

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA

AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES



Tesis

**Eficiencia de la aplicación de un Sistema de Vermifiltro en el
tratamiento de aguas residuales provenientes del camal Cusco, Distrito
de San Jerónimo 2023**

Asesor:

Mag. Ambia Vasquez, Edy

Autores:

Ccorimanya Crispin, Jackeline Yadira

Elorrieta Fernandez, Patricia Marilya

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Cusco - Cusco - Perú

2024



ACTA DE SUSTENTACIÓN ORAL DE LA TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Modalidad de titulación: Presentación, Sustentación y Aprobación de Tesis Profesional.

En la ciudad del Cusco siendo las 08:30 horas del día 16 de setiembre del año dos mil veinticuatro, en concordancia con el Reglamento General de Grado Académico y Título de la Universidad Tecnológica de los Andes, y en mérito a la Resolución Sub Directoral N° RSD- 070 - 2024-UTEA-FIEPIARN-SD del 04 de julio del 2024, se realiza el acto académico de sustentación de la tesis, intitulada "EFICIENCIA DE LA APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE VERMIFILTRO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL CAMAL CUSCO, DISTRITO DE SAN JERÓNIMO 2023", presentado por las bachilleras señoritas CCORIMANYA CRISPIN JACKELINE YADIRA Y ELORRIETA FERNANDEZ PATRICIA MARILYA; como asesor del trabajo de investigación Mag. AMBIA VASQUEZ EDY.

Habiéndose nombrado al jurado con resolución Sub directoral RSD- 109 - 2024-UTEA-FIEPIARN-SD, que está conformada por los señores docentes:

- Presidente: Mag. Walter Florencio Choquevilca Lira
- Replicante: Ing. Gladys Allende Ramos
- Dictaminante: Mg. Helidia Hanco Loayza

El acto académico se realizó de la siguiente manera:

Primero: El docente secretario designado dio lectura de la resolución sub Directoral N° RSD- 109 - 2024-UTEA-FIEPIARN-SD, en el que se señala la fecha y hora y el jurado correspondiente para la sustentación de la tesis antes mencionada, así como los artículos 18 y 19 del Reglamento General de Grados Académicos y títulos de la Universidad Tecnológica de los Andes.

Segundo: Se procedió con la sustentación de las tesis señoritas bachilleres aspirantes al título de Ingenieros Ambientales y Recursos Naturales.

Tercero: Se procedió con las preguntas y repreguntas por parte del jurado calificador quienes en una ficha de observaciones hacen conocer por escrito sus apreciaciones y observaciones al trabajo de investigación (tesis).

Cuarto: El presidente del jurado invitó a las señoritas bachilleres y al público en general para que se sirvan desocupar el salón de grados para que el jurado dilucide las calificaciones y determine la nota calificadora de cada uno de los aspirantes al título profesional.

Quinto: Culminada con la calificación de parte de los señores integrantes del jurado se dio a conocer públicamente la nota obtenida por las señoritas bachilleres, la misma que fue de 16 Dieciséis puntos.

El presidente del jurado calificador hará llegar a los bachilleres las fichas de observaciones para que puedan levantar las observaciones en los plazos previstos.

Siendo las 10:00 horas se dio por concluido el acto de sustentación, firmando los señores integrantes del jurado, las señoritas bachilleras en señal de conformidad.

Mag. Walter Florencio Choquevilca Lira
Presidente

Ing. Gladys Allende Ramos
Replicante

Mag. Helidia Hanco Loayza
Dictaminante

Bach. Ccorimanya Crispin Jackeline Yadira

Bach. Elorrieta Fernandez Patricia Marilya

Eficiencia de la aplicación de un Sistema de Vermifiltro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Camal Cusco, Distrito de San Jerónimo 2023.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	20%	6%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	7%
2	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Tecnológica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
6	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.espam.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	dspace.pucesi.edu.ec Fuente de Internet	<1%

Metadatos

Datos del autor		
Apellidos y nombres	:	Ccorimanya Crispin, Jackeline Yadira
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	75826288
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0000-1332-0175
Apellidos y nombres	:	Elorrieta Fernandez, Patricia Marilya
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	70679635
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0008-5165-6380
Datos del Asesor		
Apellidos y Nombres	:	Mag. Ambia Vasquez, Edy
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	23934085
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0003-2872-0416
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de año en que Realizo la investigación	:	marzo 2023- abril 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	20%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.04

Dedicatoria

Este esfuerzo es un homenaje a Dios que ilumina nuestros caminos y a nuestras familias, cuya paciencia y apoyo inquebrantable han sido la fuerza impulsora que nos inspira a avanzar persistentemente en nuestras actividades profesionales. Por último, reconocemos a las personas cuyo profundo apoyo nos ayudan en nuestro viaje continuo por el camino de la vida.

Jackeline Yadira Ccorimanya Crispin y

Patricia Marilya Elorrieta Fernandez

Agradecimientos

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a Dios, por otorgarnos la bendición más valiosa. A nuestros padres, les agradecemos infinitamente su apoyo incondicional, sin el cual este proyecto no hubiera sido posible; este logro les pertenece también a ellos. Extendemos nuestro sincero reconocimiento a nuestra familia y amigos, quienes, a través de sus valiosas contribuciones e ideas, brindando constante apoyo y colaboración en todo momento.

Jackeline Yadira Ccorimanya Crispin y

Patricia Marilya Elorrieta Fernandez

Resumen

El Camal Municipal del Cusco es una entidad de administración pública, el cual tiene un inadecuado tratamiento para sus aguas residuales, enfrentando altas cargas contaminantes, requiriendo un tratamiento eficaz el cumplimiento de los estándares ambientales. El estudio tuvo como objetivo determinar la eficiencia del sistema de vermifiltro para reducir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) de las aguas residuales municipales del Cusco. La metodología implicó la instalación de doce reactores, cada uno compuesto por cuatro capas: humus con lombrices *Eisenia foetida*, aserrín, arena gruesa y grava natural. Las aguas residuales se filtraban a través de estos sistemas, dando como resultado aguas residuales tratadas. La eficiencia se evaluó analizando parámetros fisicoquímicos de afluente y efluente cada 24 horas durante 120 horas. La prueba central demostró una reducción del 86,84% en la DBO_5 , lo que indica una eficiencia del vermifiltro. Las condiciones óptimas fueron: caudal de 10 ml, tiempo de retención de 120 horas y 300 lombrices. Por otro lado, se recomienda incentivar la adecuada disposición final y manejo de las aguas residuales del Camal Municipal del Cusco, a través de una canalización a la red de alcantarillado para prevenir la descarga de estas aguas al cuerpo de agua natural. Se debe continuar realizando investigaciones sobre el tratamiento de aguas residuales de camales, ya que en la mayoría de sus componentes son orgánicos y podrían ser aprovechados.

Palabras claves: DBO_5 , vermifiltro, aguas residuales, eficiencia

Abstract

The Municipal Camal of Cusco is a public administration entity, which has inadequate treatment for its wastewater, facing high contaminant loads, requiring effective treatment to comply with environmental standards. The study aimed to determine the efficiency of the vermifilter system. to reduce the Biochemical Oxygen Demand (BOD₅) of the municipal wastewater of Cusco. The methodology involved the installation of twelve reactors, each composed of four layers: humus with *Eisenia foetida* worms, sawdust, coarse sand and natural gravel. Wastewater was filtered through these systems, resulting in treated wastewater. Efficiency was evaluated by analyzing physicochemical parameters of influent and effluent every 24 hours for 120 hours. The core test demonstrated an 86.84% reduction in BOD₅, indicating vermifilter efficiency. The optimal conditions were: flow rate of 10 ml, retention time of 120 hours and 300 worms. On the other hand, it is recommended to encourage the proper final disposal and management of wastewater from the Municipal Camal of Cusco, through channeling to the sewage network to prevent the discharge of these waters to the natural water body. Research should continue to be carried out on the treatment of raw wastewater, since most of its components are organic and could be used.

Keywords: BOD₅, vermifilter, wastewater, efficiency

Índice

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Resumen	vii
Abstract.....	viii
Índice	ix
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Índice de ecuaciones.....	xii
Acrónimos	xiii
I. Introducción.....	14
II. Planteamiento del Problema	17
2.1. Descripción y Formulación del Problema.....	17
2.2. Objetivos.....	20
2.2.1. <i>Objetivo General</i>	20
2.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	20
2.3. Justificación e Importancia	21
2.4. Hipótesis	22
2.5. Variables	24
III. Marco Teórico	26
3.1. Antecedentes	26
3.2. Bases Teóricas	35
3.3. Definición de Términos	57
IV. Metodología.....	61
4.1. Tipo y Nivel de Investigación.....	61
4.2. Ámbito Temporal y Espacial	62
4.3. Población y Muestra	63
4.4. Instrumentos.....	64
4.5. Procedimientos.....	65
V. Resultados y Discusión.....	94
VI. Conclusiones	102
VII. Recomendaciones	103
VIII. Referencias	104

Índice de tablas

Tabla 1 Cuadro de los camales de la región del Cusco	19
Tabla 2 Valores Máximos Admisibles	36
Tabla 3 Cuadro de análisis físico-químico del agua proveniente de los camales del Departamento de Cusco	46
Tabla 4 Validación de instrumentos	65
Tabla 5 Adaptación de la <i>Eisenia foetida</i>	72
Tabla 6 Determinación del caudal	76
Tabla 7 Tiempo de Retención Hidráulico.....	77
Tabla 8 Resumen del diseño 2^3	78
Tabla 9 Diseño factorial aleatorio	79
Tabla 10 Diseño factorial 2^3 y puntos centrales.....	81
Tabla 11 Diseño experimental.....	82
Tabla 12 Variables en escala natural y codificada con replicas en el centro.....	83
Tabla 13 Efectos de la interacción de las variables	86
Tabla 14 Análisis de la varianza para la aplicación del sistema vermifiltro.....	89
Tabla 15 Factores óptimos para el sistema vermifiltro.....	91
Tabla 16 Resultados de los parámetros físicoquímicos.....	94
Tabla 17 Determinación de la eficiencia del sistema vermifiltro.....	96
Tabla 18 Valores Máximos Admisibles	97
Tabla 19 Matriz de diseño y traspuesto de matriz.....	132
Tabla 20 Producto de las matrices $[X^T][X]$ $[X^T][X]^{-1}$	132
Tabla 21 Productos de las matrices $[X]^{-1}[X^T] * Y$	133
Tabla 22 Coeficiente de estimación para Y (respuesta)	134

Índice de figuras

Figura 1 <i>Camal Municipal del Cusco-Kayra</i>	37
Figura 2 <i>Aguas residuales vertidas a un cuerpo de agua</i>	38
Figura 3 <i>Aguas residuales del Camal Municipal del Cusco-Kayra</i>	40
Figura 4 <i>Esquema del sistema vermifiltro</i>	48
Figura 5 <i>Capas del vermifiltro</i>	50
Figura 6 <i>Lombriz roja californiana (Eisenia foetida)</i>	51
Figura 7 <i>Delimitación del ámbito espacial</i>	62
Figura 8 <i>Diagrama del proceso de investigación</i>	65
Figura 9 <i>Eisenia foetida</i>	66
Figura 10 <i>Aserrín de carpintería</i>	67
Figura 11 <i>Arena gruesa</i>	67
Figura 12 <i>Grava natural del río Vilcanota</i>	68
Figura 13 <i>Balde de plástico utilizado en la construcción del vermifiltro</i>	68
Figura 14 <i>Distribución de las capas del vermifiltro</i>	69
Figura 15 <i>Adaptación de la Eisenia foetida a las aguas residuales del camal durante 5 días</i>	72
Figura 16 <i>Instalación de las capas del sistema vermifiltro</i>	73
Figura 17 <i>Efluente de las aguas residuales del camal</i>	74
Figura 18 <i>Toma de muestra del agua residual del camal</i>	74
Figura 19 <i>Almacenamiento de las aguas residuales en los bidones</i>	77
Figura 20 <i>Representación geométrica de las variables en 23 puntos centrales</i>	85
Figura 21 <i>Efectos para la aplicación del sistema vermifiltro</i>	87
Figura 22 <i>Gráfica de optimización de las tres variables para el modelo matemático</i>	92
Figura 23 <i>Diagrama de Pareto estandarizado para la aplicación del sistema vermifiltro</i>	93
Figura 24 <i>Concentración de la DBO₅ aplicando el sistema vermifiltro</i>	97

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 <i>Ecuación para hallar la altura de capas</i>	49
Ecuación 2 <i>Ecuación para hallar el caudal</i>	54
Ecuación 3 <i>Ecuación para hallar el Tiempo de Retención Hidráulica</i>	54
Ecuación 4 <i>De Efectos Principales</i>	80
Ecuación 5 <i>Análisis de Interacciones</i>	80
Ecuación 6 <i>Interacción ABC</i>	80
Ecuación 7 <i>Coficiente de regresión</i>	90

Acrónimos

DBO	: Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	: Demanda Química de Oxígeno
STS	: Sólidos Totales en Suspensión
OD	: Oxígeno Disuelto
pH	: Potencial de Hidrógeno
VMA	: Valores Máximos Admisibles
ppm	: Partes por millón
GL	: Grados de Libertad
SC	: Suma de Cuadrados
MC	: Media de Cuadrados

I. Introducción

La gestión de aguas residuales plantea un desafío importante para muchas comunidades, particularmente cuando los métodos tradicionales resultan inadecuados o insostenibles. En este contexto, el sistema vermifiltro ofrece una alternativa ecológica y rentable. Este sistema aeróbico utiliza microorganismos y lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*) para reducir los contaminantes. La eficacia del vermifiltro está estrechamente ligada al mantenimiento de condiciones operativas específicas para evitar daños al sistema (Gamarra, 2021).

Este estudio evalúa la factibilidad de un vermifiltro para el tratamiento de efluentes del Camal Municipal del Cusco, que a la actualidad no cuenta con un sistema adecuado de manejo diario de efluentes. La investigación tiene como objetivo proporcionar una forma efectiva y sostenible de tratar la contaminación de aguas residuales en esta área, donde las altas cargas orgánicas en los efluentes plantean importantes riesgos ambientales.

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, se construyó y probó un vermifiltro, utilizando efluentes de aguas residuales del camal. La metodología implicó introducir el efluente en el vermifiltro, mantener condiciones operativas controladas y estimar la reducción de la DBO₅, un indicador clave de eficiencia.

Los resultados mostraron una notable reducción del 86,84 % en DBO₅, lo que demuestra la capacidad del vermifiltro para tratar eficazmente las aguas residuales del Camal Municipal del Cusco. Este hallazgo subraya los beneficios del vermifiltro para el tratamiento de aguas residuales, tanto en contextos similares por ende también una solución potencial para otros tipos de aguas residuales.

La estructura del trabajo está organizada en cinco capítulos:

Capítulo I: La gestión de aguas residuales es un desafío importante para muchas comunidades, y el sistema vermifiltro ofrece una alternativa ecológica y rentable para tratarlas.

Capítulo II: El presente estudio aborda la problemática de la gestión de aguas residuales en el Camal Municipal del Cusco, planteando el sistema de vermifiltro como una alternativa prometedora para su tratamiento eficaz.

Capítulo III: Este estudio presenta los antecedentes del desarrollo y aplicación del sistema vermifiltro, destacando su eficacia en la reducción de contaminantes. Además, se abordan los conceptos fundamentales necesarios para comprender esta investigación.

Capítulo IV: la metodología empleada para el diseño, construcción y evaluación experimental del sistema vermifiltro, utilizando efluentes provenientes del Camal Municipal del Cusco, con el fin de examinar la eficacia del vermifiltro para su tratamiento.

Capítulo V: Se exponen los hallazgos principales del estudio, enfatizando la significativa reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) lograda por el vermifiltro.

Capítulo VI: Se presentan las conclusiones de que el sistema vermifiltro redujo la DBO₅ en un 86.84% en aguas residuales del Camal Cusco, utilizando *Eisenia foetida*, donde

las variables más influyentes fueron tiempo (120 horas), caudal (10 ml/min) y cantidad de lombrices (300 unidades)

Capitulo VII: Es importante mantener condiciones óptimas del vermifiltro, además de continuar investigando el tratamiento de aguas residuales de camales, y considerar la aplicación de este sistema evaluando su expansión o integración con otras tecnologías.

II. Planteamiento del Problema

2.1. Descripción y Formulación del Problema

Con el rápido crecimiento de la población global, la necesidad de servicios de saneamiento se incrementa considerablemente en todo el planeta. La escasez de un tratamiento adecuado de aguas residuales ha evolucionado hacia una crisis global, ya que el vertido de aguas residuales, sin tratar a los cuerpos de aguas genera contaminación ambiental que propaga enfermedades que afectan al ser humano tanto directa como indirectamente.

El consumo global de agua está experimentando un incremento significativo, motivado por diversas causas interrelacionadas: La veloz expansión de las áreas urbanas en países en vías de desarrollo, el consecuente aumento exponencial de la población a escala planetaria, y la creciente concentración e intensificación de actividades industriales en los núcleos urbanos.

Esta utilización desproporcionada de diversas fuentes de agua está generando una contaminación generalizada, lo que resulta en una escasez de este recurso vital que todos los seres vivos necesitan para sustentar la vida.

En las regiones de América Latina y el Caribe, apenas entre el 30% y el 40% de las aguas residuales pasan por un tratamiento, lo que trae consigo consecuencias perjudiciales tanto para el bienestar humano como para el medio ambiente. Después de someterse a

procesos de tratamiento, las aguas residuales pueden utilizarse como sustituto de los recursos de agua dulce en aplicaciones como riego, operaciones industriales o actividades recreativas (Banco Mundial, 2020).

Estudios sobre tratamientos de aguas residuales en países como Costa Rica, han mostrado una eficiente reducción de los Sólidos Totales (ST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), a través del uso de agentes biológicos, sin embargo, la falta de un pretratamiento genera una deficiente reducción de contaminantes fisicoquímicos (Martinez, 2016).

En particular, el sector alimenticio es aquel que enfrenta los desafíos más persistentes en el tratamiento de sus efluentes, esto debido al crecimiento en la demanda de consumo de carnes. Este incremento en la producción y consumo de carne causa un principal problema de contaminación de las aguas, al realizarse la descarga directa a cuerpos de agua; dañando el ecosistema acuático (FAO, 2018)

En el Perú, la industria de la carne va en aumento, el 86% de la ganadería del país se encuentra en la sierra. La región del Cusco no es ajena a esto, ya que cuenta con 6 camales. De acuerdo a SENASA, 5 camales del Departamento del Cusco no cuentan con autorización para su funcionamiento, tal es el caso del Camal Municipal del Cusco; ubicado en el Distrito San Jerónimo, por lo que sus aguas residuales son vertidas directamente al río Huatanay sin previo tratamiento y sus residuos sólidos son arrojados a los botaderos de la ciudad. (SENASA, 2014)

“Los camales no cuentan con la infraestructura adecuada y necesaria para el procesamiento y manejo de sus residuos sólidos y líquidos, poniendo en riesgo la salud de la población del Departamento de Cusco” (Vergara, 2016). En la tabla 1, se puede observar los 6 camales de la Región del Cusco.

