. 2016. Efectos de *Eisenia foetida* y *Eichhornia crassipes* en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes domésticos. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 19(1), 189–198.
- Xing, M.; Li, X.; Yang, J. 2010. Treatment performance of small-scale vermifilter for domestic wastewater and its relationship to earthworm growth, reproduction and enzymatic activity. African Journal of Biotechnology, 9(44), 7513–7520.

8. ANEXOS

Anexo 1. Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l, según el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH)

NORMA PARÁMETROS	PROPUESTA	
	DIARIO	MES
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Plomo	0.6	0.3
Cadmio	0.3	0.15
Arsénico	1.0	0.5
Cromo + 3	1.0	0.5
Cromo + 6	0.1	0.05
Mercurio	0.002	0.001
Fierro	1.0	0.5
Antimonio(&)	1.0	
Estaño	2.0	1.0
Cianuro libre (a)	0.2	0.10
Cianuro libre (b)	0.5	3.0
PH	6.9	6.9
Temperatura(*)	5°c	5°c
Compuestos fenólicos	1.0	0.5
Sólidos Susp. Totales	60	
Colifecales (NMP/100 ml)	1000	
Aceite y Grasas (c)	10.0	
Aceite y Grasas (d)	20.0	
DBO5	80.0	
DQO(e)	250.0	
DQO(f)	300.0	
Amonio como N	4.0	2.0
Sulfuros	2.0	1.0

(*) Rango de viabilidad en relación a la Temperatura Media del cuerpo receptor.

(a), (c), (e) Aplicable a descargas de procesos mineros e industriales en general.

(b), (d), (f) Aplicable a descargas de procesos hidrocarburíferos.

(&) En caso de descargas o derrames de antimonio iguales o mayores a 2 500 Kg, se deberá reportar a la autoridad.

**Anexo 2. Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso, según
D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333**

Orden	Usos	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
1	Para abastecimiento doméstico de agua potable después de: a) Solo una desinfección y ningún tratamiento. b) Tratamiento solamente físico y desinfección. c) Tratamiento físico - químico, completo: coagulación, floculación, filtración y desinfección. d) Almacenamiento prolongado o pre sedimentación, seguidos de tratamiento, al igual que el c).	SI No necesario No necesario No necesario	NO SI No necesario	NO NO SI No necesario	No No NO SI
2	Para recreación de contacto primario: natación, Esquí, inmersión.	SI	SI	SI	NO
3	Para protección de los recursos hidrobiológicos	SI	SI	SI	NO
4	Para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscaras delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ella.	SI	SI	NO	NO
5	Para abastecimiento industrial	SI	SI	SI	SI
6	Para la cría natural y/o intensiva (acuicultura) de especies destinadas a la alimentación humana	SI	SI	SI	NO
7	Para abrevadero de animales	NO(*)	SI	SI	NO
8	Para la navegación	NO(**)	SI	SI	SI

(SI) Es aplicable, puede tener todos los usos indicados en las clases correspondientes

(*) No en represas usadas para abastecimiento de agua potable

(**) No a navegación a motor

(***) No aplicable en acuíferos

Anexo 3. Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores, según D.S. N° 24176 RMCH, Ley 1333