Tabla 1*Cuadro de los camales de la región del Cusco*

Número	Camal	Ubicación	Fecha de inicio de actividades	Administrado por	Autorización de funcionamiento por SENASA	Autorización por SENASA para el vertimiento de ART
1	Cusco-Kayra	Cusco-San Jerónimo	1956	Municipalidad provincial del Cusco	No	No
2	Cusco-San Jerónimo	Cusco-San Jerónimo	No hay fecha de inicio	Municipalidad distrital de San Jerónimo	No	No
3	Anta	Izcuchaca-Barrio Santa Rosa	No hay fecha de inicio	Municipalidad distrital de Izcuchaca	No	No
4	Sicuani	Canchis-Trapiche	No hay fecha de inicio	Municipalidad provincial de Canchis	No	No
5	Urubamba	Urubamba	1972	Municipalidad provincial de Urubamba	Si	No
6	Calca	Calca	No hay fecha de inicio	Municipalidad provincial de Calca	No	No

Fuente: Portal de SENASA

En respuesta a esta situación, resulta fundamental implementar diversas soluciones tecnológicas para el tratamiento de efluentes, con el propósito primordial de disminuir la carga contaminante en nuestro entorno y salvaguardar el bienestar de la población global. Para abordar la problemática derivada de la gestión inadecuada de las aguas residuales procedentes del Camal Municipal de Cusco, se plantea la implementación de un sistema de filtración biológica basado en lombrices, conocido como vermifiltro, para el procesamiento de dichos efluentes.

Problema General

- ¿Qué tan eficiente es la aplicación de un sistema de vermifiltro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Camal Cusco, Distrito de San Jerónimo 2023?

Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas de las aguas residuales provenientes del Camal Cusco, antes de la aplicación del sistema de vermifiltro?
- ¿Cuál es el mejor porcentaje de eficiencia de la materia orgánica biodegradable (DBO_5) de las aguas residuales provenientes del Camal Cusco aplicando el sistema vermifiltro?
- ¿Cuáles son los factores más eficientes en el proceso de aplicación del sistema vermifiltro?
- ¿Cuál es el mejor modelo matemático aplicado en el sistema vermifiltro?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

- Determinar la eficiencia de la aplicación de un sistema de vermifiltro en el tratamiento de aguas residuales proveniente del Camal Cusco, Distrito de San Jerónimo 2024.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características físico-químicas de las aguas residuales provenientes del Camal Cusco, antes de la aplicación del sistema de vermifiltro.
- Determinar el mejor porcentaje de eficiencia para la materia orgánica biodegradable (DBO_5) de las aguas residuales del Camal Cusco aplicando el sistema vermifiltro.
- Precisar los factores más eficientes en el proceso de aplicación del sistema vermifiltro.
- Determinar el mejor modelo matemático aplicado en el sistema vermifiltro.

2.3. Justificación e Importancia

Teórica

Se seleccionó este tema debido a la creciente preocupación acerca de la contaminación del agua y sobre la necesidad de soluciones sostenibles y eficientes. El sistema de vermifiltro surge como una estrategia prometedora para mejorar el tratamiento de aguas residuales. Nuestro estudio pretende contribuir a este campo analizando exhaustivamente su efectividad en el contexto camal cusqueño.

Esta investigación pretende expandir el actual conocimiento en relación al uso de vermifiltros y ofrecer nuevos conocimientos sobre su aplicabilidad para el tratamiento de aguas residuales en nuestra región. Hemos seleccionado este tema debido a que trata sobre la reducción de la contaminación y la protección de la salud de la población, proponiendo un enfoque innovador que podría sustentar futuros estudios regionales. Los hallazgos de esta investigación pueden informar la implementación de tecnologías similares en otros lugares y fomentar prácticas de gestión de aguas residuales más sostenibles.

Práctica

El objetivo de este estudio es mejorar la calidad del agua que es vertida a los cuerpos de agua mediante la implementación de un sistema de vermifiltro. Este tema fue elegido para abordar la necesidad de métodos eficaces de reducción de la contaminación y optimizar la degradación de la materia orgánica. Al emplear el sistema de vermifiltro, que utiliza lombrices para el tratamiento de aguas residuales, pretendemos mejorar la calidad del agua y proporcionar una solución práctica que las autoridades pertinentes puedan implementar en los canales de la región del Cusco. Esta investigación busca ofrecer nuevas perspectivas sobre la efectividad del vermifiltro en este contexto particular y contribuir a la conservación de los ecosistemas al disminuir el impacto ambiental del sector industrial.

Social

Nuestro estudio se centra en la disminución de materia orgánica biodegradable en las aguas residuales del Camal Municipal de Cusco a través del sistema vermifiltro. Este tema fue elegido por su capacidad para elevar el bienestar de las comunidades cercanas y disminuir la contaminación en el río Huatanay y afluentes. A través de la implementación de vermifiltro, se presenta un método novedoso de tratamiento de aguas residuales que beneficiará la población, al reducir la contaminación y al mismo tiempo ayudar en la conservación de la vida vegetal y animal. Esta iniciativa se esfuerza por cultivar una cultura centrada en la sostenibilidad mediante la promoción de prácticas que protegen tanto el entorno natural como la salud de la población.

Ambiental

El estudio presenta una solución innovadora para el tratamiento de aguas residuales del Camal Municipal de Cusco, por ende; el sistema vermifiltro. Con el objetivo de disminuir la contaminación ambiental, hoy en día perjudica a las comunidades aledañas y al ecosistema del río Huatanay. Al adoptar esta tecnología, se busca reducir el impacto ambiental de las aguas residuales, ofreciendo una solución que ayuda el medio ambiente y sirve como modelo para la gestión sostenible de efluentes en situaciones comparables. Esta investigación busca aportar nuevos conocimientos sobre el potencial del vermifiltro para mejorar la calidad ambiental y fomentar prácticas de gestión de residuos industriales más responsables.

2.4. Hipótesis

Hipótesis General

El uso del sistema vermifiltro tiene significancia en el tratamiento de aguas residuales proveniente del Camal Cusco, Distrito de San Jerónimo 2023.

Hipótesis Específicas

- Las características fisicoquímicas de las aguas residuales provenientes del Camal de Cusco no son adecuadas para su evacuación directa al medio ambiente debido a su alta carga contaminante.
- La eficiencia de reducción de la DBO_5 en las aguas residuales del Camal de Cusco presenta una reducción promedio efectiva cuando se utiliza el sistema vermifiltro.
- Los factores más eficientes en el proceso de aplicación del sistema vermifiltro incluyen un tiempo (120 horas), un caudal (10ml) y la cantidad de lombrices (300 unidades).
- El modelo matemático se ajusta al diseño factorial 2^3 , el cual relaciona de manera óptima las variables más influyentes en la aplicación del sistema vermifiltro.

2.5. Variables

Matriz de operacionalización “Eficiencia de la aplicación de un sistema de vermifiltro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Camal Cusco, Distrito de San Jerónimo 2023”								
Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad	Técnica	Método	Escala de medición
Independiente	Un sistema vermifiltro se define como un proceso de tratamiento de aguas residuales que utiliza lombrices y un sustrato filtrante para descomponer materia orgánica y purificar el agua. Este sistema se basa en la acción sinérgica de las lombrices y los microorganismos presentes en el	Operacionalmente, el sistema se configura en una unidad de tratamiento que incluye una cámara de filtración llena de sustrato, donde las lombrices procesan los residuos orgánicos, promoviendo la mineralización y la reducción de contaminantes. El flujo de agua a través del sustrato permite la	Tiempo de retención hidráulica (TRH) del vermifiltro	Tiempo	horas	Observacional experimental	Hipotético Deductivo	Razón/proporción
Sistema de vermifiltro			Cantidad de caída de flujo en el vermifiltro	Caudal	mL/min			

	sustrato para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua (Ramírez, 2017).	remoción de sólidos y contaminantes adicionales mediante filtración física y actividad biológica.	Cantidad de lombrices presente en el sistema vermifiltro	Número de lombrices	unidad		
Dependiente	Las aguas residuales de camal incluyen los efluentes líquidos resultantes de las actividades de sacrificio y procesamiento de animales en un matadero, y están compuestas por residuos orgánicos, sangre, grasas y sustancias químicas utilizadas en la limpieza (Ramírez, 2018).	Estas aguas residuales se definen como los líquidos que resultan de los procesos de sacrificio, limpieza de equipos, y manejo de los residuos orgánicos y biológicos derivados de los animales.	Eficiencia de reducción DBO_5	$\% \text{ reducción} = \frac{v_i - v_f}{V_i} \cdot DBO_5 \leq 100 \text{ (mg/L)}$	mg/L	Observacional experimental	
Aguas residuales de camal							

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

A nivel Internacional

Landeta (2019), Ibarra-Ecuador. En su estudio titulado “Evaluación de la eficiencia de un sistema de vermifiltros en el tratamiento de aguas residuales del Camal de Ibarra”. Tesis para optar el título profesional en Ingeniería en Ciencias Ambientales y Ecodesarrollo.

Dicha tesis tiene como objetivo general caracterizar la calidad del agua mediante análisis físico-químicos, tanto antes como después del tratamiento mediante vermifiltros. El enfoque metodológico implicó un investigación experimental y cuantitativa, empleando un diseño completamente aleatorio con una muestra de 6 unidades experimentales. Los hallazgos revelaron una disminución sustancial del 96,27% en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), junto con una eliminación del 64,01% de sólidos totales. Además, la eliminación de turbidez superó el 80% en ambas condiciones de tratamiento. En particular, hubo un aumento significativo en el contenido de materia orgánica, atribuible a la mayor eficiencia de degradación exhibida por las lombrices. El estudio concluyó que el agua tratada

con vermifiltros cumplía con los límites máximos permitidos, y la efectividad se puede atribuir a las notables capacidades de adsorción y absorción que poseen los vermifiltros.

Castillo & Chimbo (2021), Quito-Ecuador. Con su artículo científico “Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales” informan:

Sobre un estudio realizado en la Escuela Politécnica Superior Agropecuaria Manuel Félix López de Manabí, examinaron la efectividad de los vermifiltros para eliminar la materia orgánica. El sistema de filtración constaba de cuatro capas: aserrín con lombrices *Eisenia foetida*, carbón activado, grava y piedras de río. Las mediciones iniciales revelaron altas concentraciones de DBO y DQO en el afluente. Después del tratamiento, la investigación mostró una reducción promedio de la DBO del 52,25% Y DQO del 66.74%, concluyendo que la vermifiltración basada en *Eisenia foetida* es un método ecológico, innovador y rentable para la eliminación de materia orgánica, que ofrece eficiencia y beneficios ambientales.

Largo (2022), Manizales-Colombia. En su investigación de tesis “Revisión sistemática de parámetros de diseño y operación de vermifiltros a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales domésticas”

El objetivo principal de este estudio fue realizar una revisión sistemática del diseño y los parámetros operativos para el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante vermifiltros a escala laboratorio. La metodología implicó examinar 40 estudios relacionados con la vermifiltración y sus componentes. A partir de los artículos analizados, el investigador construyó un reactor a escala de

laboratorio basado en los parámetros, la cinética y los medios más utilizados identificados en la literatura. El estudio concluyó que la vermifiltración es una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales tanto industriales como domésticas, debido a sus beneficios ambientales y bajos costos de mantenimiento e instalación.

Bravo (2019), Concepción-Chile en su tesis titulada “Diseño y evaluación del uso de lombrifiltro como alternativa al tratamiento de líquidos industriales en el proceso de producción de carragenina”, informa:

Esta investigación se centró en diseñar un sistema de vermifiltro a escala de laboratorio para reducir la DBO y DQO en residuos líquidos industriales de la producción de carragenina. El experimento implicó dos pruebas de laboratorio utilizando un filtro de lombrices con cuatro capas: varios tipos de grava, arena y una capa superior de abono, aserrín y tierra que alberga a las lombrices. Los resultados mostraron reducciones de DBO₅ del 77% y 60%, y reducciones de DQO del 78% y 58% en las dos pruebas. El investigador identificó la temperatura, la humedad y el pH como las variables más cruciales para el funcionamiento del vermifiltro. El estudio demostró niveles reducidos de DBO₅, DQO, aceites y grasas, sólidos suspendidos totales y turbidez en residuos líquidos industriales diluidos y sin diluir a escala de laboratorio.

Rojas (2020), Viña del Mar-Chile. En su investigación de tesis titulada “Estudio de filtros biológicos para aguas grises utilizando lombriz rojas californianas (*Eisenia foetida*)” Investigación de tesis para optar al Título de Técnico Universitario en control del medio ambiente.

Como objetivo propone un filtro biológico que cumpla con las condiciones óptimas para la lombriz *Eisenia foetida* para adquirir agua apta para riego. Como parte de la metodología, el autor utiliza la caracterización de las aguas residuales con parámetros físico-químicos y microbiológicos y también analizó el ciclo de vida de la *Eisenia foetida*. Con toda la información recolectada propone como resultado un filtro biológico que es el sistema Tohá. El agua resultante del proceso de tratamiento sufre la eliminación de parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Sólidos Totales (ST), aceites, grasas, nitrógeno, fósforo y coliformes. En consecuencia, ella concluye que el efluente obtenido es apto para riego procedente del tratamiento de aguas grises, cumpliendo la normativa vigente. Este enfoque proporciona una solución alternativa para abordar los desafíos de escasez de agua que enfrenta su país.

A nivel Nacional

Aldoradin & Quispe (2023), Callao-Lima. Con su investigación para optar el título profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, denominada “Eficiencia del acoplamiento Wetland y Tohá en el tratamiento de las aguas residuales vertidas al canal Huanca, San Luis, Cañete 2023”

El objetivo principal de esta tesis es determinar el nivel de eficiencia obtenido al acoplar un sistema Wetland con un sistema de Tohá para el tratamiento de aguas residuales. El enfoque metodológico utilizado fue una investigación aplicada de orientación cuantitativa y nivel explicativo, ya que el objetivo era medir el resultado de la variable dependiente, que fue el proceso de tratamiento que involucra la combinación de los sistemas Wetland y Tohá. Para ello, se analizaron las concentraciones de parámetros físicos, químicos y biológicos establecidos. Los resultados mostraron un porcentaje de remoción promedio del 58.94%, lo que

indica que el acoplamiento de los sistemas Wetland y Tohá demostró un desempeño moderadamente eficiente en el tratamiento de aguas residuales. Se concluyó que los efluentes tratados mediante esta combinación de sistemas presentaron una reducción significativa, logrando una eficiencia máxima de remoción del 69% tanto para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) como para la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Amazonas, Romero & Campos (2022), Bagua-Amazonas. En su estudio científico titulado “Eficiencia del Sistema Tohá en la depuración de efluentes del Camal Municipal, Bagua, Amazonas, 2021”, los autores dan a conocer:

Como objetivo evaluar la efectividad del Sistema Tohá en el tratamiento de aguas residuales del Matadero Municipal en la ciudad de Bagua. Su investigación cuantitativa siguió un diseño pre-experimental, utilizando una muestra de 281 litros de aguas residuales de la instalación Municipal. Los hallazgos revelaron que la especie de lombriz roja californiana demostró una mayor capacidad de eliminación de contaminantes, con un promedio del 27%, en comparación con la lombriz de tierra, que logró una reducción del 13%. Además, el Sistema Tohá redujo efectivamente los sólidos en suspensión en un 26,73%, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) en un 42,56%, los aceites y grasas en un 27,89% y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 13,55%. Los autores concluyeron que *Eisenia foetida* demostró ser la especie más eficiente para reducir los contaminantes presentes en las aguas residuales de los mataderos.

Bermudez (2019), Chimbote. Su tesis denominada “Tratamiento de aguas residuales del Camal Municipal de Chimbote, usando un biofiltro de lombrices, para el riego de parques y jardines”. Tesis de investigación para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

Su objetivo principal fue construir y evidenciar la eficiencia de un biofiltro y la combinación de lombrices (*Eisenia foetida*), aserrín y gravas para la mitigación de contaminantes en el agua residual del camal municipal. Su tipo de investigación fue aplicada ya que buscó disminuir los niveles de los parámetros físico-químicos; con un nivel experimental usando el biofiltro. El autor obtuvo resultados positivos, debido a que la Demanda Biológica de Oxígeno evidenció una remoción en un 81.36% y para la Demanda Química de Oxígeno la efectividad fue en un 80.82%, teniendo así una efectividad total del equipo de biofiltro mayor al 50%.

Fernández, Ordoñez, & Santos (2022), Huaral-Lima. Con su investigación de tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental y Recursos Naturales, denominada "Tratamiento con lombrifiltro para la reducción de DQO y DBO_5 del efluente industrial de una planta de confitería 2022"

Este estudio tiene como objetivo evaluar la efectividad del tratamiento de lombrifiltro para disminuir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y Niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas residuales industriales de una planta de confitería ubicada en el Distrito de Chancay. Su enfoque metodológico involucra una investigación aplicada con enfoque cuantitativo y nivel explicativo, ya que se implementó el tratamiento de lombrifiltro para medir su impacto en las variables dependientes (reducción de DQO y DBO_5). Los investigadores evaluaron las concentraciones de DBO_5 y DQO mediante la realización de 24 pruebas de análisis, midiendo los niveles en mg/l para cada parámetro. Los resultados demostraron reducciones notables, con una reducción de hasta el 97% en DQO y una reducción del 96% en DBO_5 cuando el tiempo de retención hidráulica (TRH) se estableció en 24 horas.

Gamarra (2021), Sapallanga-Huancayo. En su investigación de tesis titulada “Eficiencia del sistema de vermifiltro en la depuración de contaminantes críticos de aguas residuales domésticas en la comunidad La Punta-Sapallanga”. Investigación de tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, menciona lo siguiente:

La investigación tiene como objetivo determinar la eficiencia del sistema vermifiltrante en la purificación de contaminantes críticos de aguas residuales domésticas. El enfoque metodológico fue una investigación cuantitativa aplicada de tipo experimental inductivo, con una muestra aleatoria simple representada por 200 litros de agua residual cruda. Los instrumentos utilizados para presentar los resultados fueron una “ficha de muestreo” y una cadena de custodia de la calidad del agua. El resultado final demostró una tasa de eliminación del 96,1% para los sólidos totales en suspensión (STS) y del 96,7% para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en los tres tratamientos. La conclusión a la que se llegó fue que el sistema de vermifiltro es altamente eficiente para reducir los contaminantes críticos presentes en las aguas residuales domésticas.

A nivel Regional y Local

Arana (2022), Cusco. Con su tesis titula “Influencia del lombrifiltro en la remoción de la DBO_5 y DQO de las aguas residuales domésticas para zonas rurales de la Provincia de Cusco, Departamento Cusco”

Esta tesis tuvo como objetivo evaluar el impacto del vermifiltro en la eliminación de DBO_5 y DQO de aguas residuales domésticas en la provincia rural de Cusco. El estudio empleó un diseño experimental de 2^2 , centrándose en el flujo y la temperatura. El vermifiltro constaba de cuatro capas filtrantes: 15 cm de piedra de río triturada, 25 cm de grava, 25 cm de carbón de madera y 25 cm de aserrín que albergaban 200 *Eisenia foetida*. Los resultados mostraron que el vermifiltro logró

una eliminación de DBO_5 del 73,36 % y una eliminación de DQO del 84,37 % de las aguas residuales domésticas. La investigación concluyó que un caudal de 50 ml/min eliminaba con mayor eficacia la DBO_5 y la DQO, mientras que las variaciones de temperatura diurnas y nocturnas tenían un impacto mínimo en la eliminación de estos parámetros.

Umasi (2020), Cusipata-Cusco. En su estudio de tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, lleva el nombre de “Evaluación de la eficiencia de un lombrifiltro (tres capas) para el tratamiento de aguas residuales domesticas en el Distrito de Cusipata, Cusco”

La investigación tiene el objetivo principal de evaluar la eficiencia de un vermifiltro de tres capas que emplea la especie *Eisenia foetida* para eliminar contaminantes de aguas residuales domésticas en el Distrito de Cusipata-Cusco. El estudio adoptó un enfoque de investigación cuantitativa con un diseño experimental, ya que se manipularon las variables de estudio, específicamente los parámetros de las aguas residuales. Los resultados demostraron una reducción en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en un 88%, en cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en un 86%. La conclusión a la que se llegó fue que la especie *Eisenia foetida* los valores de los parámetros a niveles aceptables para el riego restringido y libre de vegetales, así como para el agua potable de los animales.

Cartagena (2020), Cusco. Con su tesis “Efectividad de la *Eisenia foetida* en el tratamiento de aguas residuales en el Distrito de San Sebastián, provincia y región del Cusco, 2020”. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, informa lo siguiente:

El objetivo principal de este estudio fue determinar la eficiencia de *Eisenia foetida* (lombriz roja) en el tratamiento de aguas residuales de la ciudad del Cusco. La investigación empleó un enfoque cuantitativo con nivel evaluativo-descriptivo. La metodología implicó la adaptación de *Eisenia foetida* durante un período de 7 días utilizando muestras de agua del río Huatanay, seguido de la inoculación de un vermifiltro. Se utilizó un estanque de vidrio, con los siguientes estratos: 1ª capa - *Eisenia foetida* con sustrato y aserrín, 2ª capa - 80% malla Raschel, 3ª capa - arena fina y gruesa, 4ª capa - agregados de 3,5 a 5 cm, y 5ª capa - capa - agregados de 6 a 7,5 cm. El sistema fue alimentado por un tanque de 90 litros. Los resultados indicaron una concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) de 29,84 mg/l, lo que representa una reducción del 63,77% durante el proceso de tratamiento. Además, el valor de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) fue de 73,5 mg/l, demostrando la efectividad del sistema con una reducción del 60,45%. La conclusión a la que se llegó fue que los parámetros disminuyeron en concentración luego de emplear el tratamiento vermifiltrador.

Riveros (2021), Calca-Cusco. En su estudio para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, titulado “Eficiencia del sistema Tohá y canal de fitodepuración en la reducción de la DBO_5 , DQO y SST de aguas residuales provenientes del Camal Municipal de la Provincia de Calca-Cusco 2021”

El objetivo fue determinar la eficiencia de la combinación de un sistema que comprende un sistema de canal de fitopurificación y el sistema Tohá. El estudio fue de carácter aplicado, empleando un diseño experimental en bloques completamente al azar. La metodología implicó la utilización de 4 lechos filtrantes: lombriz *Eisenia foetida*, grava, antracita y piedra de río, todos tratando

las aguas del Camal Municipal de la Provincia de Calca - Cusco. Los resultados demostraron la eficiencia del sistema Tohá y canal de fitopurificación, exhibiendo una reducción del 94,46% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), del 93,39% en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y del 91,50% en Sólidos Suspendidos Totales (SST). El sistema combinado demostró ser más eficaz, logrando mayores reducciones cuando se emplean en conjunto.

3.2. Bases Teóricas

Base Legal

El Decreto Supremo N°010-2019-Vivienda, que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, establece los límites permisibles para las concentraciones de contaminantes en las aguas residuales provenientes de actividades industriales, comerciales y otras fuentes no residenciales. Este reglamento tiene como objetivo proteger la calidad del agua en el sistema de alcantarillado y prevenir impactos negativos en las plantas de tratamiento de aguas residuales y en el medio ambiente. Los VMA definen parámetros específicos, como la concentración de metales pesados, sólidos suspendidos, aceites y grasas, entre otros, que las empresas y entidades deben cumplir para garantizar el manejo adecuado y seguro de sus efluentes. El cumplimiento de estos valores máximos admisibles es esencial para asegurar la sostenibilidad del sistema de alcantarillado y minimizar los riesgos de contaminación y daños ecológicos. (Ministerio de Vivienda, 2013)

Tabla 2*Valores Máximos Admisibles*

Parámetro	Unidad	Simbología	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SST	500
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	100

Fuente: Decreto Supremo N°010-2019-Vivienda

Camal o Matadero

El término camal o matadero se refiere a las instalaciones donde se sacrifican y procesan animales destinados al consumo humano. Estos establecimientos están sujetos a monitoreo sanitario constante para salvaguardar la salud pública. Los mataderos cuentan con instalaciones completas diseñadas para permitir el sacrificio adecuado y eficiente de los animales, Su infraestructura está diseñada para facilitar el proceso de sacrificio y al mismo tiempo cumplir con los estándares y protocolos apropiados. (Bobenrieth, Beltran, & Arenas, 1985)

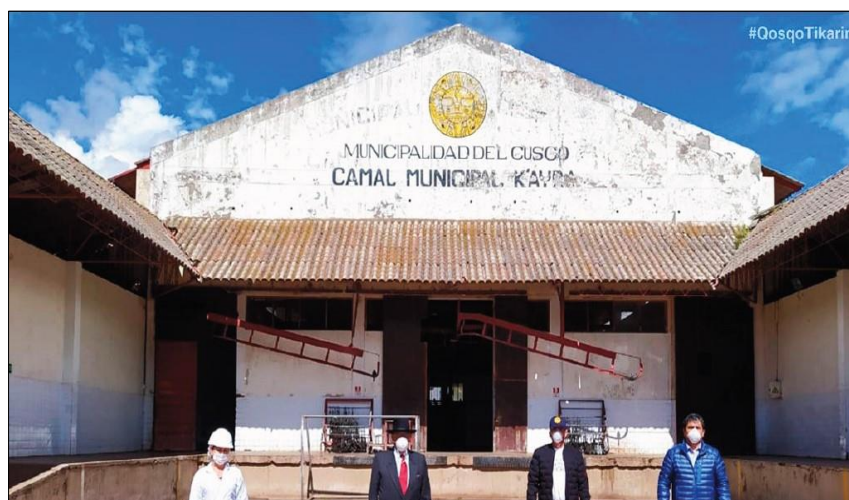
Camal Municipal

Bajo la administración pública municipal, los mataderos cumplen la función crítica de controlar y garantizar los estándares de higiene de los productos cárnicos. Su función principal consiste en realizar el sacrificio de animales y el acondicionamiento de las carnes, así como prestar servicios complementarios relacionados con el procesamiento de carne a los carniceros, por los que se cobra una tarifa fija. Estas instalaciones municipales frecuentemente están subsidiadas a través de fuentes de ingresos locales, ya que no tienen la capacidad para llevar a cabo plenamente las operaciones adicionales para

las que están diseñados los mataderos privados y comerciales. Su propósito se centra en las actividades centrales de matanza más que en las operaciones ampliadas de sus contrapartes privadas. (FAO, 1993). Como se observa en la figura 1.

Figura 1

Camal Municipal del Cusco-Kayra



Nota: Diario Sol del Cusco

Aguas Residuales

Como se observa en la figura 2, las aguas residuales son aquellas en las que sus propiedades iniciales han sido alteradas por la actividad humana y que, por su calidad comprometida, requieren de un tratamiento previo antes de ser aptas para su reutilización, vertido a cuerpos de agua naturales o liberación a sistemas de alcantarillado, según (OEFA, 2014).

Figura 2

Aguas residuales vertidas a un cuerpo de agua



Nota: Google Imágenes

Tipos de Aguas Residuales

Aguas residuales domésticas. “Estas aguas residuales provienen de fuentes residenciales y comerciales y contienen desechos fisiológicos y otros subproductos derivados de las actividades humanas. La gestión y el tratamiento adecuados de estas aguas residuales son fundamentales antes de su eliminación o reutilización”. (OEFA, 2014)

Aguas residuales industriales. Los procesos de fabricación que operan a gran escala producen aguas residuales industriales. Esto se refiere al agua que ha sido alterada por cualquier actividad de producción, procesamiento o manipulación. Estas aguas residuales pueden provenir de diversos sectores, incluidas las operaciones mineras, las prácticas agrícolas, la producción de energía, los procesos agroindustriales y otras industrias relacionadas, de acuerdo con (OEFA, 2014)

Los efluentes industriales suelen presentar temperaturas elevadas y un contenido mínimo de oxígeno disuelto. Antes de verterse en cuerpos de agua naturales, estas aguas residuales requieren un procesamiento preliminar. Este tratamiento tiene como objetivo aumentar los niveles de oxígeno y bajar la temperatura, minimizando así los efectos negativos sobre los ecosistemas naturales circundantes, esto según la investigación de (Arana, 2022)

Aguas residuales municipales. Conforme indica UNESCO, (2015) “Las aguas residuales municipales se definen como las aquellas que son generadas a partir de una combinación de fuentes industriales, comerciales y residenciales dentro de un área o comunidad específica”.

Aguas residuales de camales. La figura 3 muestra un color único de las aguas residuales de los camales, ya que suelen generar desechos característicos como sangre, grasa, pelo, huesos, estiércol y otros contaminantes, producto del sacrificio y procesamiento de animales. La composición del efluente vertido de estas instalaciones depende invariablemente de los procesos de producción específicos empleados y de la naturaleza de las medidas de pretratamiento emprendidas (Landeta, 2019).

Figura 3*Aguas residuales del Camal Municipal del Cusco-Kayra*

Nota: Elaboración propia

Características de Aguas Residuales de Camales

Según Osorio, la caracterización de aguas residuales implica evaluar parámetros que indican el grado de contaminación a través de niveles de concentración. Si la concentración excede los límites permisibles para un parámetro determinado, se hace necesario el tratamiento”. (Osorio, 2021)

De acuerdo a Landeta, para poder caracterizar de forma integral el efluente de un camal, es crucial analizar parámetros como DBO_5 , DQO, los sólidos suspendidos (SS), los aceites y grasas, el nitrógeno total, la turbiedad, el color, el olor, pH, temperatura y caudal. Estos parámetros proporcionan información sobre la naturaleza y el alcance de la contaminación presente en las aguas residuales. (Landeta, 2019)

El alto contenido de contaminantes de estas aguas residuales requiere un tratamiento especializado antes de su disposición final para mitigar el impacto al ambiente y salvaguardar la salud pública. El tratamiento generalmente implica una combinación de

procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar contaminantes y garantizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. (Bobenrieth et al.,1985).

Características Físicas de las Aguas Residuales de Camales

Partículas Sólidas. “En términos generales, los sólidos se caracterizan como la materia residual que persiste después de que una muestra de agua ha pasado por un proceso de evaporación a una temperatura que oscila entre (103 - 105 °C) y (217,4 - 221°F)”. (Bermudez, 2019)

Sólidos Totales (ST). Los sólidos se describen como la cantidad total de materia que permanece como residuo tras someter una muestra de agua a un proceso de evaporación a temperaturas de 103-105 °C (217,4-221 °F). El concepto de "sólidos" no incluye la materia que se pierde durante la evaporación, ya que esta tiene una alta presión de vapor.

“Los sólidos totales se pueden clasificar según su estado físico en sólidos sedimentables, suspendidos y disueltos. Además, se pueden clasificar según sus características químicas en sólidos fijos (inorgánicos) y volátiles (orgánicos)”. (Bermudez, 2019)

Sólidos Sedimentables (Ss). Los sólidos sedimentables se refieren a los sólidos (aproximadamente mayores de 10-2 mm o 0,01 cm) que se acumulan en la base de un envase, formando un sedimento en forma de cono. Este recipiente se conoce como cono de Imhoff y puede construirse con vidrio o material plástico rígido. Para medir los sólidos sedimentables, se coloca un litro de muestra de agua dulce en el cono Imhoff y se deja sedimentar sin perturbaciones durante un período de 60 minutos. (Bermudez, 2019)

Sólidos Suspendidos (Ss). Según la definición, los sólidos suspendidos se refieren a la porción de sólidos que queda retenida en un filtro y que luego permanece

como residuo después de ser sometida a evaporación a temperaturas entre 103-105°C (217,4-221°F). Estos sólidos, con un tamaño superior a 10^{-3} mm (0,001 mm), pueden separarse del agua mediante métodos físicos o mecánicos, como procesos de filtración. Aproximadamente, los sólidos suspendidos están compuestos por un 70% de sólidos orgánicos y un 30% de sólidos inorgánicos. (Bermudez, 2019)

Sólidos Disueltos (SD). Por definición, los sólidos disueltos son la fracción de sólidos que no se retienen en un filtro y que quedan como residuo tras ser sometidos a evaporación a temperaturas de 103-105°C (217,4-221°F). La medición de este parámetro permite estimar el contenido de sales disueltas en la muestra. Los sólidos disueltos incluyen tanto sólidos en estado coloidal como disuelto, siendo la fracción coloidal compuesta por partículas que varían en tamaño de 10^{-3} a 10^{-6} mm (0,001 a 0,000001 mm). En cuanto a su composición, los sólidos disueltos contienen aproximadamente un 40% de materia orgánica y un 60% de materia inorgánica. (Bermudez, 2019)

Temperatura. Esta se establece mediante la absorción de radiación en la capa líquida superior. Este parámetro es de vital importancia en el sistema vermifiltrante debido a que un cambio brusco podría afectar directamente a la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). (Gamarra, 2021)

Color. “La cloración indica la descomposición y concentración de los residuos del agua, proporcionando una indicación de la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual”. (Gamarra, 2021)

Olor. “Las aguas residuales recién vertidas son prácticamente inodoras. Sin embargo, a medida que se descompone, pueden surgir diversos olores desagradables, como ácido sulfúrico, mercaptanos (que recuerdan al olor del repollo en putrefacción), amoníaco y aminas (olor a pescado)”. (Bermudez, 2019)

Turbidez. “La turbiedad en las aguas residuales resulta de la presencia de partículas suspendidas de pequeño tamaño, como limo y arcilla. Cuanto mayor sea la turbidez, mayor será el nivel de contaminación del agua”. (Bermudez, 2019)

Características Químicas de las Aguas Residuales de Camales

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). La DBO₅ es la medida de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable en presencia de oxígeno. Es el factor más esencial para valorar la calidad de las aguas residuales y de superficie. La DBO₅ se emplea para calcular la cantidad de oxígeno necesaria para la descomposición biológica de la materia orgánica presente en el agua, planificar sistemas de tratamiento biológico, medir la efectividad de los procesos de tratamiento y fijar los niveles aceptables de carga orgánica en los cuerpos de agua receptores. Generalmente, se utiliza un plazo de incubación de 5 días para medir la DBO. Esta prueba opera bajo la premisa de que toda la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de agua sufrirá oxidación a dióxido de carbono y agua por microorganismos que utilizan oxígeno molecular. (Quiroz, 2019)

Demanda Química de Oxígeno (DQO). “Según Gamarra, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química de la materia orgánica, expresada en mg/L (ppm). Este parámetro es generalmente superior a la DBO₅, ya que una mayor cantidad de compuestos pueden sufrir oxidación química”. (Gamarra, 2021)

Este procedimiento cuantifica el oxígeno equivalente necesario para oxidar la materia orgánica químicamente mediante el uso de un potente agente oxidante. Una de sus principales ventajas es el breve tiempo que requiere el análisis, lo que permite obtener

resultados rápidos. Además, este método puede proporcionar información sobre la toxicidad de la muestra. (Caicedo, 2017)

pH. El pH es una medida de la intensidad de la acidez o alcalinidad de una solución. Las aguas residuales domésticas generalmente presentan un rango de pH entre 6,5 y 8,5; si el pH se encuentra fuera de este rango, la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) comienza a morir. Por esta razón, es fundamental controlar el pH antes de utilizar el sistema de vermifiltro para el tratamiento de aguas residuales, ya que un pH adecuado es crucial para mantener vivas a las lombrices, que desempeñan un papel clave en el proceso de depuración. (Gamarra, 2021)

Conductividad eléctrica. “La conductividad es un parámetro que ayuda a determinar la concentración de sustancias con carga iónica disuelta en el agua, y que tiene la capacidad de transferir una corriente eléctrica”. (Coronel, 2015)

Sulfatos. “Las sales de sulfato se originan a partir de insumos químicos que contienen iones sulfato y sulfato de sodio en forma de polvo. Estas sales se utilizan como reactivos de estandarización o "sales muertas" en diversas aplicaciones”. (Landeta, 2019).