Nº	PARÁMETROS	UNIDAD	CANCERÍGENOS	CLASE "A"	CLASE "B"	CLASE "C"	CLASE "D"
1	pH	-	NO	6.0 a 8.5	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
2	Temperatura	°C		+/- 3°C de C receptor	+/- 3°C de C receptor	+/- 3°C de C receptor	+/- 3°C de C receptor
3	Sólidos disueltos totales	mg/l		1000	1000	1500	1500
4	Aceites y Grasas	mg/l	NO	Ausentes	Ausentes	0.3	1
5	DBO5	mg/l	NO	<2	<5	<20	<30
6	DQO	mg/l	NO	<5	<10	<40	<60
7	NMP Colifecales NMP	N/100ml	NO	<50 y <5 en 80% muestras	<1000 y <200 en 80% muestras	<5000 y <1000 en 80% muestras	<5000 y <5000 en 80% muestras
8	Parámetros	N/l		<1	<1	<1	<1
9	Color mg Pt/l	mg/l	NO	<10	<50	<100	<200
10	Oxígeno disuelto	% sat.	NO	>80% sat.	>70% sat.	>60% sat.	>50% sat.
11	Turbidez	UNT	NO	<10	<50	<100<2000***	<200 - 10000***
12	Sólidos sedimentables	ml/l	NO	<10 mg/l	<30 mg/1<0.1ml/1	<50mg/1<1ml/1	100-<1ml/l
13	Aluminio	mg/l		0.2 c. Al	0.5 c. Al	1.0 c. Al	1.0 c. Al
14	Amoniaco	mg/l	NO	0.05 c. NH3	1.0 c. NH3	2.0 c. NH3	4 c. NH3
15	Antimonio	mg/l	NO	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb	0.01 c. Sb
16	Arsénico total	mg/l	SI	0.05 c. As	0.05 c. As	0.1 c. As	0.1 c. As
17	Benceno	mg/l	SI	2.0 c. Be	6.0 c. Be	10.0 c. Be	10.0 c. Be
18	Bario	mg/l	NO	1.0 0.05 c. Ba	1.0 c. Ba	2.0 c. Ba	5.0 c. Ba
19	Berilio	mg/l	SI	0.001 c. B	0.001 c. Be	0.001 c. Be	0.001 c. Be
20	Boro	mg/l		1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B	1.0 c. B
21	Calcio	mg/l	NO	200	300	300	400
22	Cadmio	mg/l	NO	0.005	0.005	0.005	0.005
23	Cianuros	mg/l	NO	0.2	0.1	0.2	0.2
24	Cloruros	mg/l	NO	250 c. Cl	300 c. Cl	400 c. Cl	500 c. Cl
25	Cobre	mg/l	NO	0.05 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu
26	Cobalto	mg/l		0.1 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co	0.2 c. Co
27	Cromo Hexavalente	mg/l	SI	0.05 c. Cr total	0.05 c. Cr+6	0.05 c. Cr+6	0.05 c. Cr+6
28	Cromo Trivalente	mg/l	NO	-	0.6 c. Cr+3	0.6 c. Cr+3	1.6 c. Cr+3
29	1,2 Dicloroteno	mg/l	SI	10.0	10.0	10.0	10.0
30	1,1 Diclorotano	mg/l	SI	0.3	0.3	0.3	0.3
31	Estaño	mg/l	NO	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn	2.0 c. Sn
32	Fenoles	mg/l	NO	1.0 c. C6H5OH	1.0 c. C6H5OH	5 c. C6H5OH	5 c. C6H5OH
33	Hierro Soluble	mg/l	NO	0.3 c. Fe	0.3 c. Fe	1.0 c. Fe	1.0 c. Fe
34	Fluoruros	mg/l	NO	0.6 - 1.7 c. F	0.6 - 1.7 c. F	1.6 - 1.7 c. F	1.6 - 1.7 c. F
35	Fosfato Total	mg/l	NO	0.4 c. Orthofosf.	0.5 c. Orthofosf.	1.0 c. Orthofosf.	1.0 c. Orthofosf.
36	Magnesio	mg/l	NO	100 c. Mg	100 c. Mg	150 c. Mg	150 c. Mg
37	Manganeso	mg/l	NO	0.5 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn	1.0 c. Mn
38	Mercurio	mg/l	NO	0.001 c. Hg	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg
39	Litio	mg/l		2.5 c. Li	2.5 c. Li	2.5 c. Li	2.5 c. Li
40	Níquel	mg/l	SI	0.05 c. Ni	0.05 c. Ni	0.5 c. Ni	0.5 c. Ni