Fosfatos. El fósforo es un elemento crucial a la hora de la proliferación de determinados organismos biológicos. Una presencia abundante de fósforo estimulará el crecimiento excesivo de organismos fotosintéticos, lo que conducirá a un proceso conocido como eutrofización, que puede afectar negativamente a la calidad del agua. (Landeta, 2019)

Características Fisicoquímicas de Aguas Residuales de los Camales del Departamento del Cusco

En la Tabla 3 se puede apreciar que las aguas de los camales en el Departamento de Cusco presentan turbidez. En cuanto al pH, el agua de la mayoría se encuentra dentro de un rango aceptable, salvo las aguas del Camal San Jerónimo, que son altamente ácidas y tienen niveles más bajos de carbonatos. Respecto al contenido de cloruros, las aguas de los camales de San Jerónimo y Calca superan a las demás, acercándose a los valores límite. En términos de conductividad, las aguas más adecuadas provienen del Camal San Jerónimo de Calca, seguido por el Camal de Urubamba y el Camal Kayra. En relación con los sólidos totales, sulfatos y bicarbonatos, únicamente el agua de San Jerónimo cumple con las normativas. En cuanto al contenido de calcio, todas las aguas son consideradas satisfactorias. (Vergara, 2016)

Tabla 3

Cuadro de análisis físico-químico del agua proveniente de los camales del Departamento de Cusco

Parámetros Físicoquímicos	Unidad	Valores normales para aguas potabilizadas (Cloración) Consumo/humano	Kayra	San Jerónimo	Sicuani	Anta	Urubamba	Calca
Turbiedad	Und.	Hasta 5	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
ph	Unid. pH	6.5-8.5	6.6	5.0	6.4	6.6	6.6	6.38
Dureza CaCo ₃	mg/L	Hasta 500	756.60 ppm	445.8 ppm	1277.5 ppm	1198.4 ppm	577.72 ppm	620.4 ppm
Cloruros	mg/L	Hasta 250	236.30 ppm	89.7 ppm	3446.3 ppm	3188.9 ppm	352.90 ppm	121.8 ppm
Conductividad	µs/cm	Hasta 1500	1455 us/cm	675 us/cm	4740 us/cm	4280 us/cm	1111 us/cm	940 us/cm
T. de sólidos disueltos	mg/L	Hasta 1000	1580.00 ppm	776.3 ppm	4844.6 ppm	4391.8 ppm	1233.90 ppm	1094.30 ppm
Sulfatos	mg/L	Hasta 250	375.60 ppm	236.5 ppm	374.9 ppm	336.4 ppm	340.80 ppm	296.8 ppm
Bicarbonatos	mg/L	-	477.90 ppm	194.3 ppm	228.4 ppm	210.3 ppm	192.30 ppm	188.10 ppm

Fuente: Tesis titulada "Eficiencia Técnica en los servicios de los camales del Departamento del Cusco 2016"

Tratamiento de Aguas Residuales

El desarrollo de tecnologías y estrategias para eliminar contaminantes presentes en aguas residuales surge por la importancia de proteger la salud colectiva y mitigar los impactos adversos de los contaminantes liberados al entorno natural. La disminución de contaminantes en las aguas residuales puede lograrse a través de operaciones unitarias físicas, procesos químicos y procesos biológicos. (Metcalf & Eddy, INC., 1995)

Sistema Vermifiltro

El sistema Tohá o vermifiltro es un método de tratamiento biológico aeróbico de aguas residuales que se sirve de la tecnología de lombrices (*Eisenia foetida*). Fue desarrollado por el Dr. José Tohá de la Universidad de Chile en 1992. Debido a su estructura física única, este sistema demuestra alta eficiencia en la eliminación de contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas residuales. (Gamarra, 2021)

La *Eisenia foetida*, tiene propiedades físicas y estructurales permiten una eliminación altamente eficiente de materia orgánica y patógenos. El vermifiltro está constituido por cuatro capas o lechos de diversos materiales, por donde fluye el agua residual. La capa superior está formada por sustrato orgánico que alberga una gran población de microorganismos y lombrices. A medida que las aguas residuales pasan a través de este lecho filtrante, los organismos absorben y digieren la materia orgánica, eliminando eficazmente los residuos sólidos patógenos presentes en las aguas residuales. (Ramon et al., 2015)

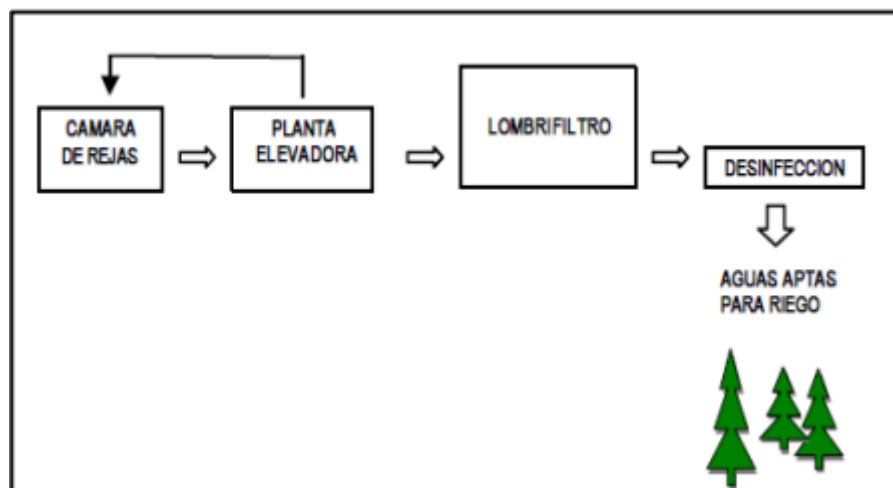
El sistema vermifiltro es una tecnología emergente para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. Fue desarrollado en respuesta a la demanda constante de métodos de tratamiento innovadores y no tradicionales que puedan cumplir con las regulaciones de descarga. Este enfoque ofrece varias ventajas: es rentable de implementar, operar y mantener. Lo más importante es que los vermifiltros mejoran la calidad del agua y ayudan a prevenir la contaminación de los cuerpos de agua naturales. (Salazar, 2005)

Estructura del Vermifiltro

La figura 4 ilustra la estructura del vermifiltro, que se incluye en la categoría de sistemas percoladores. Estas características de vermifiltración consisten en sustratos filtrantes en capas, que incorporan materiales como piedras, grava, aserrín y virutas. El estrato superior del filtro presenta una capa de materia orgánica, lo que proporciona un hábitat apropiado para la *Eisenia foetida*. (Guzman, 2004)

Figura 4

Esquema del sistema vermifiltro



Nota: Tesis titulada Eficiencia del sistema de vermifiltro en la depuración de contaminantes críticos de aguas residuales domésticas de la comunidad La Punta - Sapallanga

Diseño y Construcción del Vermifiltro

El diseño del vermifiltro consistió en la investigación de Ramón et al., que especifica un tanque alimentador de 50 litros que dispensa aguas residuales al vermifiltro. El agua fluye a través de una sonda de plástico perforada, lo que garantiza un caudal constante y estable. Este método permite una distribución uniforme de las aguas residuales a través del sustrato del vermifiltro. (Ramón, León, & Castillo, 2015)

“Según el estudio de Samal et al., el diseño incorporó parámetros como el caudal, el tiempo de retención hidráulica, las dimensiones de la caja (profundidad, ancho y largo) y la altura general del sistema”. (Samal et al., 2018)

Los lechos filtrantes se dispusieron en el siguiente orden: humus con lombrices, aserrín, arena y grava de río. Esta configuración facilita la filtración y oxigenación de líquidos sin producir olores desagradables. Dada la naturaleza aeróbica del proceso, el agua filtrada de cada lecho se recogió en el recipiente final para muestreo de laboratorio.

La altura de las capas vermifiltradoras se determinó mediante una ecuación propuesta por (Coronel, 2015).

Donde H es la altura

Ecuación 1 Ecuación para hallar la altura de capas

$$H \text{ de capas} = \frac{\% \text{ total del estrato } Eisenia \text{ Foetida} * \text{ altura útil del vermifiltro}}{100\%}$$

Descripción de las Capas del Vermifiltro

Aserrín. El aserrín o viruta debe ser principalmente de madera. Su espesor debe ser inferior a 10 cm para lograr el rango de funcionamiento necesario de las lombrices. Además, su principal finalidad es servir de fuente de alimento a las lombrices en caso de que la carga contaminante del afluente sea insuficiente. (Arias & Tiquillahuanca , 2018)

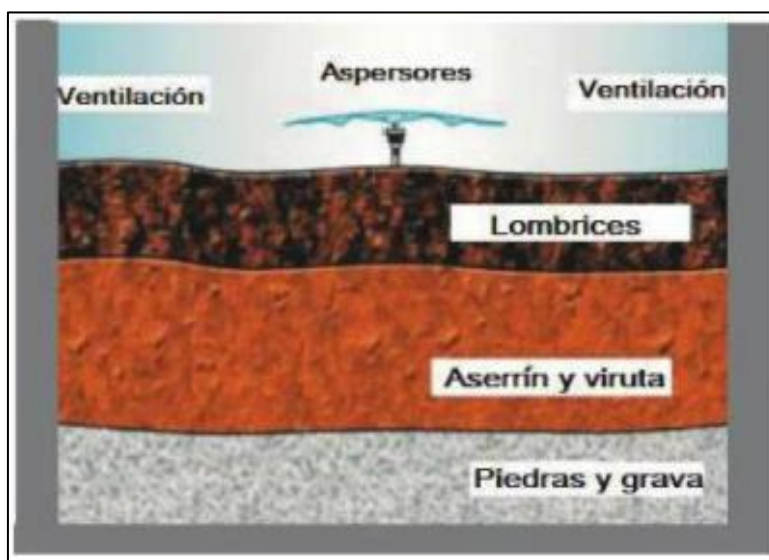
Humus. Este material es un subproducto que se genera a partir del consumo de materia orgánica por la lombriz roja californiana *Eisenia foetida*, y representa aproximadamente el 60% del humus. Se trata de un fertilizante orgánico que es rico en flora bacteriana, con un pH neutro y una estructura compacta, suave y esponjosa. Esta estructura favorece la retención de agua en el suelo, mejora la aireación y aporta nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como magnesio, calcio, fósforo y nitrógeno.

Como resultado, enriquece el suelo, y en los últimos años, el humus ha sido utilizado como enmienda para la remediación de suelos contaminados con metales pesados y productos químicos. (Gamarra, 2021)

Grava. La grava es una roca sedimentaria formada mediante la separación natural o artificial de otras piedras o minerales. Su diámetro varía de 2 a 64 mm y tiene una composición química variada, compuesta predominantemente por fragmentos de cuarzo, cuarcita, basalto, caliza, granito y dolomita. La grava es de color oscuro, con diferentes formas y una dureza de 6 en la escala de Mohs. (Landeta, 2019). En la figura 5 se puede observar las capas del vermifiltro.

Figura 5

Capas del vermifiltro



Nota: Bermudez (2019) Tesis de investigación: "Tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chimbote, usando un biofiltro de lombrices, para el riego de parques y jardines"

Lombriz Roja Californiana (Eisenia foetida)

Este animal presenta un cuerpo alargado y cilíndrico que se estrecha hacia sus extremos, compuesto por 94 a 96 anillos, cada uno con una función específica. Son

invertebrados que se mueven contrayendo sus anillos y músculos. (Arias & Tiquillahuanca , 2018)

La *Eisenia foetida*, es una especie extraordinariamente prolífica y trabajadora, que exhibe una notable resistencia al estrés, ha demostrado su capacidad de prosperar en densidades de 50.000 a 60.000 lombrices por metro cuadrado, una hazaña que ninguna otra especie de gusano silvestre puede soportar. (AGROFLOR, 1993).

Compuesto principalmente de agua, que representa entre el 80% y el 90% de su peso total, con una estructura biológica simple. Su coloración varía, desde tonos de rosa, negro, blanco, marrón y rojo. Esta variación se atribuye a la presencia de protoporfirina y pigmentos de éster metílico, que protegen al gusano de la dañina radiación ultravioleta. Además, estas lombrices pueden vivir hasta 15 años en cautiverio. (AGROFLOR, 1993).

Figura 6

Lombriz roja californiana (Eisenia foetida)



Nota: Elaboración propia

En la figura 6 se puede ver a la *Eisenia foetida*. Esta especie respira a través de la piel, ya que no tiene pulmones, y su cabeza no presenta ojos ni palpos. Células especiales distribuidas a lo largo de su cuerpo le permiten detectar la luz, que representa una gran amenaza para ella. La exposición a los rayos ultravioleta puede resultar mortal en cuestión de segundos, por lo que es crucial evitar la exposición directa a la luz solar. (INIA, 2008)

Adaptación de la Eisenia foetida a las Aguas Residuales

Antes de incorporar las lombrices *Eisenia foetida* en el sistema de vermifiltro para el tratamiento primario de aguas residuales, es necesario someterlas a un proceso de aclimatación. Este proceso les permite adaptarse gradualmente al contacto con las aguas residuales. La exposición directa podría perjudicar la epidermis de las lombrices y causar cambios ambientales bruscos que afectarían su metabolismo. (de Lima Rodrigues, y otros, 2017)

Eficiencia del Método del Vermifiltro

Con base en la investigación de Arias & Tiquillahuanca, reflejan que los datos recopilados del sistema vermifiltro, han reportado los siguientes niveles de eliminación de contaminantes:

- Disminución del 95% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- 95% de eliminación de Sólidos Totales
- Reducción del 93% en sólidos suspendidos volátiles
- Eliminación del 80% de Aceites y Grasas
- Reducción del 60% al 80% en nitrógeno total
- Disminución del 60% al 70% en fósforo total
- 99% de eliminación de coliformes fecales

El sistema vermifiltro ha demostrado una eficacia notable en el tratamiento de diversos contaminantes presentes en las aguas residuales, logrando reducciones sustanciales en múltiples parámetros contaminantes. (Arias & Tiquillahuanca , 2018).

Funcionamiento del Sistema Vermifiltro

De acuerdo con Castillo & Chimbo, detallan que, para el funcionamiento del vermifiltro se considera:

- **Entrada de aguas residuales:** el sistema recibe aguas residuales ricas en nutrientes de diversas fuentes, incluidas residenciales e industriales.
- **Distribución de agua:** Las aguas residuales se dispersan uniformemente sobre el lecho filtrante mediante tuberías o canales para evitar sobrecargas localizadas.
- **Filtración y Tratamiento Biológico:**
 - **Sustratos Filtrantes:** El vermifiltro contiene materiales como piedras, grava, aserrín y virutas, que facilitan la filtración física y la colonización microbiana.
 - **Actividad de las lombrices:** Las lombrices en el lecho filtrante consumen sólidos orgánicos, producen humus rico en nutrientes y airean el sustrato para mejorar la actividad microbiana.
 - **Filtración final:** El agua pasa a través de capas de sustrato y procesamiento de lombrices, reduciendo sólidos, nutrientes y patógenos.
 - **Salida de Agua Tratada:** El agua filtrada es recolectada en la base del vermifiltro para su posterior tratamiento o eliminación ambiental, cumpliendo con la normativa.

Aspectos Técnicos

Caudal. Varía según el diseño y la capacidad del sistema. Controlado para evitar la saturación y asegurar un tiempo de retención adecuado. (Caicedo, 2017)

Se utilizó el método volumétrico para hallar el caudal, fijándolo a un minuto y el volumen de agua que se dieron en las distintas aberturas de la llave de control. (Ecuación 2)

Ecuación 2 *Ecuación para hallar el caudal*

$$Q = V \cdot T$$

Donde:

Q = Caudal

V = Volumen

T = Tiempo

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH). El TRH garantiza una eliminación eficaz de los contaminantes al permitir un tiempo de contacto adecuado con los sustratos y las lombrices.

Caicedo, sostiene que el tiempo de retención hidráulica afecta directamente el rendimiento del vermifiltro, y que los tiempos de retención más prolongados aumentan la eficiencia de eliminación, sugiriendo usar la siguiente fórmula. (Caicedo, 2017). (Ecuación 3)

Ecuación 3 *Ecuación para hallar el Tiempo de Retención Hidráulica*

$$TRH = \frac{Vol}{Q}$$

Donde:

Q = caudal

Vol = volumen del material

Número de Lombrices

Importancia de la cantidad de lombrices. Un sistema de vermifiltro requiere una población adecuada de lombrices para procesar eficazmente los desechos orgánicos introducidos. Esta cantidad normalmente se expresa en términos de peso de lombrices, como kilogramos de lombrices por metro cúbico de sustrato. Esta medición estandarizada ayuda a garantizar una capacidad efectiva de procesamiento de residuos. (Castillo & Chimbo, 2021)

Cálculo de la población de la *Eisenia foetida*. El recuento óptimo de lombrices varía según el diseño del sistema y el tipo de desechos. Generalmente un sistema vermifiltrante funciona eficientemente con 1 a 2 kilogramos de lombrices por metro cúbico de sustrato. Esta densidad garantiza una descomposición eficaz de los residuos (Landeta, 2019).

La bibliografía indica que, en 1 kilogramo de lombrices, se encuentra un promedio de 500-1000 lombrices, esto dependiendo del tamaño de las lombrices. Para esta investigación se adquirió 3 kilogramos de lombrices y se realizó un conteo manual de 2400 unidades de lombrices.

Operación y Mantenimiento del Sistema Vermifiltro

Es imperativo mantener una agitación continua del material en el vermifiltro para asegurar una permeabilidad adecuada y prevenir el estancamiento de agua dentro del lecho de lombrices. El humus debe mantenerse en un estado de humedad óptima (70-80%). La acumulación excesiva de agua puede inhibir la capacidad de las lombrices para procesar el material de manera eficiente. (Bermudez, 2019)

Ventajas del Vermifiltro

Este sistema ofrece varios beneficios:

- Funcionamiento sin lodos
- Lecho filtrante sin revestimiento mantenido por la actividad de las lombrices, lo que garantiza una alta permeabilidad constante
- Las lombrices digieren materiales orgánicos sólidos, evitando la obstrucción del filtro.
- Diseño modular escalable adaptable a varios tamaños
- Proceso respetuoso con el medio ambiente, evitando aditivos químicos y residuos contaminantes, lo que se traduce en un bajo consumo energético.
- Operación fácil de usar similar a las prácticas agrícolas comunes
- Funcionalidad inodora
- Produce fertilizante agrícola de alta calidad que, a diferencia de las alternativas químicas, no daña las plantas incluso cuando se aplica en exceso como lo señala (Quiroz, 2019).

Desventajas del Vermifiltro

El sistema tiene varias limitaciones:

- Es necesario un suministro continuo de nutrientes; no puede soportar las interrupciones de la alimentación
- Proceso de puesta en marcha complejo con un período de adaptación desafiante
- Sensible a variaciones significativas de carga o flujo.
- No apto para tratar grandes volúmenes de efluentes.
- La proliferación de lombrices puede verse obstaculizada en climas extremadamente fríos. (Largo, 2022).

3.3. Definición de Términos

Planta de tratamiento de aguas residuales

“Es una Infraestructura en la que se realiza operaciones físicas y procesos químicos mediante los cuales se purifica el agua residual doméstica o industrial”. (Fernandez et al., 2022)

Estos sistemas funcionan como unidades de transformación de efluentes industriales y domésticos, centrándose específicamente en la conversión de materia orgánica. A primera vista, pueden parecer unidades aisladas, creadas principalmente para proteger ciertos cauces de agua debido a exigencias legales y presión de las Autoridades Ambientales Regionales. No obstante, al considerar su función en un contexto más amplio, estos sistemas constituyen la fase inicial y fundamental de lo que podría denominarse el "sistema digestivo" del entorno global. (Umasi, 2020)

Aguas Residuales

Las aguas residuales se definen como aquellas aguas que han sido contaminadas luego de ser empleadas para diversos propósitos por una población. La contaminación del agua implica la introducción de impurezas derivadas de su uso específico, y puede provenir de fuentes tanto naturales como generadas por la actividad humana. Estas fuentes de contaminación abarcan descargas de sistemas de alcantarillado residenciales o industriales, así como factores ambientales como la lluvia ácida, prácticas agrícolas insostenibles y escorrentías contaminadas de tormentas. (Quiroz, 2019)

Caudal

“El caudal es la cantidad de agua residual que pasa a través de una sección transversal particular durante una unidad de tiempo, esta unidad se puede expresar en litros/segundo o mililitros/segundo”. (Arana, 2022)

Efluente

“Un efluente es la corriente de aguas residuales que sale de una planta o proceso de tratamiento, listo para ser vertido a un cuerpo receptor”. (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2013)

Contaminación

“La contaminación es el cambio no deseado de propiedades físicas, químicas o biológicas que pueden causar daños al medio ambiente o seres vivos”. (Fernández et al., 2022)

Características físicas

Las características físicas son fundamentales en el análisis de las aguas residuales, ya que abarcan el contenido total de sólidos, incluyendo materia suspendida, sedimentable, coloidal y disuelta. Además, otras propiedades físicas relevantes son la temperatura, la turbidez, el color, los sólidos y el olor. (Liberio, 2018)

Características Químicas

El análisis de las características químicas de las aguas residuales se divide en cuatro áreas principales: materia orgánica, medición del contenido orgánico, materia inorgánica y gases presentes en las aguas residuales. La medición independiente del contenido de materia orgánica se justifica debido a su relevancia en la gestión de la calidad del agua y el diseño de las instalaciones de tratamiento. (Liberio, 2018)

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Representa la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos aeróbicos para descomponer la materia orgánica biodegradable en las aguas residuales durante un período de incubación de cinco días a 20°C. La DBO sirve como un indicador crucial

para evaluar el nivel de contaminación orgánica en las aguas residuales y evaluar su impacto ambiental en los cuerpos de agua receptores. (Tchobanoglous & Kremer, 2022).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica, medida en mg/L (ppm). Este parámetro suele superar los valores de DBO₅, ya que abarca una gama más amplia de compuestos que pueden oxidarse por medios químicos. (Castro, 2019)

Temperatura

La temperatura se considera una propiedad física primaria debido a su efecto sobre la velocidad de las reacciones químicas, la actividad bacteriana, la vida acuática de los cuerpos de agua receptores, así como la concentración de oxígeno disuelto. Las aguas residuales generalmente presentan una temperatura más elevada que el agua de suministro, y su temperatura también se ve influenciada por las condiciones climáticas locales. (Aldoradin & Quispe, 2023)

pH

“El pH es una propiedad química que evalúa el nivel de acidez o basicidad de las aguas residuales. Se define como el logaritmo negativo de la actividad del ion hidrógeno (H⁺) en una solución acuosa”. (Aldoradin & Quispe, 2023)

Lombriz roja californiana (Eisenia foetida)

La lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) es un invertebrado de cuerpo cilíndrico y alargado. En su etapa adulta, mide entre 5 y 6 mm. Son sensibles a la luz y una exposición breve a la luz solar puede llegar a matarlas. Estas lombrices tienen glándulas especiales en el estómago que, una vez ingerido el alimento, secretan carbonato

de calcio para neutralizar los ácidos de lo consumido y posteriormente excretarlo. (Liberio, 2018)

Muestra de agua

Se refiere a una porción típica extraída de un cuerpo de agua para examinar sus características químicas, físicas y biológicas. El muestreo tiene como objetivo evaluar la calidad del agua, detectar contaminantes y cumplir con requisitos reglamentarios o de investigación. Para garantizar resultados precisos y representativos, es esencial emplear técnicas adecuadas para recolectar, preservar y gestionar las muestras. (Crane & de Bortoli, 2020)

Tiempo de Retención Hidráulica

Es el tiempo durante el cual una porción de fluido reside dentro de un envase. Representa el intervalo de tiempo necesario para que el líquido que ingresa al recipiente salga posteriormente del mismo.

El Tiempo de Retención Hidráulica, se puede calcular dividiendo el volumen del contenedor por el caudal, lo que arroja un valor en horas. Esto implica que cualquier líquido que ingrese al contenedor tardará aproximadamente una cantidad en horas en recorrerlo y salir como efluente (de la Vega Manzano, s.f.)

IV. Metodología

4.1. Tipo y Nivel de Investigación

Tipo de Investigación

La investigación es de carácter aplicado, con un enfoque cuantitativo y se basa en estudios teóricos acerca de la eliminación de la DBO_5 en las aguas residuales del camal mediante el uso del vermifiltro. (Ñaupas, 2014)

Nivel de la Investigación

La investigación adopta un nivel explicativo, ya que busca esclarecer las causas subyacentes de un fenómeno específico, mediante el análisis y procesamiento de datos obtenidos del sistema vermifiltro. Esta investigación se centra en descubrir, establecer y exponer las relaciones entre las variables estudiadas, con el objetivo de explicar dónde, en qué medida, cómo y por qué ocurre el fenómeno investigado. (Hernandez Sampieri, 2014)

4.2. **Ámbito Temporal y Espacial**

Ámbito Temporal

El proyecto en estudio de la aplicación de vermifiltro corresponde a los meses de Setiembre del 2023 hasta abril del 2024.

Ámbito Espacial

Como se puede ver en la figura 7, el área de estudio para esta investigación incluye el Camal Municipal del Cusco, ubicado en el Distrito de San Jerónimo, en la Provincia y Departamento de Cusco.

Figura 7

Delimitación del ámbito espacial



Fuente: Google Maps

Localización política

- Región: Cusco
- Provincia: Cusco
- Distrito: San Jerónimo

Ubicación geográfica

- Latitud: 13°33'10.82" S
- Longitud: 71° 52'27.32" O
- Altitud: 3200msnm.

Ámbito Social

El esfuerzo de esta investigación generará beneficios significativos para los residentes de zonas aledañas al camal, ya que tiene una relevancia social sustancial. Los hallazgos y resultados de este estudio están diseñados para abordar y mitigar los problemas y desafíos que enfrenta el recurso hídrico en Cusco, al proporcionar una comprensión más profunda y soluciones prácticas. Además, la información obtenida puede servir como base para futuras iniciativas y políticas destinadas a proteger y optimizar los recursos hídricos locales.

Ámbito Conceptual

La tecnología de vermifiltro sigue siendo escasa en los camales del Perú para abordar la contaminación de las aguas residuales. La implementación de este método no sólo proporciona un medio eficiente y ecológico de eliminación de contaminantes. La integración de vermifiltros tiene el potencial de revolucionar los métodos de tratamiento de agua en las granjas, mejorando las condiciones ambientales y alineándose con los principios de gestión sostenible del agua.

4.3. Población y Muestra

Población

Corresponde al efluente proveniente de aguas residuales del Camal Municipal del Cusco que está ubicada en el Distrito de San Jerónimo. Al día se benefician entre 150 a

200 animales, el agua utilizada es de 500 litros por cada animal. Esto constituye la unidad de investigación. (Municipalidad Provincial del Cusco, 2024)

Muestra

La muestra representante fue de 200 litros de agua residual de camal, esto representa la cantidad de agua diaria desechada que fue aplicada en el sistema vermifiltro.

Volumen de agua a extraer. De acuerdo al Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, no es posible determinar de manera general el volumen de agua que se va a coleccionar para el análisis fisicoquímico y la de la DBO₅ ya que varía según las especificaciones a efectuar entre 0.5 a 1 litro. (Ministerio de Salud, 2010)

4.4. Instrumentos

Se utilizó como instrumento la ficha de recolección de datos que se detalla en el (anexo 3)

- Ficha 1: Cadena de custodia (Proporcionada por el laboratorio Louis Pasteur)

Validez de Instrumento

Para garantizar la confiabilidad del instrumento de investigación de este estudio, fue validado y aprobado por dos profesionales expertos (como se muestra en la Tabla 4). Estos especialistas eran ingenieros registrados.

Tabla 4*Validación de instrumentos*

Especialistas	Cargo/Profesión	% de validación
Salcedo Valeriano María Concepción	Mtr. Ing. Químico	80%
Hanco Loayza Helidia	Mtr. Ing. Químico	71%
Promedio total de validación 75.5%		

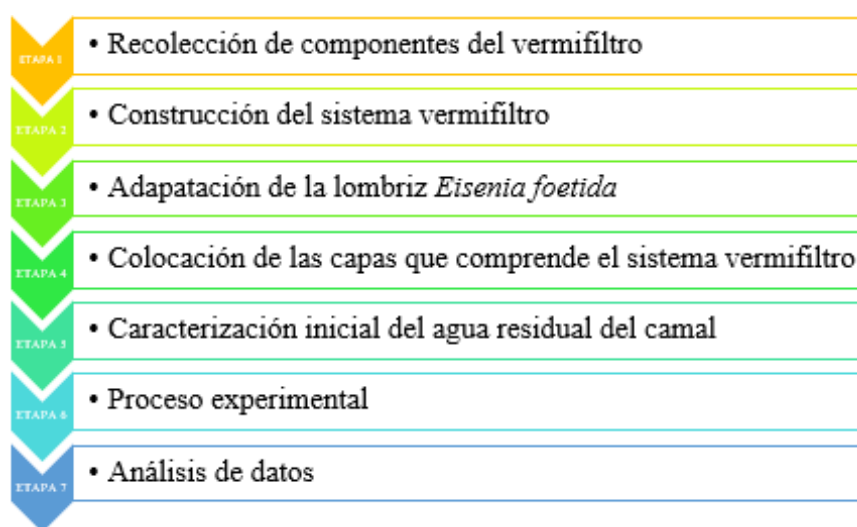
Fuente: Ficha de validación de instrumentos proporcionada por la universidad UTEA

Técnicas

En lo que respecta a la técnica, se empleó el análisis experimental. Para llevar a cabo la fase experimental del estudio, se construyeron 12 reactores de vermifiltro, en los cuales se ajustaron las condiciones óptimas para obtener muestras representativas, las cuales fueron posteriormente analizadas en el laboratorio.

4.5. Procedimientos

La siguiente sección describirá el procedimiento que se siguió como parte experimental de este estudio, como se ilustra en la figura 8.

Figura 8*Diagrama del proceso de investigación*

Nota: Elaboración propia

ETAPA 1: Recolección de Componentes del Vermifiltro

Luego de la revisión bibliográfica, según (Caicedo, 2017), se procedió a la adquisición de los componentes:

Eisenia foetida. Se adquirió la cantidad de 2400 unidades *Eisenia foetida* para el sistema de vermifiltro. Estas lombrices fueron recolectadas de los lechos de abono mantenidos por un agricultor y compostador que labora en la Planta de Compostaje de San Jerónimo.

Figura 9

Eisenia foetida



Nota: Elaboración propia

Aserrín. El aserrín se obtuvo visitando una carpintería del Distrito de San Sebastián, donde se calculó y recogió una cantidad aproximada de 12 kilogramos.

Figura 10

Aserrín de carpintería



Nota: Elaboración propia

Arena gruesa. Posteriormente se adquirió 50 kilogramos de arena gruesa en una ferretería.

Figura 11

Arena gruesa



Nota: Elaboración propia

Grava natural. Se recogió grava natural del río Vilcanota de diferente granulometría (1 cm, 3 cm, así como también piedras enteras) llegando a un peso determinado de 50 kilogramos.

Figura 12

Grava natural del río Vilcanota



Nota: Elaboración propia

ETAPA 2: Construcción del Sistema Vermifiltro

Para la construcción del sistema vermifiltro, que se adaptó de (Largo, 2022), se utilizó 12 baldes transparentes de plástico, cada uno con capacidad de 20 litros, una altura de 30cm y con un diámetro y área de 33.7 cm.

Figura 13

Balde de plástico utilizado en la construcción del vermifiltro



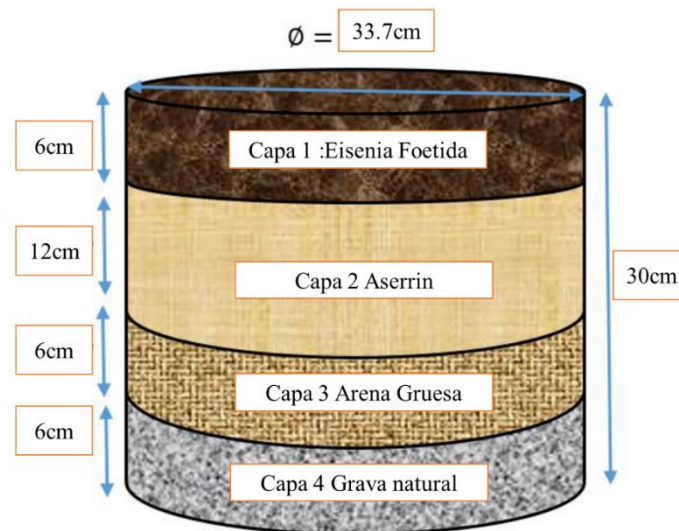
Nota: Google imágenes

Este sistema vermifiltro tuvo una composición de 4 lechos filtrantes:

- Primera capa de 6 cm de humus acompañado de *Eisenia foetida*, que representa el 20% del total de la altura del balde.
- Segunda capa de 12 cm de aserrín, que representa el 40% del total de la altura del balde.
- La tercera capa de 6 cm de arena gruesa, que representa el 20% del total de la altura del balde.
- La cuarta capa de 6cm de grava natural, que representa el 20% del total de la altura del balde.

Figura 14

Distribución de las capas del vermifiltro



Nota: Elaboración propia

“De acuerdo a Coronel, quien detalla el uso de ecuaciones para calcular el espesor de capas en el sistema vermifiltro, se proporciona un análisis detallado del cálculo de capas”. (Coronel, 2015)

- **Cálculo de capas del vermifiltro**

- **Cálculo de la capa 1 (*Eisenia foetida*)**

capa

1

$$\frac{\% \text{ total del estrato } Eisenia \text{ foetida} * \text{ altura útil del vermifiltro}}{100\%}$$

$$capa 1 = \frac{20\% * 30cm}{100\%}$$

$$capa 1 = \frac{60cm}{100}$$

$$capa 1 = 6cm$$

- **Cálculo de la capa 2 (*Aserrín*)**

$$capa 2 = \frac{\% \text{ total del estrato Aserrin} * \text{ altura útil del vermifiltro}}{100\%}$$

$$capa 2 = \frac{40\% * 30cm}{100\%}$$

$$capa 2 = \frac{120cm}{100}$$

$$capa 2 = 12cm$$

- **Cálculo de la capa 3 (*Arena gruesa*)**

$$capa 3 = \frac{\% \text{ total del estrato Arena gruesa} * \text{ altura útil del vermifiltro}}{100\%}$$

$$capa 3 = \frac{20\% * 30cm}{100\%}$$

$$capa 3 = \frac{60cm}{100}$$

$$capa 3 = 6cm$$

○ **Cálculo de la capa 4 (Grava natural)**

capa 4

$$\frac{\% \text{ total del estrato Grava Natural} * \text{altura útil del vermifiltro}}{100\%}$$

$$\text{capa 4} = \frac{20\% * 30\text{cm}}{100\%}$$

$$\text{capa 4} = \frac{60\text{cm}}{100}$$

$$\text{capa 4} = 6\text{cm}$$

▪ **Cálculo de la altura total de las capas**

$$HT = \text{Cap1} + \text{Cap 2} + \text{Cap 3} + \text{Cap 4}$$

$$HT = 0.06 + 0.12 + 0.06 + 0.06$$

$$HT = 0.30\text{m}$$

ETAPA 3: Adaptación de la Lombriz Eisenia foetida

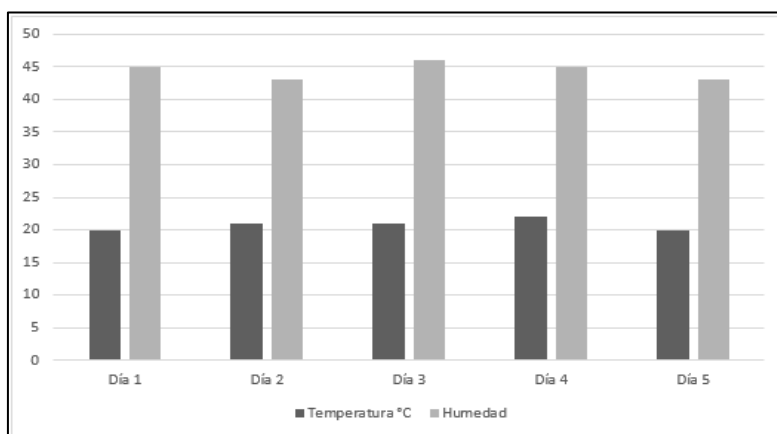
En la tabla 5 y figura 15 se observan los resultados del proceso de adaptación de 5 días para la lombriz de tierra *Eisenia foetida*. La temperatura se mantuvo entre 20-21°C de día y de noche entre 12-10°C.

En la fase de aclimatación, se distribuyó diariamente un litro de agua residual doméstica del matadero en dos recipientes que albergaban el sustrato (humus) y todas las lombrices. Los recipientes contaban con perforaciones en la base y una malla raschell en el fondo, lo que permitía el drenaje del exceso de agua mientras se mantenía la humedad necesaria del sustrato para la respiración de las lombrices. Se aplicó medio litro de agua residual en cada recipiente.

Tabla 5*Adaptación de la Eisenia foetida*

# De Días	Fecha	Hora	Temperatura °C	Humedad %
1	08/03/2024	9:00:00 a. m. - 18:00 pm	21.1 - 12.2	75
2	09/03/2024	9:00:00 a. m. - 18:00 pm	20.8 - 10.4	75
3	10/03/2023	9:00:00 a. m. - 18:00 pm	20.9 - 10.0	73
4	11/03/2023	9:00:00 a. m. - 18:00 pm	21.1 - 11.5	80
5	12/03/2023	9:00:00 a. m. - 18:00 pm	20.8 - 10.6	80

Nota: Elaboración propia

Figura 15*Adaptación de la Eisenia foetida a las aguas residuales del camal durante 5 días*

Nota: Elaboración propia

El resultado fue una adaptación exitosa de las lombrices, a una temperatura ambiente promedio de 20°C, reforzada aún más por el conocimiento de que esta especie particular de lombriz posee la capacidad de aclimatarse rápidamente al entorno en el que se introduce.

ETAPA 4: Colocación de las Capas que Comprende el Sistema Vermifiltro

“De acuerdo a la metodología planteada en el trabajo de investigación de Coronel, se procedió a colocar las capas del vermifiltro, una vez utilizada las formulas para el espesor de capas”. (Coronel, 2015):

- Primero, se procedió a colocar la capa 4 (grava natural), previamente se lavaron y acomodaron las piedras formando una capa de 6cm.
- A continuación, se dispuso la capa 3 (arena gruesa), entre las capas 4 y 3 se añadió una malla Raschell para evitar el deslizamiento de la arena.
- Posteriormente, se colocó la capa 2 (aserrín), siguiendo el espesor requerido para esta capa.
- Finalmente, se introdujo la capa 1 (*Eisenia foetida*), en el cual se acomodó humus como sustrato para la lombriz.

La instalación de los lechos filtrantes se realizó de forma manual para los 12 reactores, como se observa en la figura 16:

Figura 16

Instalación de las capas del sistema vermifiltro



Nota: Elaboración propia

ETAPA 5: Caracterización Inicial del Agua Residual del Camal

El proceso inicial de muestreo de agua se realizó de la siguiente manera:

- Se completó el formulario 1 (Ver anexo 3).
- Se recolectaron muestras de aguas residuales del Camal Municipal de la Provincia del Cusco y se completó el Formulario 1 (Ver anexo 3).