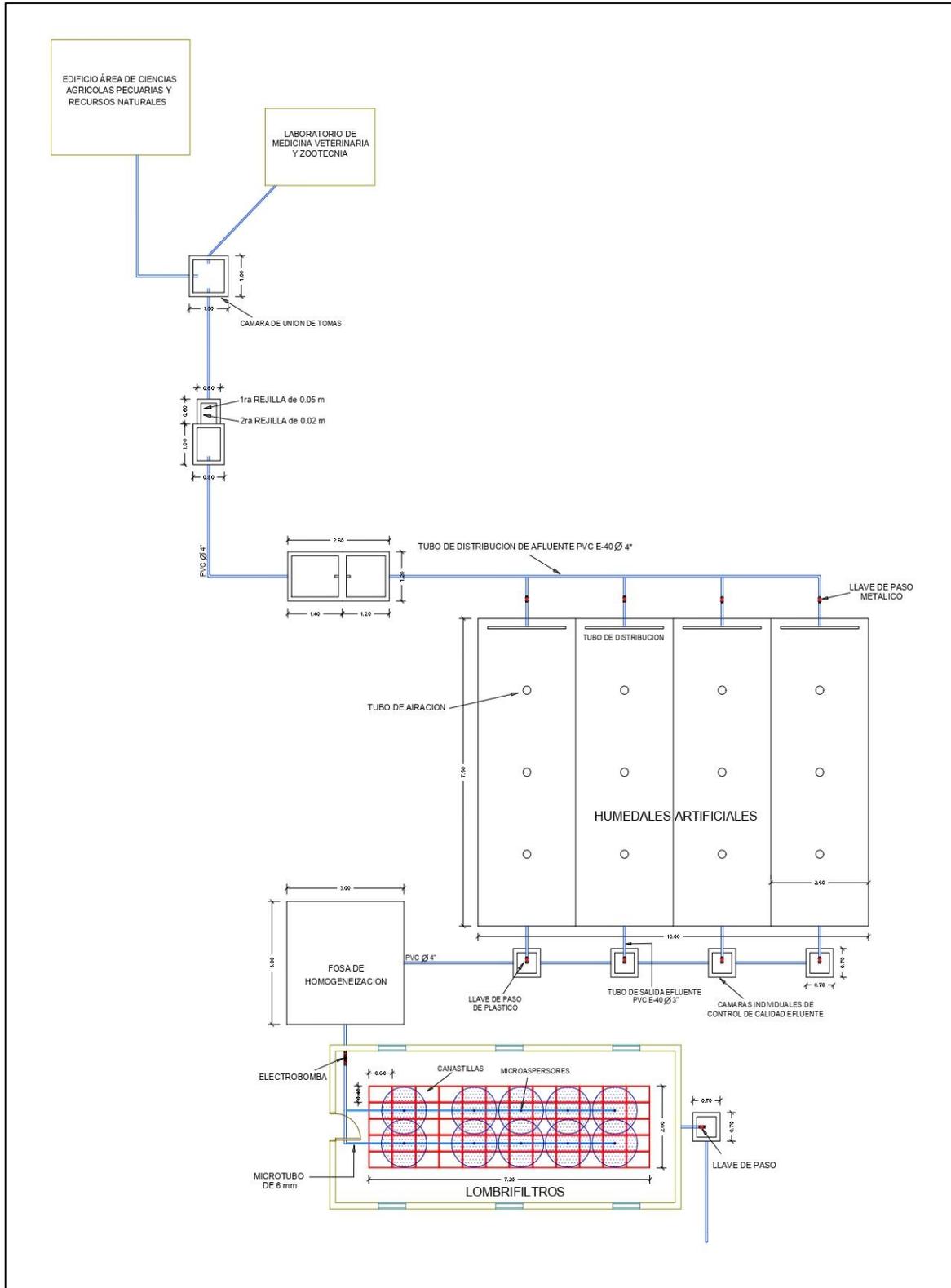
41	Nitrato	mg/l	NO	20.0 c. N03	50.0 c. N03	50.0 c. N03	50.0 c. N03
42	Nitrito	mg/l	NO	<1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N	1.0 c. N
43	Nitrógeno Total	mg/l	NO	5 c. N	12 c. N	12 c. N	12 c. N
44	Plomo	mg/l	NO	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.1 c. Pb
45	Plata	mg/l	NO	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag	0.05 c. Ag
46	Pentaclorofenol	mg/l	SI	5.0	10.0	10.0	10.0
47	Selenio	mg/l	NO	0.01 c. Se	0.01 c. Se	0.01 c. Se	0.05 c. Se
48	Sodio	mg/l	NO	200	200	200	200
49	Sólidos flotantes	-		Ausentes	Ausentes	Ausentes	<ret. malla 1mm2
50	Sulfatos	mg/l	NO	300 c. SO4	400 c. SO4	400 c. SO4	400 c. SO4
51	Sulfuros	mg/l	NO	0.1	0.1	0.5	1.0
52	S.A.A.M (Detergentes)	mg/l		0.5	0.5	0.5	0.5
53	Tetracloroetano	mg/l	NO	10	10	10	10
54	Tricloroetano	mg/l	SI	30	30	30	30
55	Tetracloruro de carbono	mg/l	SI	3	3	3	3
56	2.4.6 Triclorofenol	ug/l	SI	10	10	10	10
57	Uranio Total	mg/l		0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U	0.02 c. U
58	Vanadio	mg/l	NO	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V	0.1 c. V
59	Zinc	mg/l	NO	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	5.0 c. Zn	5.0 c. Zn
60	PLAGUICIDAS						
61	Aldrín – Dieldrín @	ug/l	SI	0.03	0.03	0.03	0.03
62	Clordano @	ug/l	SI	0.3	0.3	0.3	0.3
63	D.D.T @	ug/l	SI	1.0	1.0	1.0	1.0
64	Endrín @	ug/l	NO		@		@
65	Endosulfán @	ug/l	NO	70.0	70	70	70
66	Heptacloro y heptacloropoxido @	ug/l	SI	0.1	0.1	0.1	0.1
67	Lindano (Gama – BMC) @	ug/l	SI	3.0	3.0	3.0	3.0
68	Metoxicloro	ug/l	NO	30	30	30	30
69	Bifenilas Policloradas (PCB's)	ug/l		2.0	0.001	0.001	0.001
70	Toxafeno @	ug/l	SI	0.01	0.01	0.01	0.05
71	Demeton	ug/l	SI	0.1	0.1	0.1	0.1
72	Guiton @	ug/l	NO	0.01	0.01	0.01	0.01
73	Malatión @	ug/l	NO	0.04	0.04	0.04	0.04
74	Paratión @	ug/l	NO	@	@	@	@
75	Carbari:	ug/l	NO		0.02	0.02	0.02
76	Comp. Organofosforados y Carbamatos totales:	ug/l					
77	2.4-D: Herbicida: Chlorophanox	ug/l	SI	100	100	100	100
78	2.4.5-TP: Herbicida: Chlorophanox	ug/l	SI	10.0	10.0	10.0	10.0
79	2.4.5-T @	ug/l	SI	2.0	2.0	2.0	2.0
80	RADIACIÓN						
81	Radiación Alfa global	Bq/l	SI	0.1	0.1	0.1	0.1
82	Radiación beta global	Bq/l	SI	1.0	1.0	1.0	1.0