Figura 17

Efluente de las aguas residuales del camal



Nota: Elaboración propia

Figura 18

Toma de muestra del agua residual del camal



Nota: Elaboración propia

- La muestra recolectada se transfirió a un recipiente de plástico debidamente esterilizado, en volumen de 1 L, luego se transportó al laboratorio.

- A su llegada al laboratorio se realizaron análisis de DBO_5 , DQO, pH, SST, OD, conductividad, turbidez, sulfatos, cloruros y dureza cálcica.

ETAPA 6: Proceso Experimental

Determinación del caudal (Q). Para medir el caudal, se abrió la llave de control del tanque alimentador en tres posiciones diferentes y se colocó una probeta de 50 ml debajo del equipo vermifiltro. Se recolectó el agua residual durante un minuto y luego se retiró el recipiente con el agua recogida. Posteriormente, se midió la cantidad de agua residual recolectada, y este procedimiento se repitió tres veces para obtener resultados más precisos. (Ecuación 1)

Se utilizó la siguiente formula:

$$Q = V \cdot T$$

Donde:

Q = Caudal

V = Volumen

T = Tiempo

Tabla 6*Determinación del caudal*

Caudal (Q)	Mediciones(ml/min)) Repeticiones	Promedio del caudal (ml/min)
Q1	10.1	10.1
	10.2	
	10.1	
	10.0	
Q2	15.1	15.05
	14.9	
	15.2	
	15.0	
	20.2	
Q3	20.0	20.05
	19.9	
	20.1	

Fuente: Elaboración propia

Tiempo de retención hidráulico (TRH). El cálculo se realizó utilizando los tres caudales distintos mencionados anteriormente. (Ecuación 2)

Se utilizó la siguiente formula:

$$TRH = \frac{Vol}{Q}$$

Donde:

Q = caudal**Vol**= volumen del material

Tabla 7*Tiempo de Retención Hidráulica*

Capas	Tiempo de Retención Hidráulica		
	TRH 1	TRH 2	TRH 3
CAPA 1 (Eisenia foetida + humus)	20min	25 min	16 min
CAPA 2 Aserrín	82 min	90 min	70 min
CAPA 3 Arena gruesa	48 min	55 min	37 min
CAPA 4 Grava natural	18min	12 min	8 min
Total	2h 40 min	3h 03 min	2h 11min

Fuente: Elaboración propia

Aplicación del sistema vermifiltro: Se recolectó 200 litros de aguas residuales del Camal Municipal de la Provincia del Cusco. Esta agua se almacenó en bidones de 50 y 30 litros.

Figura 19*Almacenamiento de las aguas residuales en los bidones*

Nota: Elaboración propia

Se colocó los bidones en una superficie que se encontraba más alta, y así pueda ingresar el agua por gravedad, usándose un caudal de 10ml/min ,15 ml/min y 20 ml/min. Después de un período de retención de 72, 96 y 120 horas, se recogió una muestra final

de 1 litro por cada reactor, posteriormente se rellenó la ficha de cadena de custodia, y por último se llevó al laboratorio para su análisis de la DBO₅. (Ver anexo 3).

ETAPA 7: Análisis de Datos

Para el procedimiento estadístico se usó el software Excel y Minitab v19 para realizar el procesamiento de los datos obtenidos. Además, se realizó el análisis factorial para poder obtener el modelo matemático más adecuado para la presente investigación.

Diseño Estadístico: El diseño de esta investigación implicó un diseño factorial para hallar el modelo matemático

Diseño Factorial 2³: El diseño factorial 2³ con puntos centrales es un enfoque experimental que evalúa tres factores, cada uno en dos niveles (alto y bajo) más un nivel intermedio. Este procedimiento es particularmente eficaz para valorar eficientemente tanto los impactos individuales de los factores como sus interacciones sobre una variable dependiente.

Montoya explica que, el diseño factorial 2³ con puntos centrales implica realizar experimentos que combinen los niveles de tres factores de todas las formas posibles. Esto da como resultado $2^3 = 8$ experimentos distintos, que abarcan cada combinación de niveles para los tres factores bajo investigación. (Montoya, 2014).

Con el uso del Minitab se hallan las combinaciones para el diseño factorial:

Tabla 8

Resumen del diseño 2³

Factores:	3	Diseño de la base:	3; 12
Corridas:	12	Réplicas:	1
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	1

Fuente: Elaboración propia a través del Minitab

En la tabla 9, se observa el diseño factorial aleatorio donde todos los términos están libres de estructuras alias. En el contexto del diseño experimental, especialmente en el diseño factorial, la frase "Todos los términos están libres de estructuras alias" se refiere a que los efectos y las interacciones de los factores en el experimento se pueden estimar sin confusión o mezcla con otros efectos.

Tabla 9

Diseño factorial aleatorio

N°	Tiempo	Caudal	Lombrices
1	72	10	100
2	120	10	100
3	72	20	100
4	120	20	100
5	72	10	300
6	120	10	300
7	72	20	300
8	120	20	300
9	96	15	200
10	96	15	200
11	96	15	200
12	96	15	200

Fuente: programa Minitab

Modelo Matemático

Dentro del modelo matemático, y obtener un diseño factorial 2^3 con puntos centrales, se incluyen 8 puntos experimentales en las combinaciones de los niveles alto y bajo, y 4 puntos centrales (con valores promedio para cada factor).

Efectos principales. Los efectos principales se calculan como la diferencia promedio en la respuesta entre los niveles alto y bajo de cada factor. (Armenta & Vargas, 2022)

Donde:

- A=Tiempo
- B=Caudal

- C=Lombrices

Para el Factor A, B y C. Se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 4 *De Efectos Principales*

$$E_A = \frac{(Y_{211} + Y_{222}) - (Y_{111} + Y_{122})}{2}$$

Análisis de las interacciones. Las interacciones entre factores se calculan para entender cómo la combinación de niveles de dos o más factores influye en la respuesta.

(Arminta & Vargas, 2022)

Ecuación 5 *Análisis de Interacciones*

$$E_{AB} = \frac{(Y_{221} + Y_{112}) - (Y_{211} + Y_{122})}{2}$$

Se realiza un cálculo similar para las interacciones AC y BC.

La interacción ABC se calcula como:

Ecuación 6 *Interacción ABC*

$$E_{ABC} = \frac{(Y_{222} + Y_{111}) - (Y_{212} + Y_{121})}{2}$$

Tabla 10*Diseño factorial 2³ y puntos centrales*

Experimento	Factor A	Factor B	Factor C	Respuesta
1	-1	-1	-1	Y_{111}
2	+1	-1	-1	Y_{211}
3	-1	+1	-1	Y_{121}
4	+1	+1	-1	Y_{221}
5	-1	-1	+1	Y_{112}
6	+1	-1	+1	Y_{212}
7	-1	+1	+1	Y_{122}
8	+1	+1	+1	Y_{222}
9	0	0	0	Y_{000}
10	0	0	0	Y_{000}
11	0	0	0	Y_{000}
12	0	0	0	Y_{000}

Fuente: Practical Statistics for Data Scientists

Análisis de Varianza (ANOVA)

El ANOVA es una herramienta esencial en la estadística que permite comparar las medias de diferentes grupos y determinar si al menos una de las medias es significativamente diferente de las otras. Esta técnica se basa en la comparación de la variabilidad dentro de los grupos con la variabilidad entre los grupos. (Montgomery, 2019)

Teorema de Cochran

El teorema de Cochran es un resultado importante en estadística que se utiliza principalmente en el análisis de varianza (ANOVA) y en el diseño de experimentos. Este teorema, desarrollado por William G. Cochran, establece una relación entre las distribuciones y las sumas de cuadrados en ciertos tipos de análisis estadísticos.

En esencia, el teorema de Cochran afirma que, si tienes una serie de variables aleatorias normales independientes, la suma de sus cuadrados dividida por sus varianzas sigue una distribución. (Dean & Bertrand, 2022)

Aplicación del Diseño Factorial 2³ con Puntos Centrales

En la tabla 11 se muestra los niveles de variables para la aplicación del diseño experimental, indicando una denominación y con niveles inferior, intermedio y superior:

Donde:

- A=Tiempo
- B=Caudal
- C=Lombrices

Tabla 11

Diseño experimental

	Variabes	Nivel inferior (-)	Nivel intermedio (0)	Nivel superior (+)
A	Tiempo (horas)	72	96	120
B	Caudal (ml/min)	10	15	20
C	Lombrices (und)	100	200	300

Fuente: Elaboración propia

La tabla 12 presenta la matriz en escala codificada, que incluye las columnas (X1, X2 y X3) correspondientes a los tres factores en estudio, expresados en escala natural (A, B y C). Estas columnas están organizadas en el orden estándar, comenzando cada una con el signo negativo (-) y alternando entre signos negativos (-) y positivos (+). La respuesta del diseño está determinada por los objetivos del experimento, que en este caso es la reducción porcentual de la DBO₅ mediante la aplicación del sistema de vermifiltro.

Tabla 12*Variables en escala natural y codificada con replicas en el centro*

Equipo Vermifiltro	Escala codifica			Escala natural			Respuesta (Y)
	X1	X2	X3	A	B	C	
R-1	-1	-1	-1	72	10	100	69.91
R-2	1	1	1	120	10	100	76.72
R-3	-1	1	-1	72	20	100	66.05
R-4	1	1	-1	120	20	100	74.62
R-5	-1	-1	1	72	10	300	79.63
R-6	1	-1	1	120	10	300	86.84
R-7	-1	1	1	72	20	300	70.01
R-8	1	1	1	120	20	300	73.10
R-9	0	0	0	96	15	200	75.64
R-10	0	0	0	96	15	200	72.33
R-11	0	0	0	96	15	200	70.81
R-12	0	0	0	96	15	200	73.13

Fuente: Software Minitab

- Escala codificada: “O escala transformada, implica alterar matemáticamente los datos de su formato original, ajustando los datos para que se encuentren dentro de un rango predeterminado, como 0 a 1 o -1 a 1”. (Bruce et al., 2020)
- Escala natural: Los datos en su forma original y sin modificaciones se denominan escala natural. Esto significa que la información se presenta exactamente como fue recopilada”. (Bruce et al., 2020)
- Y: Eficiencia en la DBO_5

Representación Geométrica de las Combinaciones

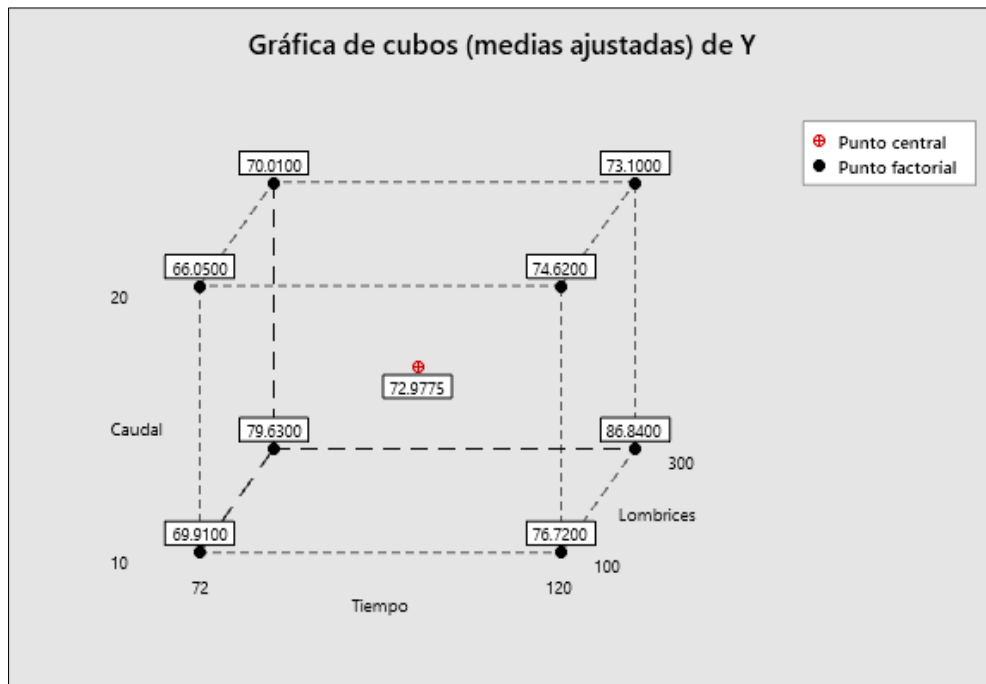
El área experimental se representa ahora como un cubo regular. Los vértices de este cubo corresponden a los ocho tratamientos, mientras que el centro del cubo está ocupado por el promedio de los cuatro puntos centrales.

Este modelo nos ha permitido estudiar siete efectos, que son las siguientes: tres principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC, en general, se puso interés en estudiar los efectos principales y las interacciones dobles, observando que, es preferible asegurarse que la interacción ABC mantiene un valor mínimo. Se analizó la influencia de los factores controlables sobre la variable respuesta, en la parte experimental se aleatorizó las pruebas experimentales con la finalidad de eliminar el efecto de otros factores en la aplicación del sistema vermifiltro. (Arminta & Vargas, 2022)

La figura 20 representa un modelo que ha facilitado el análisis de los efectos e implicaciones de los factores controlables que influyen en la variable respuesta. Mediante el diseño factorial con puntos centrales, se examinó el impacto de tres factores, cada uno en dos niveles distintos.

Figura 20

Representación geométrica de las variables en 2³ puntos centrales



Nota: Software Minitab

Cálculo de Efectos

“Para saber cuantitativamente cuanto afecta las variables sobre la respuesta o criterio de optimización de un proceso, se determina el cálculo de los efectos las cuales se definen como la diferencia entre los valores de las respuestas”. (Armintá & Vargas, 2022) Ver tabla 13.

Tabla 13*Efectos de la interacción de las variables*

Termino	Efectos
A: Tiempo	6.420
B: Caudal	-7.330
C: Lombrices	5.570
A*B	-0.590
A*C	-1.270
B*C	-4.350
A*B*C	-1.470

Fuente: Software Minitab

Para la interpretación de efectos no se muestran unidades, ya que es la combinación de los términos.

- El efecto de tiempo es de 6.420, es decir entre más sea el tiempo aumenta la reducción de la DBO_5 , es un factor que influye en la aplicación del sistema vermifiltro.
- El caudal tiene un efecto de -7.330, entre menor sea el caudal la reducción de la DBO_5 se verá reflejada, es un factor que influye en la aplicación del sistema vermifiltro.
- El efecto de la cantidad de lombrices es de 5.570 influye de manera importante ya que es un factor influyente dentro del sistema vermifiltro para la reducción de la DBO_5 .
- En la interacción entre tiempo y caudal nos arroja un resultado de -0.590 se puede decir que la interacción de dichas variables no es muy significativa.
- El efecto de interacción entre tiempo y lombrices fue de -1.270 se puede resaltar que la reducción de DBO_5 permanecerá constante en el sistema vermifiltro.

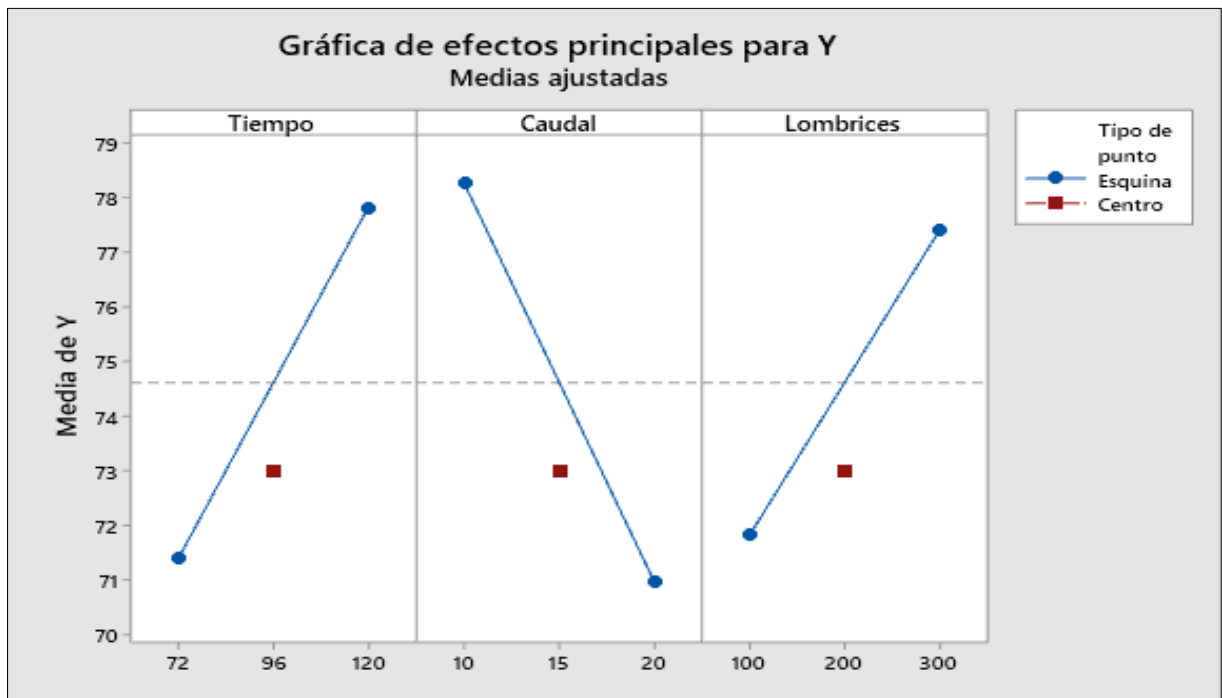
- El efecto entre la interacción de caudal y la cantidad de lombrices es de -4.35 esto indica que entre menor sea el caudal y mayor la cantidad de lombrices en el tiempo se obtendrá la reducción de la DBO_5 en el sistema vermifiltro.
- La interacción entre los 3 factores fue de -1.470 esto indica que hay influencia de las tres variables para la reducción de la DBO_5 en el sistema vermifiltro.

En la figura 21 se observa, el efecto de tiempo, caudal y cantidad de lombrices.

Identificando cuales son las variables de mayor influencia hablando estadísticamente.

Figura 21

Efectos para la aplicación del sistema vermifiltro



Nota: Software Minitab

La interpretación es la siguiente:

- El tiempo es proporcionalmente directo a la respuesta, eso hace entender que entre más tiempo mayor es la eficiencia de reducción de la DBO_5 .

- El caudal es inversamente proporcional a la respuesta, por consiguiente, entre menor sea el caudal mayor será la eficiencia de reducción de la DBO_5 .
- El número de lombrices es proporcionalmente directo a la respuesta, eso hace entender que entre mayor sea la cantidad de lombrices, mayor será la eficiencia de reducción de la DBO_5 .

Análisis de Varianza

Para determinar el significado real de los efectos de las variables tomadas en consideración, el análisis de varianza se aplica para evaluar la significancia de los efectos en el diseño experimental. mediante este análisis se verifica cuál de las siguientes variables ya indicadas son realmente importantes en esta investigación. Se cumple la relación definida cuando p tiene un valor < 0.05 . (Arminta & Vargas, 2022). Los valores se muestran en la tabla 14.