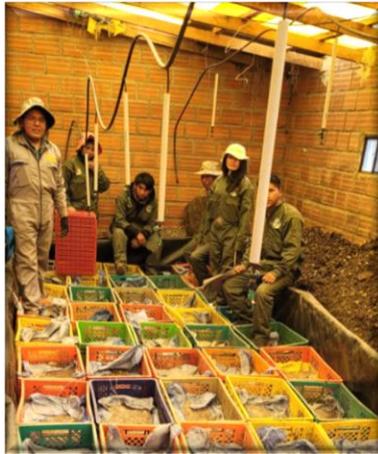
NE: No Establece

@: Insecticidas de importación prohibida, no obstante siguen en uso

***: Rio en crecida

Anexo 4. Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales incluido el lombrifiltro del Centro Experimental Kallutaca



Anexo 5. Rehabilitación del lombrifiltro**Anexo 6. Colocado y distribución del aserrín recolectado en el lombrifiltro****Anexo 7. Pesado de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*)**

Anexo 8. Inoculación de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*)



Anexo 9. Toma de datos físicos-químicos registrados in situ con el equipo multiparamétrico en el afluente y efluente



Anexo 10. Etiquetado y codificación de los envases para las muestras a analizar en el laboratorio



Anexo 11. Toma de las muestras en el afluente



Anexo 12. Toma de muestras en el efluente



Anexo 13. Color visual del agua residual del tratamiento mediante el lombrifiltro



Anexo 14. Traslado de las muestras al laboratorio de Calidad Ambiental LCA.



Anexo 15. Laboratorio de calidad ambiental (LCA), UMSA



Anexo 16. Informes de los análisis las muestras del Laboratorio de Calidad Ambiental (LCA) de la UMSA

Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ciencias Puras y Naturales
Instituto de Ecología
Laboratorio de Calidad Ambiental



Informe de Ensayo: A 106/23

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 106/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Estación Experimental Kallutaca
 Punto de muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Responsable del muestreo:
 Fecha de muestreo: 19 de septiembre de 2023
 Hora de muestreo: 09:00
 Fecha de recepción de la muestra: 19 de septiembre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 19 al 29 de septiembre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 106- 1
 Código original : A-BA-01

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BA-01 106- 1
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	44
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	2,4x10 ⁵
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	7,5x10 ³
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	2076
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	102
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	273
pH	EPA 150.1		1 - 14	8,0

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 04 de Octubre de 2023




 Ing. Jaime Chincheros Paniagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental

JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia



Informe de Ensayo: A 107/23

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 107/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Estación Experimental Kallutaca
 Punto de muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Responsable del muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Fecha de muestreo: 26 de septiembre de 2023
 Hora de muestreo: 08:00
 Fecha de recepción de la muestra: 26 de septiembre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 26 de septiembre al 06 de octubre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 107- 1
 Código original : A-BA-02

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BA-02 107- 1
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	32
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	2,8x10 ⁴
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	2,0x10 ³
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	1453
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	123
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	291
pH	EPA 150.1		1 - 14	8,3

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 06 de Octubre de 2023



JCH/LCA



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia



Informe de Ensayo: A 107/23

Página 2 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 107/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Estación Experimental Kallutaca
 Punto de muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Responsable del muestreo:
 Fecha de muestreo: 26 de septiembre de 2023
 Hora de muestreo: 08:00
 Fecha de recepción de la muestra: 26 de septiembre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 26 de septiembre al 06 de octubre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 107- 2
 Código original : A-BE-01

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BE-01 107- 2
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	35
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1,5x10 ⁴
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	7,5x10 ²
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	1550
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	92
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	289
pH	EPA 150.1		1 - 14	6,7

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 06 de Octubre de 2023




 Ing. Jaime Chincheros Paniagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



JCH/LCA

Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia



Informe de Ensayo: A 109/23

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 109/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Estación Experimental Kallutaca
 Punto de muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Responsable del muestreo:
 Fecha de muestreo: 3 de octubre de 2023
 Hora de muestreo: 08:00
 Fecha de recepción de la muestra: 3 de octubre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 3 al 12 de octubre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 109- 1
 Código original : A-BA-03

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BA-03 109- 1
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	40
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	2,1x10 ⁵
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1,1x10 ⁵
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	μS/cm	1,0	1783
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	180
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	316
pH	EPA 150.1		1 - 14	8,2

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 13 de Octubre de 2023



JCH/LCA



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia



INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 109/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Estación Experimental Kallutaca
 Responsable del muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Fecha de muestreo: 3 de octubre de 2023
 Hora de muestreo: 08:00
 Fecha de recepción de la muestra: 3 de octubre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 3 al 12 de octubre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 109- 2
 Código original : A-BE-02

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BE-02 109- 2
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	12
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1,5x10 ⁵
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	4,6x10 ⁴
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	1568
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	99
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	258
pH	EPA 150.1		1 - 14	6,5

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)

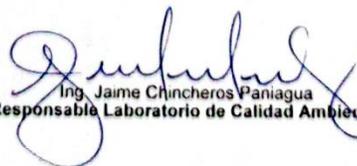
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.

La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 13 de Octubre de 2023




 Ing. Jaime Chincheros Paniagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



JCH/LCA



Informe de Ensayo: A 115/23

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 115/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Estación Experimental Kallutaca
 Responsable del muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Fecha de muestreo: 10 de octubre de 2023
 Hora de muestreo: 08:00
 Fecha de recepción de la muestra: 10 de octubre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 10 al 19 de octubre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 115-1
 Código original: A-BA-03

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BA-03 115-1
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	23
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2.0	$7,5 \times 10^5$
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2.0	$2,0 \times 10^4$
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	37
DQO	SM 5220-C	mg/l	5.0	287

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)
 EPA = Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)
 Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.
 La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 27 de Octubre de 2023





INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 115/23

Cliente: **INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA**
 Solicitante: **Cesar Marcelo Chino Rodrigo**
 Dirección del cliente: **Vella Adela - El Alto**
 Procedencia de la muestra: **Kallutaca**
 Provincia: **Los Andes**
 Departamento: **La Paz**
 Punto de muestreo: **Estación Experimental Kallutaca**
 Responsable del muestreo: **Cesar Marcelo Chino Rodrigo**
 Fecha de muestreo: **10 de octubre de 2023**
 Hora de muestreo: **08:00**
 Fecha de recepción de la muestra: **10 de octubre de 2023**
 Fecha de ejecución del ensayo: **Del 10 al 19 de octubre, 2023**
 Caracterización de la muestra: **Agua residual**
 Tipo de muestra: **Simple**
 Envase: **Botella pet**
 Código LCA: **115- 2**
 Código original : **A-BE-02**

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BE-02 115- 2
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	48
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	4,6x10 ⁴
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	< 2,0
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	20
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	215

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)

EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.

La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 27 de Octubre de 2023




 Ing. Jaime Chincheros Paniagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental





Informe de Ensayo: A 118/23

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 118/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Punto de muestreo: Estación Experimental Kallutaca
 Responsable del muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Fecha de muestreo: 18 de octubre de 2023
 Hora de muestreo: 08:00
 Fecha de recepción de la muestra: 18 de octubre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 18 al 27 de octubre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 118- 1
 Código original: A-BA-04

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Limite de determinación	A-BA-04 118- 1
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	39
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2.0	$1,1 \times 10^7$
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	$1,5 \times 10^5$
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	77
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	208

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)

EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.

La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 30 de Octubre de 2023



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia



Informe de Ensayo: A 118/23

Página 2 de 2

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 118/23

Cliente:	INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
Solicitante:	Cesar Marcelo Chino Rodrigo
Dirección del cliente:	Vella Adela - El Alto
Procedencia de la muestra:	Kallutaca
	Provincia: Los Andes
	Departamento: La Paz
Punto de muestreo:	Estación Experimental Kallutaca
Responsable del muestreo:	Cesar Marcelo Chino Rodrigo
Fecha de muestreo:	18 de octubre de 2023
Hora de muestreo:	08:00
Fecha de recepción de la muestra:	18 de octubre de 2023
Fecha de ejecución del ensayo:	Del 18 al 27 de octubre, 2023
Caracterización de la muestra:	Agua residual
Tipo de muestra:	Simple
Envase:	Botella pet
Código LCA:	118- 2
Código original :	A-BE-03

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BE-03 118- 2
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	12
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	$7,5 \times 10^4$
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	$2,8 \times 10^3$
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	11
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	194

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)

EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.

La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 30 de Octubre de 2023




Ing. Jaime Chincheros Paniagua
Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia



Informe de Ensayo: A 122/23

Página 1 de 1

INFORME DE ENSAYO EN AGUA RESIDUAL A 122/23

Cliente: INGENIERÍA AGRONÓMICA - UPEA
 Solicitante: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Dirección del cliente: Vella Adela - El Alto
 Procedencia de la muestra: Kallutaca
 Provincia: Los Andes
 Departamento: La Paz
 Estación Experimental Kallutaca
 Punto de muestreo: Cesar Marcelo Chino Rodrigo
 Responsable del muestreo:
 Fecha de muestreo: 25 de octubre de 2023
 Hora de muestreo: 08:00
 Fecha de recepción de la muestra: 25 de octubre de 2023
 Fecha de ejecución del ensayo: Del 25 de octubre al 8 de noviembre, 2023
 Caracterización de la muestra: Agua residual
 Tipo de muestra: Simple
 Envase: Botella pet
 Código LCA: 122- 1
 Código original : A-BE-04

Resultado de Análisis

Parámetro	Método	Unidad	Límite de determinación	A-BE-04 122- 1
pH	EPA 150.1		1 - 14	5.8
Conductividad eléctrica	EPA 120.1	µS/cm	1,0	1218
Aceites y grasas	EPA 413.1	mg/l	10	12
Coliformes totales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	1.5x10 ⁴
Coliformes fecales	SM 9221-E	NMP/100 ml	2,0	4.6x10 ³
DBO-5	EPA 405.1	mg/l	0,20	24
DQO	SM 5220-C	mg/l	5,0	187

SM = Standard Methods (For the Examination of Water and Wastewater)

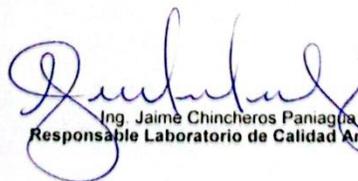
EPA= Environmental Protection Agency (Sampling and Analysis Methods)

Los resultados de este informe no deben ser modificados sin la autorización del LCA.

La difusión de los resultados debe ser en su integridad.

La Paz, 10 de Noviembre de 2023




 Ing. Jaime Chincheros Paniagua
 Responsable Laboratorio de Calidad Ambiental



Campus Universitario: Calle 27 de Cota Cota, La Paz, Telf/Fax: 2772522
 Casilla Correo Central 10077, La Paz - Bolivia