- GL: Grados de Libertad
- SC Ajustada: Suma de Cuadrados Ajustada
- MC Ajustada: Media de Cuadrados Ajustada
- Valor F: Para evaluar si existen diferencias significativas entre las medias de múltiples grupos.
- Valor p : Es la probabilidad de observar un valor F tan extremo como el calculado, o más extremo, bajo la hipótesis nula de que todas las medias de los grupos son iguales. Con un valor óptimo menor a 0.05.
- R-Cuadrada: Es la proporción de la variabilidad total en la variable dependiente que es explicada por el modelo de regresión.

Tabla 14*Análisis de la varianza para la aplicación del sistema vermifiltro*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	305.136	38.142	9.36	0.046
Lineal	3	251.940	83.980	20.60	0.017
Tiempo	1	82.433	82.433	20.22	0.021
Caudal	1	107.458	107.458	26.36	0.014
Lombrices	1	62.050	62.050	15.22	0.030
Interacciones de 2 términos	3	41.767	13.922	3.42	0.170
Tiempo*Caudal	1	0.696	0.696	0.17	0.707
Tiempo*Lombrices	1	3.226	3.226	0.79	0.439
Caudal*Lombrices	1	37.845	37.845	9.28	0.056
Interacciones de 3 términos	1	4.322	4.322	1.06	0.379
Tiempo*Caudal*Lombrices	1	4.322	4.322	1.06	0.379
Curvatura	1	7.107	7.107	1.74	0.278
Error	3	12.229	4.076		
Total	11	317.365			

Fuente: Software Minitab

R-Cuadrada=96.15 % el 96 % de la variabilidad.

En la tabla 14 se presenta el análisis ANOVA, que muestra la variabilidad en la reducción de DBO_5 mediante el uso del sistema vermifiltro. Se evalúa la significancia estadística de cada efecto al comparar su media cuadrática con un estimado del error experimental. En este caso, tres efectos tienen un valor-p inferior a 0.05, lo que indica que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 96%.

Tras realizar la prueba de significancia estadística para cada efecto, comparando la media cuadrática con una estimación del error experimental, se observó que los efectos

del tiempo (A), el caudal (B) y la cantidad de lombrices (C) presentan p-valores inferiores a 0.05. Esto indica que estos factores son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 96%.

Modelo matemático

Una vez determinados los efectos y teniendo en cuenta el análisis de varianza se pasa a obtener un modelo matemático lineal siendo una representación lógica y cualitativa al sistema vermifiltro donde la interrelación de las variables con el sistema factorial con el fin de predecir el fenómeno en cuestión. (Armintá & Vargas, 2022) (Ver anexo 5)

Para ello determinaremos el coeficiente de regresión usando la siguiente ecuación:

Ecuación 7 Coeficiente de regresión

$$[B] = ([X^T] * [X]^{-1}([X^T] * [Y]))$$

- Ecuación del modelo matemático a escala codificada:

$$Y = 63.2 + 0.04 A - 0.80 B + 0.0303 C + 0.0098 A * B + 0.000654 A * C + 0.00153 B * C - 0.000061 A * B * C$$

- Ecuación del modelo matemático a escala natural:

$$Y = 74.610 + 3.210 A - 3.665 B + 2.785 C - 0.295 A * B - 3.210 A * C - 2.175 B * C - 0.735 A * B * C$$

Si se iguala a cero las tres variables el porcentaje de reducción de DBO_5 aplicando el sistema vermifiltro, puesto que el signo positivo nos indica que se puede optimizar ese proceso estudiado.

La maximización de aplicación del sistema vermifiltro fue de Valor optimo: 87.760%

Tabla 15*Factores óptimos para el sistema vermifiltro*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Tiempo (horas)	72	96	120
Caudal (ml/min)	15	20	10
Lombrices (und)	100	200	300

Fuente: Elaboración propia

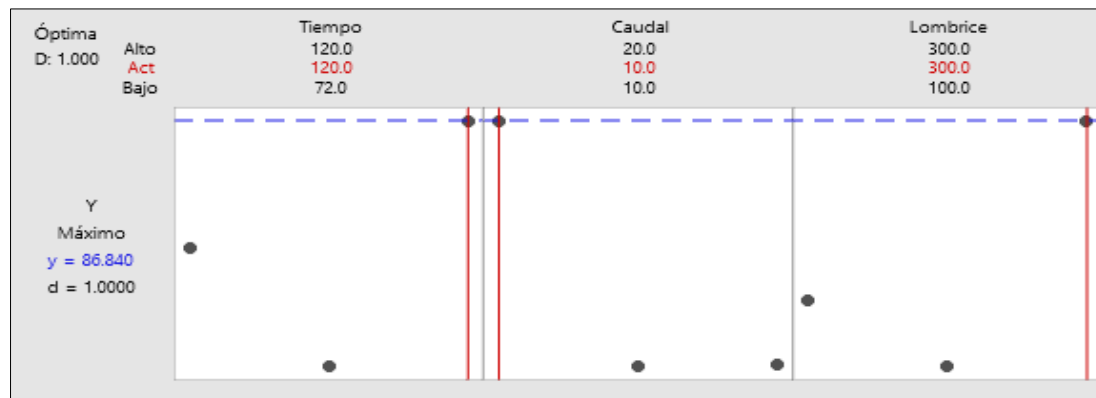
De acuerdo a la interpretación de los efectos se puede deducir que los 3 factores principales tienen mayor significación.

- El efecto de tiempo es de 6.420, es decir entre más sea el tiempo aumenta la reducción de la DBO₅, es un factor que influye en la aplicación del sistema vermifiltro.
- El caudal tiene un efecto de -7.330, entre menor sea el caudal la reducción de la DBO₅ se verá reflejada, es un factor que influye en la aplicación del sistema vermifiltro.
- El efecto de la cantidad de lombrices es de 5.570 influye de manera importante ya que es un factor influyente dentro del sistema vermifiltro para la reducción de la DBO₅.

Los factores para la eficiencia del vermifiltro fueron: (tiempo 120 horas) (caudal 10 ml/min) (300 lombrices)

Figura 22

Gráfica de optimización de las tres variables para el modelo matemático



Nota: Software Minitab

En la figura 22 se observa la combinación de los niveles de los factores la cual maximiza la reducción de DBO_5 con la aplicación del sistema vermifiltro, la región indicada de color azul y entre guiones representa la optimización, y esta obtiene cuando el tiempo (A) sea mayor 120 horas, un caudal (B) a 10 ml/min y una cantidad de lombrices (C) de 300 unidades.

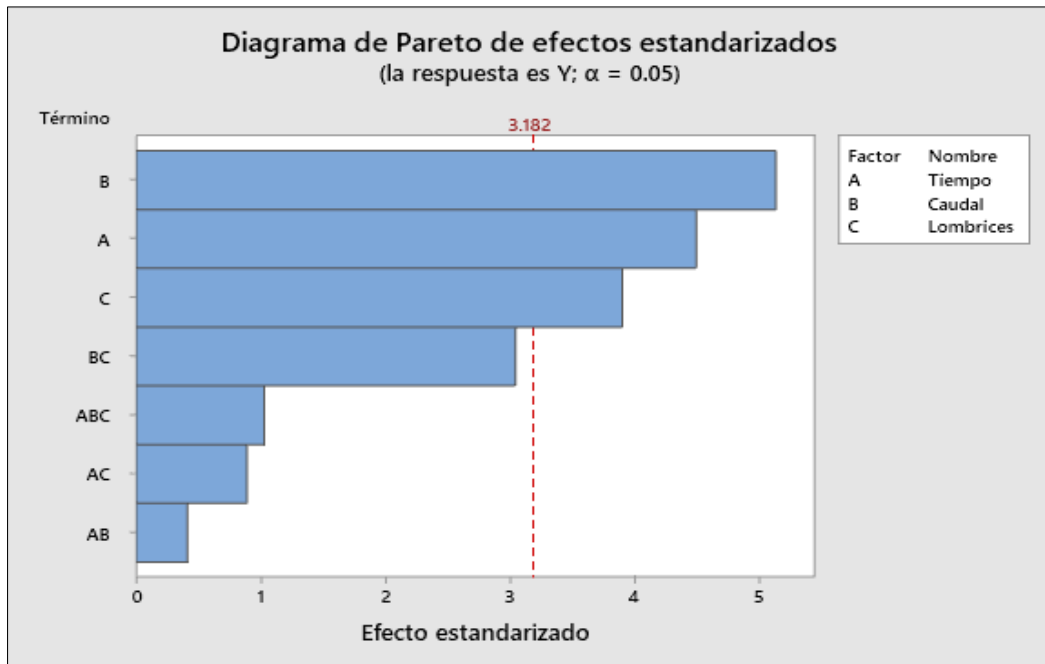
Análisis de reportes gráficos

El uso de gráficos estadísticos nos facilita la visualización del análisis de los efectos de cada factor de una manera más clara y sencilla. Para crear estos gráficos, se utilizó el software Minitab.

El gráfico más simple que ilustra el efecto es el diagrama de Pareto estandarizado, que se presenta en la figura 23. En este gráfico, se puede observar que las variables A (tiempo), B (caudal) y C (lombrices) tienen un impacto significativo en el modelo. También se destaca que la interacción entre estas variables es significativa, mientras que las interacciones entre las variables BC, AC y AB no son significativas dentro del modelo. Sin embargo, las interacciones de las tres variables son significativas para el modelo.

Figura 23

Diagrama de Pareto estandarizado para la aplicación del sistema vermifiltro



Nota: Software Minitab

V. Resultados y Discusión

Resultados

Resultado por Parámetros

En la tabla 16 se observa el resultado obtenido mediante el análisis químico DBO₅ inicial de agua residual de camal fue de 1729.06 mg/l además dentro de la característica físico químicas fueron las siguientes. (Ver el anexo 4)

Tabla 16

Resultados de los parámetros fisicoquímicos

Resultados Fisicoquímicos		
Ensayos (s)	Unidad	Resultados (s)
pH	Unidades de pH	7,40
DBO ₅	DBO ₅ , mg/L	1729,06
DQO	DQO as mg/L O ₂	2886,40
Sólidos totales en suspensión	STS mg/L	410,00
Oxígeno disuelto	mg/L	8,6
Conductividad	μS/cm	1052
Turbiedad	NTU	106
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	112,11
Cloruros	Cl ⁻ mg/L	89,97
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	588,06
Magnesio	mg/L Mg	156,22

Fuente: Informe del laboratorio Louis Pasteur

Los análisis físico-químicos, que abarcan parámetros como pH, turbidez, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales, entre otros, se realizaron antes de la aplicación con el sistema vermifiltro, y después del tratamiento con el sistema vermifiltro se analizó el parámetro de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅). Este análisis fue procesado por el laboratorio acreditado Louis Pasteur ubicado en Velasco Astete, Distrito de Wanchaq, en la ciudad del Cusco. (Ver anexo 4).

Determinación de la Eficiencia del Sistema Vermifiltro

Para evaluar el desempeño del sistema vermifiltro utilizando la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*), se determinó el porcentaje de eficiencia de los parámetros analizados según el diseño experimental. (Salazar, 2005)

Eficiencia en la DBO₅. Para calcular el porcentaje de eficiencia en la remoción de la DBO₅ utilizando la lombriz *Eisenia foetida*, se empleará la siguiente fórmula:

$$\% \text{Eficiencia} = \frac{\% (\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final})}{(\text{Concentración inicial})} \times 100$$

Tabla 17*Determinación de la eficiencia del sistema vermifiltro*

Sistema vermifiltro	Concentración DBO ₅ (mg/L) inicial	Factores			Concentración DBO ₅ (mg/L) FINAL	Eficiencia de reducción de la DBO ₅ (%)
		tiempo (horas)	caudal (ml/min)	lombrices californianas(und)		
R-1	1729.06	72	10	100	520.27	69.91
R-2		120	10	100	402.53	76.72
R-3		72	20	100	587.02	66.05
R-4		120	20	100	438.84	74.62
R-5		72	10	300	352.21	79.63
R-6		120	10	300	227.54	86.84
R-7		72	20	300	518.55	70.01
R-8		120	20	300	465.12	73.10
R-9		96	15	200	421.20	75.64
R-10		96	15	200	478.43	72.33
R-11		96	15	200	504.71	70.81
R-12		96	15	200	464.60	73.13

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), se alcanzó una eficiencia de reducción del 86,84%. La DBO₅ es un indicador que mide el oxígeno consumido por microorganismos, hongos y plancton durante la descomposición de materia orgánica, siendo así un parámetro clave para evaluar la calidad del agua. La notable disminución de este valor sugiere que el método de tratamiento utilizado es altamente efectivo.

Por ende, de acuerdo al Decreto Supremo N°010-2019-vivienda, que aprueba el reglamento de valores máximos admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. (Ministerio de Vivienda, 2013)

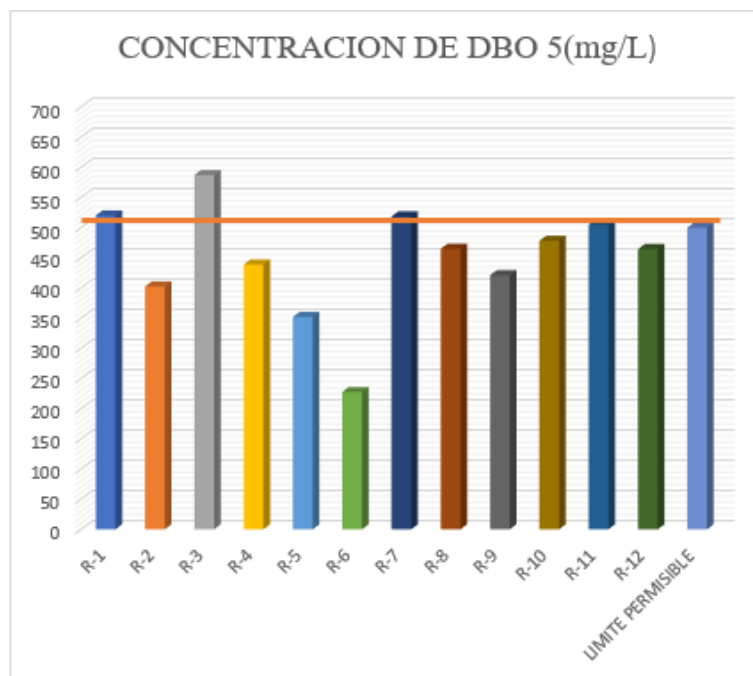
Tabla 18*Valores Máximos Admisibles*

Determinaciones	Unidad de Medida	Límite Máximo Permissible	Valores Hallados	Cumple o No con la Norma
DBO ₅	mg/L	500	1729,06	No
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	1000	2886,40	No
Sólidos totales en suspensión	mg/L	500	410,00	Si
pH	unidad	6.5-8.5	7,40	Si
Sulfatos	mg/L	1000	112,11	Si

Fuente: Decreto Supremo N°010-2019-Vivienda

La conclusión es que la DBO₅ medida excede los valores máximos admisibles (VMA).

De acuerdo a los resultados obtenidos de laboratorio la concentración final de DBO₅ fue la siguiente:

Figura 24*Concentración de la DBO₅ aplicando el sistema vermifiltro*

Fuente: Elaboración propia

El gráfico muestra que las muestras R-2, R-4, R-5, R-6 y R-8 están dentro de los límites aceptables para la concentración de DBO_5 en las aguas residuales del camal que se descargan. Este parámetro es fundamental para evaluar la calidad del agua, ya que indica la cantidad de oxígeno que los microorganismos requieren para descomponer la materia orgánica presente en las aguas residuales.

La reducción efectiva de DBO_5 no sólo demuestra la efectividad del vermifiltro, sino que también indica que el sistema cumple con los estándares ambientales y regulatorios para la descarga de aguas residuales tratadas, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la sostenibilidad del proceso de tratamiento, bajo la siguiente combinación de factores. Ver tabla 15.

Así mismo, se obtuvieron los siguientes modelos matemáticos:

- Ecuación del modelo matemático a escala codificada:

$$Y = 63.2 + 0.04 A - 0.80 B + 0.0303 C + 0.0098 A*B + 0.000654 A*C + 0.00153 B*C - 0.000061 A*B*C$$

- Ecuación del modelo matemático a escala natural:

$$Y = 74.610 + 3.210 A - 3.665 B + 2.785 C - 0.295 A*B - 3.210 A*C - 2.175 B*C - 0.735 A*B*C$$

Análisis y optimización. Establecer las variables A, B y C en cero establece una línea de base para evaluar el impacto de cada factor cuando está ausente. Los coeficientes positivos en la ecuación codificada para ciertos términos sugieren que hay margen para mejorar el proceso. Esto indica que ajustar o aumentar factores específicos podría mejorar la reducción de DBO_5 .

Implementación práctica. El modelo permite ajustar las variables del sistema de vermifiltro para maximizar la eficiencia de reducción de DBO_5 . La determinación de los valores ideales para los factores A, B y C mediante modelos matemáticos optimizará el proceso de tratamiento y aumentará la eficacia del sistema de vermifiltro para disminuir el contenido orgánico de las aguas residuales.

Discusión de Resultados

- **Objetivo general. Determinar la eficiencia de la aplicación de un sistema de vermifiltro en el tratamiento de aguas residuales proveniente del Camal Cusco, Distrito de San Jerónimo 2024.**

En el estudio realizado por Castillo & Chimbo (2021) determinaron la eficiencia de la aplicación de lombrifiltros, hallando una reducción de la DBO_5 y DQO, con un porcentaje superior al 50%. De igual manera, la investigación de Aldorarin & Quispe (2023), evidenciaron un eficiente tratamiento de aguas residuales con el uso del sistema Tohá y Wetland. En cambio, en la presente investigación la eficiencia de aplicar un sistema vermifiltro se demostró a través de la reducción de la DBO_5 con un porcentaje de 86.84%, en aguas residuales del Camal Cusco.

- **Objetivo específico 1. Determinar las características físico-químicas de las aguas residuales provenientes del Camal Cusco, antes de la aplicación del sistema de vermifiltro.**

Las características iniciales del agua residual del camal Municipal de la Provincia de Cusco fueron: DQO de 2886.40 mg/L, DBO_5 de 1729,06 mg/L. Diferentes autores estudiaron la remoción de DQO y DBO_5 de las aguas de camal, entre ellos Landeta (2019), quien trabajo a una concentración inicial de DQO de 5188 mg7L, de la misma manera, Amazonas, Romero y Campos (2022), trabajaron con concentración de DQO de 6219.60 mg/L y DBO_5 de 3993.99 mg/L. Estos valores

dependerán del lugar donde se encuentra el camal y la frecuencia con que realizan sus operaciones dentro del camal.

- **Objetivo específico 2. Determinar el mejor porcentaje de eficiencia para la materia orgánica biodegradable (DBO₅) de las aguas residuales del Camal Cusco aplicando el sistema vermifiltro.**

En esta investigación, la prueba R-6 demostró la mayor eficiencia, logrando una reducción de 227.54 mg/L en DBO₅. Este resultado es significativo para evaluar la efectividad del sistema de tratamiento utilizado. El sistema vermifiltro, que utiliza lombrices para tratar las aguas residuales, ha alcanzado su máximo rendimiento en esta prueba, con una eficiencia óptima del 86,84%, de acuerdo con Fernandez, et al (2022), ellos demostraron una reducción del 96% en la DBO₅ aplicando un tratamiento con lombrifiltro. Cabe señalar que el porcentaje de eficiencia para la materia orgánica evidencia un valor considerable de acuerdo a la bibliografía mencionada.

- **Objetivo específico 3. Precisar los factores más eficientes en el proceso de aplicación del sistema vermifiltro.**

Nuestro estudio ha proporcionado hallazgos valiosos sobre los factores clave que influyen en la eficiencia del sistema vermifiltro. La optimización de caudal, número de lombrices y tiempo, junto con la comprensión de sus interacciones, ofrece un camino prometedor para mejorar el tratamiento de aguas residuales mediante esta tecnología ecológica y sostenible. De acuerdo con Gamarra (2021) consideró como factores óptimos a su población de lombrices, tiempo y caudal para el funcionamiento de su sistema vermifiltro, cabe mencionar que este autor realizó la construcción de su sistema con la misma distribución de sus lechos filtrantes.

- ***Objetivo específico 4. Determinar el mejor modelo matemático aplicado en el sistema vermifiltro.***

Para optimizar y predecir el rendimiento del sistema vermifiltro, se sugiere utilizar el modelo matemático a escala natural, ya que al incorporar factores como caudal, tiempo y lombrices se puede simular el comportamiento del sistema vermifiltro en condiciones reales, para prever la respuesta de este sistema ante diferentes escenarios posibles.

VI. Conclusiones

Se determinó que la eficiencia de la aplicación de un sistema de vermifiltro en el tratamiento de aguas residuales provenientes del Camal Cusco, Distrito de San Jerónimo obtuvo una reducción de la Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO_5) con la combinación de las variables, tiempo (120 horas), caudal (10 ml/min) y la *Eisenia foetida* (300 unidades).

La caracterización físico-química de las aguas residuales del Camal Municipal del Cusco inicialmente presentaron niveles extremadamente altos de contaminantes. Estos valores de parámetros superaron significativamente los límites máximos permisibles establecidos por la normativa MINAN-2010. (Ver anexo 5)

El sistema de vermifiltro tuvo un resultado promedio para eliminar uno de los principales contaminantes de las aguas residuales del Camal Municipal del Cusco. El sistema logró una notable reducción del 86,84% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno, ya que en la DBO_5 inicial fue de 1729,06 mg/L y una vez aplicado el vermifiltro se redujo a 227,54 mg/L. (Ver anexo 5)

Las variables más influentes dentro del sistema de vermifiltro fueron tiempo (120 horas), caudal (10ml/min) y lombrices (300 unidades).

El mejor modelo matemático ajustado al sistema vermifiltro es la ecuación del modelo matemático a escala natural.

VII. Recomendaciones

Mantener condiciones óptimas (caudal de 10 ml, 120 horas, 300 lombrices) para una eficiencia sostenida.

Incentivar la adecuada disposición final y manejo de las aguas residuales del Camal Municipal del Cusco, a través de una canalización a la red de alcantarillado para prevenir la descarga de estas aguas al cuerpo de agua natural.

Se debe continuar realizando investigaciones sobre el tratamiento de aguas residuales de camales, ya que en la mayoría de sus componentes son orgánicos y podrían ser aprovechados.

Los estudios futuros deberían investigar el impacto de la utilización de diferentes especies de lombrices en los parámetros del agua contaminada con desechos de matadero.

Dada la naturaleza de bajo costo del sistema vermifiltro, es aconsejable explorar su aplicación para el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales.

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar análisis de parámetros adicionales, como el contenido de metales pesados, ya que no se incluyeron en esta investigación.

Considere la expansión del sistema o la integración de tecnologías adicionales si aumentan las cargas contaminantes.

La autoridad responsable, Seda Cusco, implemente un programa sistemático de monitoreo y evaluación regular de la calidad de los efluentes del Camal Municipal del Cusco, asegurando el cumplimiento de los valores máximos admisibles (VMA) y de salud pública, y permitir la adopción oportuna de acciones correctivas en caso de incumplimiento.

VIII. Referencias

- AGROFLOR. (1993). Manual lombricultura. *AGROFLOR-Manual lombricultura*, 4-6. Obtenido de file:///C:/Users/yaki/OneDrive/Escritorio/TESIS%20JACKI%20Y%20PATY/Bases%20Teoricas/Agroflor_Manual_De_Lombricultura.pdf
- Aldoradin, R., & Quispe, L. (2023). *Eficiencia del acoplamiento Wetland y Tohá en el tratamiento de las aguas residuales vertidas al canal Huanca, San Luis, Cañete 2023*. Título de Ingeniero Ambiental y Recursos Naturales, Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Callao.
- Arana, H. J. (2022). *Influencia del lombrifiltro en la remoción de la DBO5 y DQO de las aguas residuales domésticas para zonas rurales de la provincia de Cusco, departamento Cusco*. Título profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad Continental, Facultad de Ingeniería, Cusco. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11525/2/IV_FIN_107_TE_Arana_Llashag_2022.pdf
- Arias, Y., & Tiquillahuanca, Y. (2018). *Aplicación del sistema Tohá para el tratamiento de riles generados en la planta Agromar Industrial S.A. Sullana*. Título de Ingeniero Agroindustrial y Comercio Exterior, Universidad Señor de Sipan, Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Pimentel.
- Arminta, L. M., & Vargas, D. N. (2022). *“Extracción de oro del mineral aurífero por lixiviación en columnas con reactivos bromuro de potasio y ácido bromhídrico de la minera Utunsa-Anabi-Apurimac*. Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, Universidad San Antonio Abad del Cusco, Facultad de Ingeniería, Cusco.

Obtenido de
 file:///C:/Users/yaki/Downloads/tesis%202022%20%20AL%2099,95%20%25.pdf

Banco Mundial. (19 de Marzo de 2020). *Banco Mundial BIRF AIF*. Recuperado el 6 de Marzo de 2024, de <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>

Bermudez, G. (2019). *Tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Chimbote, usando un biofiltro de lombrices, para el riego de parques y jardines*. Título de Ingeniero Civil, Universidad San Pedro, Facultad de Ingeniería, Chimbote.

Bobenrieth, R., Beltran, F., & Arenas, A. (3 de Marzo de 1985). Saneamiento de Mataderos de Bovinos, Ovinos y Porcinos. *Boletín panamericano de sanidad de la oficina sanitaria internacional*, 3, 211. Obtenido de <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/16953/v98n3p211.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bravo, M. A. (2019). *Diseño y evaluación del uso de lombrifiltro como alternativa al tratamiento de líquidos industriales en el proceso de producción de carragenina*. Título de Ingeniero Civil Químico, Universidad del Bio-Bio, Facultad de Ingeniería, Concepción. Obtenido de http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/3456/3/Bravo_Marinni_Marcelo_Andr%c3%a9s.pdf

Bruce, P., Bruce, A., & Gedek, P. (2020). *Practical Statistics for Data Scientists*. (N. Tache, Ed.) Sebastopol, California, United States of America: O'Reilly Media,

Inc. Obtenido de
 file:///C:/Users/yaki/OneDrive/Escritorio/TESIS%20JACKI%20Y%20PATY/pa
 rte%20estadistica,%20escalas.pdf

Caicedo, J. A. (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, ganaderia, acuacultura y pesca, Riobamba 2015*. Título de Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/6321/1/236T0256.PDF>

Castillo, J. G., & Chimbo, J. E. (2021). Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales. *Scielo*, 12, 80-99. Obtenido de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-65422021000200080&script=sci_arttext

Castro, E. (2019). *Estudio de viabilidad técnica y económica de la implementación del sistema Tohá (lombrifiltro) para el tratamiento de las aguas residuales en el municipio de Tinjacá-Boyacá*. Título de Ingeniería Ambiental, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Tinjacá-Boyacá. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/f09ddf59-f087-42ce-8c1f-d201ae64f47b/content>

Coronel, N. (2015). *Diseño e implementación a escala de un biofiltro Tohá en la Espoch para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad*

Langos La Nube. Título de Ingeniera en Biotecnología Ambiental, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba.

Crane, M., & de Bortoli, M. (2020). *Water Quality: Guidelines, Standards and Health*. IWA Publishing. Obtenido de https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf

de Lima Rodrigues, A. S., Mesak, C., Gomes, M. L., Souza, G., Mozena, W., & Malafaia, G. (1 de Julio de 2017). Organic waste vermicomposting through the addition of rock dust inoculated with domestic sewage wastewater. *ELSEVIER*, 196, 651-658. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479717302876?via%3Dihub>

Dean, D., & Bertrand, C. (2022). *Testing for the Important Components of Predictive Variance*. University of Nebraska-Lincoln, Department of Statistics, Nebraska. Obtenido de https://statistics.unl.edu/Dustin_Clarke_Rev%201.pdf

Espinoza, L. (2022). *Modernización del camal municipal Saposo implementando una planta de tratamiento de aguas residuales*. Magister en Gestión Ambiental, Universidad Nacional Federico Villareal, Facultad de Postgrado, Lima.

FAO. (1993). Finalidad y Categoría de los Mataderos. En O. d. Agricultura, *Estructura y funcionamiento de mataderos medianos en países en desarrollo*. Roma, Italia: Estudio FAO Producción y Sanidad Animal 87.

FAO. (2 de Mayo de 2018). *Food and Agriculture Organization of United Nations*. Recuperado el 6 de Marzo de 2024, de Polluting our soils is polluting our future: <https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1126974/>

- Fernandez, C., Ordoñez, P., & Santos, J. (2022). *Tratamiento de lombrifiltro para la reducción de DQO y DBO5 del efluente industrial de una planta de confitería*. 2022. Título de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, Universidad Nacional del Callao, Facultad de Ingeniería, Callao.
- Gamarra, B. (2021). *Eficiencia del sistema de vermifiltro en la depuración de contaminantes críticos de aguas residuales domésticas en la comunidad La Punta- Sapallanga*. Título de Ingeniero Ambiental, Universidad Continental, Facultad de Ingeniería.
- Guzman, G. (2004). *Estudio de Factibilidad de la aplicación del sistema Tohá en la planta de tratamiento de aguas servidas de Valdivia*. Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia.
- Hernandez Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mexico D.F., Mexico: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. Obtenido de <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Hernandez, A., Moreno, S., & Herazo, S. (20 de Diciembre de 2017). Tratamiento de aguas residuales industriales en Mexico: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. *Revista Internacional de Desarrollo Internacional Sustentable*. Obtenido de <file:///C:/Users/yaki/OneDrive/Escritorio/TESIS%20JACKI%20Y%20PATY/Bases%20Teoricas/27-138-1-PB.pdf>

- INIA. (2008). Conservación in situ de los cultivos nativos y sus parientes silvestres. *Producción y uso del humus de lombriz, 2 Tecnologías apropiadas para la conservación in situ de los cultivos nativos*, 1-4. Obtenido de https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/119/1/Humus_de_lombriz_Lima_2008.pdf
- Landeta, F. (2019). *Evaluación de la Eficiencia de un Sistema de Vermifiltros en el tratamiento de Aguas Residuales del Camal de Ibarra*. Tesis de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad en Ciencias Agrícolas y Ambientales, Ibarra.
- Largo, C. M. (2022). *Revisión sistemática de parámetros de diseño y operación de vermifiltros a escala laboratorio para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Título de Ingeniero Ambiental, Universidad Católica de Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Manizales. Obtenido de https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/3553/1/Revision_sistemica_parametros_diseno_operacion_vermifiltros_escala_laboratorio_tratamiento_aguas_residuales_domesticas.pdf
- Liberio, F. (2018). *Incidencia de lombriz roja californiana (Eisenia Foetida) y lenteja de agua (Lemna Minor) en el tratamiento de aguas residuales urbanas en el canton Quevedo*. Título de Maestría, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Unidad de Postgrado, Quevedo.
- Mafla, T. (2008). *Funcionamiento del camal municipal de rastro. Propuestas para el mejoramiento en la higiene y salubridad, Ibarra/2008*. Título de Tecnólogo en Saneamiento Ambiental, Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ciencias de Salud, Ciudad.

- Martinez, A. D. (2016). Evaluacion del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. En I. T. Rica, *Tecnologia en Marcha* (págs. 63-72). Cartago, Costa Rica.
- Metcalf & Eddy, INC. (1995). Introducción al proyecto de plantas de tratamiento de agua residual. En I. Metcalf & Eddy, *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización* (Vol. 3, págs. 169-191). Madrid: Antonio Garcia Brage.
- Ministerio de Salud. (2010). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*. Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, Ministerio de Salud , Dirección General de Salud Ambiental , Lima. Obtenido de http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf
- Ministerio de Vivienda. (2013). *Resolución Ministerial N°273-2013-VIVIENDA*. Resolución Ministerial, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Lima. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/272120-010-2019-vivienda>
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2013). *Aprueban el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Efluentes de las*. Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. Lima: Diario oficial "El Peruano". Recuperado el 12 de Marzo de 2024, de <file:///C:/Users/yaki/OneDrive/Escritorio/TESIS%20JACKI%20Y%20PATY/Bases%20Teoricas/Marco%20Conceptual/RM-273-2013-VIVIENDA.pdf>
- Montgomery, D. (2019). *Design and Analysis of Experiments* (Vol. 9). Arizona, United States of America: WILEY. Obtenido de

file:///C:/Users/yaki/OneDrive/Escritorio/TESIS%20JACKI%20Y%20PATY/Otros%20conceptos/Analissi%20de%20varianza.pdf

Montoya, D. (2014). *Diseño metodológico para el análisis de eficiencia de los estudiantes del programa de ingeniería comercial de la Universidad Libre Seccional Pereira*. Título de Magister en Investigación operativa y estadística, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Industrial, Pereira. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/3d323ef4-eec4-414a-9f62-5c294cfa4114/content>

Municipalidad Provincial del Cusco. (9 de Agosto de 2024). *Municipalidad Provincial del Cusco*. Obtenido de Sub Gerencia del Camal Municipal: <https://cusco.gob.pe/gerencia-de-desarrollo-economico-y-servicios-municipales/sub-gerencia-de-camal-municipal/>

Ñaupas, H. (2014). *Metodología de la investigación cuantitativa cualitativa y redacción de la tesis* ((Quinta edi; Ediciones U, Ed.) ed.). Bogota, Colombia: Ediciones de la U.

OEFA. (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Obtenido de Definición de aguas residuales: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827

Osorio, M. &. (1 de Marzo de 2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento*, 6(3). Obtenido de <file:///C:/Users/yaki/OneDrive/Escritorio/TESIS%20JACKI%20Y%20PATY/Bases%20Teoricas/Dialnet-LaCalidadDeLasAguasResidualesDomesticas-7926905.pdf>

Paucar, F., & Iturregui, P. (30 de Marzo de 2020). Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú. (U. C. Sur, Ed.) *SOUTH SUSTAINABILITY*, 1(1), 10.

- Obtenido de
file:///C:/Users/yaki/Downloads/4_Revisi%C3%B3n_FPaucar_SOUTH+1-1.pdf
- Quiroz, N. J. (2019). *Estudio de la remoción de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de un filtro biológico a partir de lombrices californianas (Eisenia Foétida)*. Título de Ingeniero Ambiental, Universidad de Pamplona Colombia, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona Norte de Santander. Obtenido de
http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/8463/1/Quiroz_2019_TG.pdf
- Ramón, J. A., León, J. A., & Castillo, N. (enero-junio de 2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamien-to de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie Eise-nia foetida. *MUTIS*, 5, 46-54. Obtenido de
<https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1018/1053>
- Riveros, A. (2021). *Eficiencia del sistema Tohá y canal de fitodepuración en la reducción de la DBO5, DQO y SST de aguas residuales provenientes del camal municipal de la provincia de Calca-Cusco 2021*. Titulo de Ingeniero Ambiental, Universidad Cesar Vallejo, Faculta de Ingenieria y Arquitectura, Lima.
- Rojas, D. (2020). *Estudio de filtros biologicos para aguas grises utilizando lombriz rojas californianas (Eisenia foetida)*. Titulo en Control del Medio Ambiente, Universidad Tecnica Federico Santa Maria, Viña del Mar.
- Romero, R., & Campos, R. (4 de Agosto de 2022). Eficiencia del sistema Tohá en la depuración de efluentes del camal municipal, Bagua, Amazonas, 2021. *Revista*

- Científica UNTRM*, 55-61. Obtenido de <https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/CNI/article/view/890/1318>
- Salazar, P. I. (2005). *Sistema Tohá; una alternativa ecologica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales*. Titulo de Constructor Civil, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingenieria, Chile. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmficis161s/doc/bmficis161s.pdf>
- Samal, K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (Agosto de 2018). A comparative study of macrophytes influence on performance of hybrid vermifilter for dairy wastewater treatment. *ELSEVIER*, 6, 4714-4726. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221334371830397X?via%3Dihub>
- SENASA. (10 de Noviembre de 2012). *Plataforma digital unica del Estado Peruano*. Obtenido de Normas y documentos legales: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1117335/DS_015_2012_AG-REGLAMENTO-SANITARIO-DEL-FAENADO-DE-ANIMALES-DE-ABASTO20200731-107894-pad8u9.pdf?v=1596210511
- SENASA. (2 de 12 de 2014). *Ministerio de Agricultura y Riego*. Recuperado el 5 de Marzo de 2024, de Servicios Senasa- Servicio Nacional de Sanidad Agraria: https://servicios.senasa.gob.pe/SIGIAWeb/ino_consultasmadero.html
- Tchobanoglous, G., & Kremer, F. (2022). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (Vol. 5). Jakarta, Indonesia.
- Umasi, E. (2020). *Evaluación de la eficiencia de un lombrifiltro (tres capas) para el tratamiento de aguas residuales domesticas en el distrito de Cusipata, Cusco*.

Titulo de Ingeniero Ambiental, Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Juliaca.

Universidad Nacional Agraria. (2004). Guia de Lombricultura. *Guia de Lombricultura*(4), 6-9. Obtenido de file:///C:/Users/yaki/OneDrive/Escritorio/TESIS%20JACKI%20Y%20PATY/Bases%20Teoricas/nf04s693.pdf

Valdez, E., & Vazquez, A. (2003). Características de las aguas residuales. En F. ICA, *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales* (págs. 29-33). Mexico D.F., Mexico.

Vergara, W. (2016). *Eficiencia Técnica en los servicios de los camales del departamento del Cusco 2016*. Doctorado en Administración , Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Escuela de Postgrado, Cusco.

Anexos

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes