

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Evaluación de la remoción de DBO y DQO presente en aguas
residuales de camales, mediante el proceso de vermifiltración
asistido con tapas PET y esponjas de poliuretano**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Luz Angeles Roxana Chagua Reyes
Maritza Condori Huancapaza
Oscar Quispe Apaza

Asesor:

Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga

Lima, 22 abril del 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Milda Amparo Cruz Huarnaga, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“Evaluación de la remoción de DBO y DQO presente en aguas residuales de camales, mediante el proceso de vermifiltración asistido con tapas PET y esponjas de poliuretano.”** constituye la memoria que presenta los Bachilleres (Luz Angeles Roxana Chagua Reyes, Maritza Condori Huancapaza y Oscar Quispe Apaza para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 22 días del mes de abril del año 2022.



Nombres y apellidos del asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 22 días día(s) del mes de abril del año 2022 siendo las 09:30 horas, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Iliana del Carmen Gutiérrez Rodríguez**, el secretario: **Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio**, y los demás miembros: **Ing. Joselyn Dianella Torres Guerra** e **Ing. Ferrer Canaza Rojas** y el asesor, **Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Evaluación de la remoción de DBO y DQO presente en aguas residuales de camales, mediante el proceso de vermifiltración asistido con tapas PET y esponjas de poliuretano"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **OSCAR QUISPE APAZA**

.....b) **LUZ ANGELES ROXANA CHAGUA REYES**

.....c) **MARITZA CONDORI HUANCAPAZA**

conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **OSCAR QUISPE APAZA**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

Candidato (b): **LUZ ANGELES ROXANA CHAGUA REYES**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente


Candidato (c): **MARITZA CONDORI HUANCAPAZA**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	18	A-	Muy Bueno	Sobresaliente

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Mg. Iliana del Carmen
Gutiérrez Rodríguez



Secretario
Mg. Jackson Edgardo
Pérez Carpio

Asesor
Mg. Milda Amparo
Cruz Huaranga

Miembro
Ing. Jocelyn Dianella
Torres Guerra

Miembro
Ing. Ferrer Canaza
Rojas



Candidato/a (a)
Oscar



Candidato/a (b)
Luz Angeles



Candidato/a (c)
Maritza

Evaluación de la Remoción de DBO y DQO presente en Aguas Residuales de Camales, mediante el Proceso de Vermifiltración Asistido con Tapas PET y Esponjas de Poliuretano

Evaluation of the Removal of BOD and COD present in Residual Waters of Camales, by means of the Assisted Vermifiltration Process with PET Lids and Polyurethane Sponges

Autores:

Nombre: Luz Angeles Roxana Chagua-Reyes (Filiación de autoría: Chagua-Reyes, L.A.)

Categoría profesional: Investigador independiente egresado de Facultad de Ingeniería y Arquitectura – Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

Institución: Universidad Peruana Unión.

Dirección postal: Jr. Cuzco S/N, Carhuamayo, Junín, Perú.

Email: angeleschagua@upeu.edu.pe

Teléfono: 957680574

Nombre: Maritza Condori-Huancapaza (Filiación Autor: Condori-Huancapaza, M.)

Categoría Profesional: Investigador Independiente Egresado de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura – Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Institución: Universidad Peruana Unión.

Dirección postal: Av. Bernardo Balaguer, Ñaña, Lurigancho, Lima, Perú.

Email: maritza.ch@upeu.edu.pe

Teléfono: 957400470

Nombre: Oscar Quispe-Apaza (Filiación de autoría: Quispe-Apaza, O.)

Categoría profesional: Investigador Independiente Egresado de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Institución: Universidad Peruana Unión

Dirección postal: Av. Bernardo Balaguer, Ñaña, Lurigancho, Lima, Perú.

Email: oscarquispe@upeu.edu.pe

Teléfono: 953406479

Luz A. Chagua-Reyes^{1*}, Maritza Condori-Huancapaza², Oscar Quispe-Apaza³

^{1,2,3} Investigador Independiente Egresado de la Facultad de Ingeniería Arquitectura – Universidad Peruana Unión

angeleschagua@upeu.edu.pe, maritza.ch@upeu.edu.pe, oscarquispe@upeu.edu.pe

RESUMEN

La vermifiltración es una tecnología emergente de bajo costo y ambientalmente sustentable para el tratamiento de aguas residuales. En este estudio se evaluó la remoción de DBO y DQO en tres vermifiltros utilizando diferentes medios filtrantes (piedras, tapas PET y esponjas de poliuretano) y la lombriz de la especie *eisenia foétida*. Las dimensiones de los vermifiltros son 0.6m x 0.32m x 0.32m, con un Q de 15.2 L/h y un TRH de 3.7 h. Las condiciones de pH y T° en esta investigación son de 6.42 a 7.09 y 19°C±4. Los porcentajes de remoción para DBO, DQO, SST, PT y NT fueron: 94.5%, 90.4%, 93.9%, 68.3% y 40.9% (VF1), 96.8%, 92.2%, 97.5%, 70% y 53.2% (VF2) y 95.1%, 91.7%, 97.0%, 66.4% y 44.0% (VF3), respectivamente. Se concluye que el VF2 asistido con tapas PET presentó una alta reducción de la materia orgánica, a pesar de que todos los tratamientos cumplen con el LMP para camales y plantas de beneficio, excepto el NT, aunque mostró una buena remoción.

Palabras clave: vermifiltración, *eisenia foétida*, tapas PET, esponjas de poliuretano.

ABSTRAC

Vermifiltration is an emerging low-cost and environmentally sustainable technology for wastewater treatment. In this study, the removal of BOD and COD was evaluated in three vermifilters using different filter media (stones, PET lids and polyurethane sponges) and the *Eisenia foetida* earthworm. The dimensions of the vermifilters are 0.6m x 0.32m x 0.32m, with a Q of 15.2 L/h and a TRH of 3.7 h. The pH and T° conditions in this investigation are from 6.42 to 7.09 and 19°C±4. The removal percentages for BOD, COD, TSS, PT and NT were: 94.5%, 90.4%, 93.9%, 68.3% and 40.9% (VF1), 96.8%, 92.2%, 97.5%, 70% and 53.2% (VF2) and 95.1%, 91.7%, 97.0%, 66.4% and 44.0% (VF3), respectively. It is concluded that the VF2 assisted with PET lids presented a high reduction of organic matter, despite the fact that all the treatments comply with the LMP for slaughterhouses and processing plants, except for the NT, although it showed a good removal.

Keywords: vermifiltration, *eisenia foetida*, PET caps, polyurethane sponges.

INTRODUCCIÓN

El distrito de Ilave, Provincia de El Collao - Puno, se encuentra a una altitud de 3862 msnm, cuenta con un Camal Municipal, donde se sacrifican alrededor de 150 animales diarios, entre ovinos, porcinos y bovinos (Quilla, 2015); generando una gran cantidad de residuos líquidos, los cuales pasan por pozos de sedimentación que son vertidos al río Ilave.

Desde el funcionamiento de los pozos de sedimentación, no se realizó el mantenimiento adecuado, ocasionando deficiencias en el tratamiento de las aguas residuales, evidenciado en el monitoreo realizado por (Yanes, 2019) administrador del camal Municipal de la Provincia de El Collao - Ilave, obteniendo niveles altos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), con valores de 3200 mg/L y 5150 mg/L.

Como consecuencia del vertido del efluente con altos valores de carga orgánica, se ocasiona impactos negativos en el ambiente por la proliferación de malos olores, filtración de aguas contaminadas; afectando a la salud pública por presencia de aves carroñeras, roedores e insectos que producen enfermedades influyendo en la calidad de vida de los trabajadores y de las comunidades aledañas (Cun & Álvarez, 2017).

Es así que surgen tecnologías viables de tratamiento de aguas residuales, tal como la vermifiltración (Adugna et al., 2019); este sistema abarca todas las formas de tratamiento, es decir, tecnología de tratamiento primario (eliminación de arena, limo, etc.), secundario (degradación biológica y eliminación de nutrientes) y terciario (recuperación de nutrientes) en una sola unidad (Arora et al. 2021). Además, es una tecnología económicamente asequible y ambientalmente sostenible (Singh, Samal, et al., 2019).

Arora & Saraswat, (2021) menciona que esta tecnología elimina diversos parámetros tales como: bioquímica de oxígeno - DBO₅, Demanda química de oxígeno - DQO, Fósforo total - PT, Nitrógeno total - NT y Sólidos suspendidos totales - SST, Manyuchi et al., (2019) en su investigación lograron una remoción que oscilan entre 70% y 90%.

Durante el proceso de vermifiltración, se utilizan las lombrices de la especie *Eisenia Foetida* (Manyuchi et al., 2018), las cuales son las encargadas de degradar la materia orgánica presente en las aguas residuales, a través de la actividad enzimática, reduciendo los parámetros fisicoquímicos y patógenos (Singh, Samal, et al., 2019) Según Singh et al., (2021) las condiciones óptimas para el desarrollo de la *eisenia foetida* son: temperatura de 15 a 25°C, humedad de 75 a 85% y pH de 7.5±0.5.

Otro aspecto importante para la eficiencia del sistema de vermifiltración es el TRH, Arora et al., (2021) menciona puede oscilar entre 3,5 y 8 h dependiendo de las dimensiones del vermifiltro, asimismo es importante la

composición de las capas, ya que retienen los contaminantes presentes en el agua residual, de acuerdo a las características que cada una tiene (Singh et al., 2021).

La viruta sirve como soporte y alimento para las lombrices cuando el afluente no contenga mucha materia orgánica (Adugna et al., 2019). El carbón cumple la función de adsorber grasas, aceites y olor (Samal et al., 2017). La arena retiene las partículas más pequeñas y favorece el crecimiento de biomasa microbiana (Lourenço & Nunes, 2017). La piedra, las tapas PET y las esponjas de poliuretano favorecen a la generación de biopelículas ayudando en la remoción y reducción de material particulado y carga orgánica (García et al., 2021).

Por lo expuesto, el objetivo de esta investigación es evaluar la remoción de DBO y DQO presente en aguas residuales de camales, mediante el proceso de vermifiltración asistido con tapas PET y esponjas de poliuretano. Para este propósito se optimizó el vermifiltro, utilizando 6 diferentes materiales filtrantes accesibles y rentables.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el camal municipal de Ilave, ubicado en la región Puno, Provincia de El Collao, distrito de Ilave, a una altitud de 3862 msnm, coordenadas UTM (E: 434098, N:8221909).

Adaptación y densidad de las lombrices.

Se adquirió ½ Kg de *eisenia foétida* para el proceso de adaptación por un periodo de 15 días. Este proceso consistió en regar diariamente 1 litro de agua residual del camal a un recipiente con sustrato (humus + viruta) donde habitaban todas las lombrices; el recipiente tenía agujeros en la base y una malla Raschell.

Terminado el tiempo de adaptación, se colocaron 226 lombrices en cada filtro, con un peso de 34 gr, 35 gr y 37 gr para los vermifiltros VF1, VF2 y VF3 respectivamente.

Calculado con la siguiente ecuación

$$D = 10000 \frac{\text{lom}}{\text{m}^3} \times \text{Vol. de la 1}^\circ \text{ capa} \quad \text{Ecuación 1}$$

Diseño y construcción del Vermifiltro

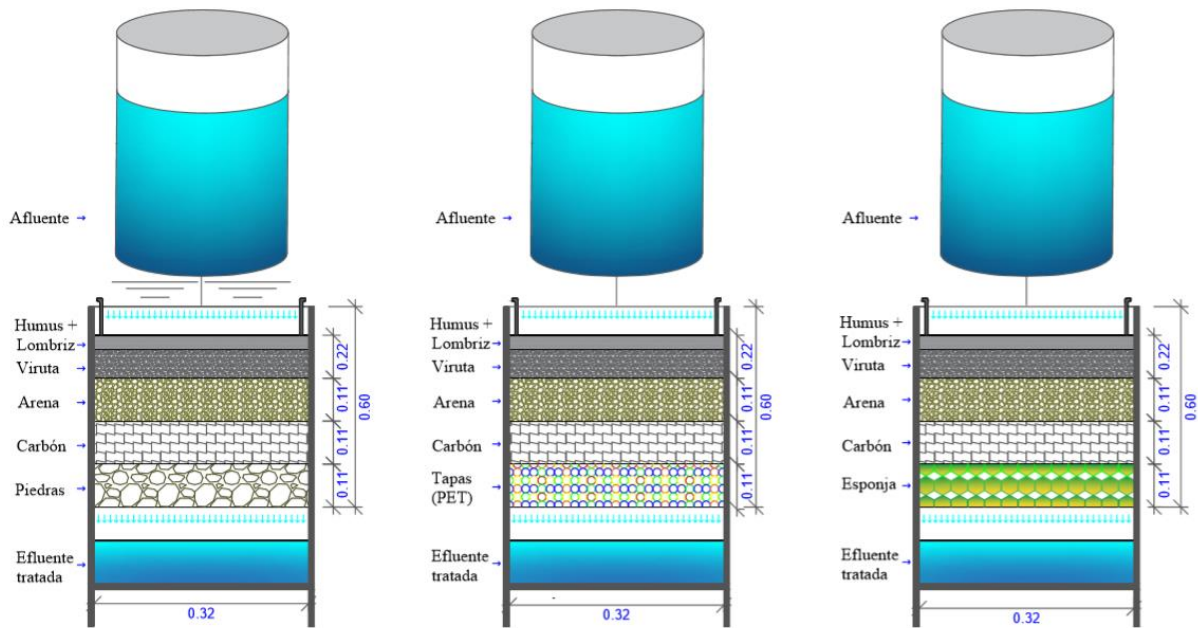
Para el tratamiento de las aguas residuales del camal, se realizó la construcción de 3 filtros, con dimensiones de 60 cm de altura, 32 cm de ancho y 32 cm de largo. Cada filtro está constituido por diferentes capas, como se señala en la figura 1.

Para hallar la altura de las capas, Zhao & Liu, (2019) menciona que el 40% del vermifiltro debe estar contenida por la parte biológica (humus, lombrices y aserrín), es decir la primera capa; mientras que el 60% restante se debe dividir entre las capas restantes (carbón, arena, piedras, etc).

Ecuación calcular las capas:

$$\text{Capa} = \frac{\% \text{total de la capa} \times \text{altitud útil del biofiltro}}{100\%} \quad \text{Ecuación 2}$$

Figura 1
Estructura del lombrifiltro



Fuente: elaboración propia.

Medición del caudal y tiempo de retención hidráulica.

El caudal se halló con el método volumétrico, manipulando la llave de control a 3 diferentes aberturas (25%, 50% y 100%). Este método consistió en medir el tiempo que demora en llenar el agua en un recipiente; la relación de estos dos valores permite conocer el caudal, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{T} \quad \text{Ecuación 3}$$

El tiempo de retención hidráulica (TRH) óptima para esta investigación es de 3.7 hrs con un volumen (V) útil del filtro de 0.056 m³ y un caudal (Q) de 15.2 L/h, calculada con la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 4}$$

Análisis del afluente y efluente del sistema

Al inicio del funcionamiento del vermifiltro se realizó el monitoreo la temperatura y pH por un periodo de 42 días y se recolectó las muestras del efluente en tres diferentes fechas (02, 16 y 28 de diciembre del 2021), correspondiente a R1, R2 y R3.

De las muestras recolectadas del afluente y efluente se analizaron parámetros de demanda DBO, DQO, PT, NT y SST. Todos los parámetros fueron analizados de acuerdo con los Métodos Estándar para el análisis de aguas residuales (APHA).

Procesamiento de datos

La eficiencia de remoción final para cada parámetro, se determinó usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ eficiencia} = \frac{C_{Inicial} - C_{final}}{C_{Inicial}} \times 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Se utilizó Software IBM SPSS Statistics 26.0, para el análisis de varianza ANOVA de un factor, analizando la normalidad con el test de shapiro wilk, homogeneidad de varianzas (estadístico de Levene) y la prueba de rango múltiple de Duncan para las diferencias significativas en los vermifiltros considerando un $p < 0.05$.

RESULTADOS

Densidad de lombrices *eisenia foétida* por vermifiltros

Tabla 1

Densidad de lombrices antes y después del tratamiento

Tratamientos	Inicial		Final		Incremento de biomasa
	Peso (g)	N° lombrices	Peso (g)	N° lombrices	
VF1	34	226	136	342	300.0 %
VF2	35	226	147	306	320.0 %
VF3	37	226	134	328	262.2 %

Fuente: elaboración propia, 2022.

Caracterización fisicoquímica del afluente y efluente

La tabla 2 muestra la caracterización inicial de las aguas residuales del camal municipal de Ilave, se observa que el PT cumple con los Límites Máximos Permisibles para camales, mientras que las concentraciones de DBO₅, DQO, NT y SST se encuentran por encima de la normativa. Esto debido a las grandes cantidades de sangre, materia fecal, grasas, proteínas e insumos de limpieza y desinfección (Medina et al., 2020).

Tabla 2

Composición fisicoquímica inicial de las aguas residuales del camal municipal de Ilave

Parámetro	Unidad	Valores Iniciales	LMP
DBO ₅	mg/L	3700.0	250
DQO	mg/L	5100.0	500
PT	mg/L	29.1	40
NT	mg/L	291.4	50
SST	mg/L	1420.0	300
T	°C	7.7	-
pH	-	22.7	6-7

Fuente: elaboración propia, 2022.

Tabla 3

Composición fisicoquímica del efluente de los vermifiltros

Tratamientos	Replicas	DBO ₅	DQO	PT	NT	SST	T	PH
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	°C	
VF1	R1	205.0	470.8	9.7	175.4	56.0	18	6.2
	R2	207.5	497.3	9.7	178.1	61.0	16.5	6.86
	R3	205.1	489.4	9.2	174.1	57.0	22	6.88
VF2	R1	132.8	388.7	9.2	139.9	38.0	18	6.26
	R2	137.0	406.8	9.4	142.0	41.0	16.5	6.89
	R3	120.0	395.8	8.7	136.2	36.0	22	6.92
VF3	R1	188.0	417.7	9.7	165.0	44.0	18	6.55
	R2	198.5	435.5	9.9	167.7	46.0	16.5	6.92
	R3	180.3	422.5	9.8	163.2	42.0	22	6.94

Fuente: elaboración propia, 2022.

En la tabla 3 se observa que los tres vermifiltros presentan resultados similares en sus tres réplicas. A los 16 primeros días se obtuvo una remoción significativa a comparación de los valores iniciales, a los 30 días se continuo

con el tratamiento para contrastar los resultados obtenidos. Finalmente, a los 42 días se corroboró que los vermifiltros continuaban reduciendo las concentraciones en todos los parámetros.

Análisis estadístico

Tabla 4

ANOVA de los parámetros fisicoquímicos

Parámetros		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
DBO5	Entre grupos	9533.609	2	4766.804	87.261	,000
	Dentro de grupos	327.76	6	54.627		
	Total	9861.369	8			
DQO	Entre grupos	12337.449	2	6168.724	52.413	,000
	Dentro de grupos	706.173	6	117.696		
	Total	13043.622	8			
PT	Entre grupos	0.712	2	0.356	5.237	,048
	Dentro de grupos	0.408	6	0.068		
	Total	1.12	8			
NT	Entre grupos	2115.922	2	1057.961	176.332	,000
	Dentro de grupos	35.999	6	6		
	Total	2151.921	8			
SST	Entre grupos	614.889	2	307.444	53.212	,000
	Dentro de grupos	34.667	6	5.778		
	Total	649.556	8			

Fuente: elaboración propia, 2022.

En los resultados del análisis de varianza (ANOVA) se encontró que el valor p o valor de probabilidad del modelo es menor a 0.05 lo que indica que la media de los tratamientos de los vermifiltros posee una diferencia significativa entre sus medias.

Tabla 5

Comparación de medias de los parámetros en cada vermifiltro

Tratamientos	DBO	DQO	SST	PT	NT
VF1	205.8667	485.8333	58.0000	9.5283	175.8710
VF2	129.9333	397.1000	38.3333	9.0977	139.3703
VF3	188.9333	425.2333	44.0000	9.7787	165.2847

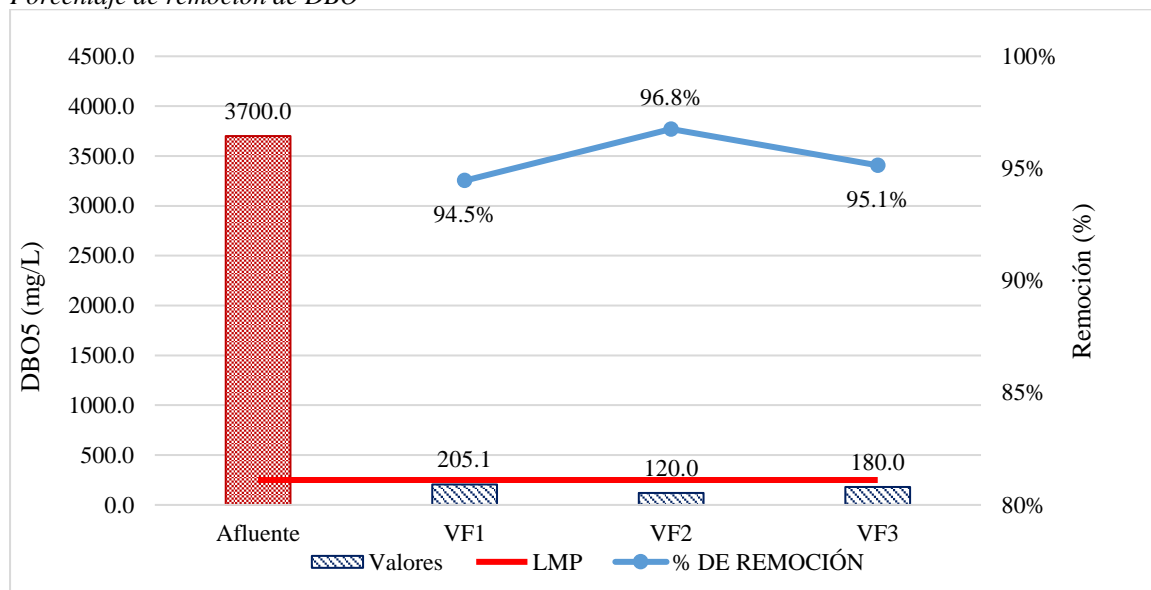
Fuente: elaboración propia, 2022.

En la tabla 5 se observa que la media del VF2 tiene los valores más bajos de todos los parámetros, seguida por el VF3 y finalmente VF1, confirmando así la similitud con los valores obtenidos en la tercera replica, por ello se procedió a trabajar con los resultados de la tercera replica.

Resultados aplicando los vermifiltros VF1, VF2 y VF3

Figura 2

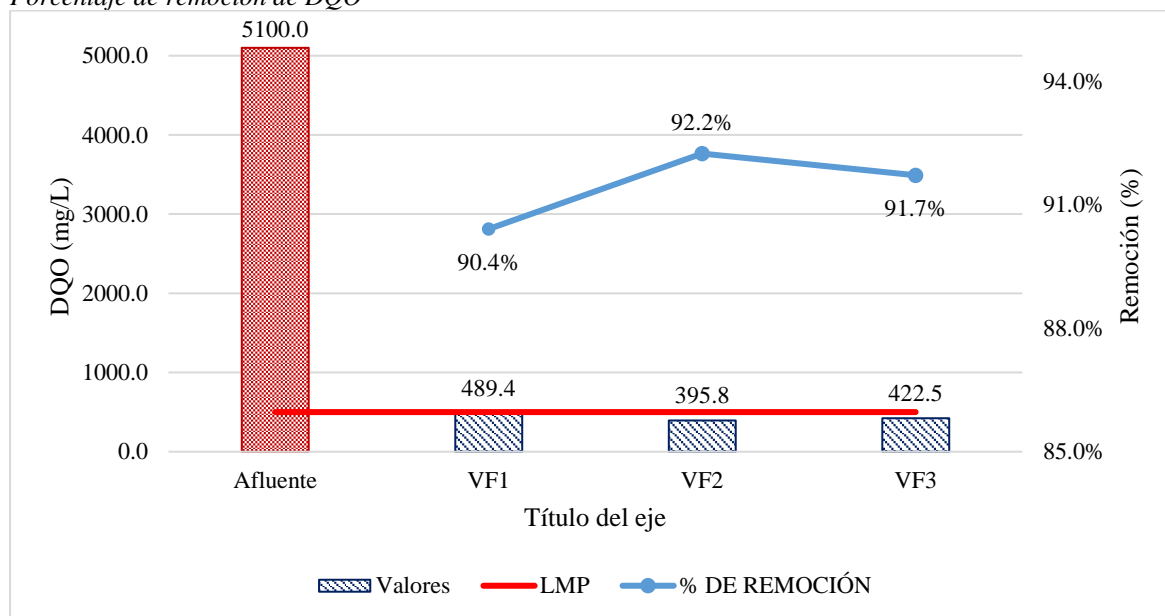
Porcentaje de remoción de DBO



Fuente: elaboración propia, 2022.

Figura 3

Porcentaje de remoción de DQO



Fuente: elaboración propia, 2022.

En la figura 2 se observa una reducción de DBO de 3700 mg/L a 120 mg/L (VF2), 180.0 mg/L (VF3) y 205.1 mg/L (VF1), cumplimiento con el LMP (250 mg/L), con porcentajes de remoción de 96.8%, 95.1% y 94.5% respectivamente. Los resultados evidenciaron que los tres sistemas de tratamiento obtuvieron una remoción significativamente alta, lo cual permitió el cumplimiento del LMP (250 mg/L).

En la figura 3 se observa una reducción de DQO de 485.8 mg/L a 395.8 mg/L (VF2), 422.5 mg/L (VF3) y 489.4 mg/L (VF1), con porcentajes de remoción de 92.2%, 91.7% y 90.4% respectivamente. Los resultados evidenciaron

que los tres sistemas de tratamiento obtuvieron una remoción significativamente alta, lo cual permitió el cumplimiento del LMP (500 mg/L).

Kumar & Ghosh, (2019), Arora & Saraswat, (2021), Manyuchi et al., (2019) y Lourenço & Nunes, (2017) en sus investigaciones lograron una remoción más del 90% para ambos parámetros, corroborando la eficiencia de esta investigación.

La remoción de la materia orgánica se debe a la percolación de las aguas residuales a través de distintos medios filtrantes con características especiales (Patel et al., 2022), que son tratadas por mecanismos naturales que actúan simultáneamente, tales como, filtración, absorción y biodegradación (Chávez, 2017).

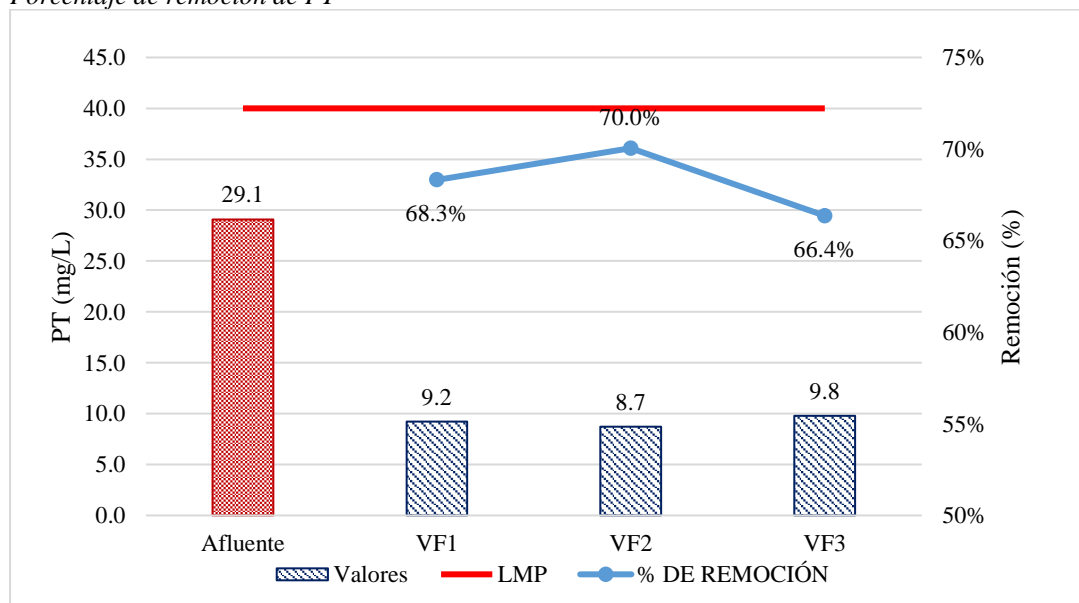
Arora & Saraswat, (2021) afirma que la remoción de DBO y DQO dentro del vermifiltro, se debe a la actividad enzimática de las lombrices y microorganismos asociados, ya que estimulan el proceso de degradación (Miito et al., 2021). El incremento de la biomasa de las lombrices, mejora la actividad microbiana (Arora et al., 2020b).

Otro factor atribuible a la remoción de este parámetro, es la formación de biopelículas y su adherencia a diversos materiales de soporte, que pueden ser sintéticos o naturales (García et al., 2021). Es así que en esta investigación se implementó como medios de soporte a las piedras, tapas PET y esponjas de poliuretano.

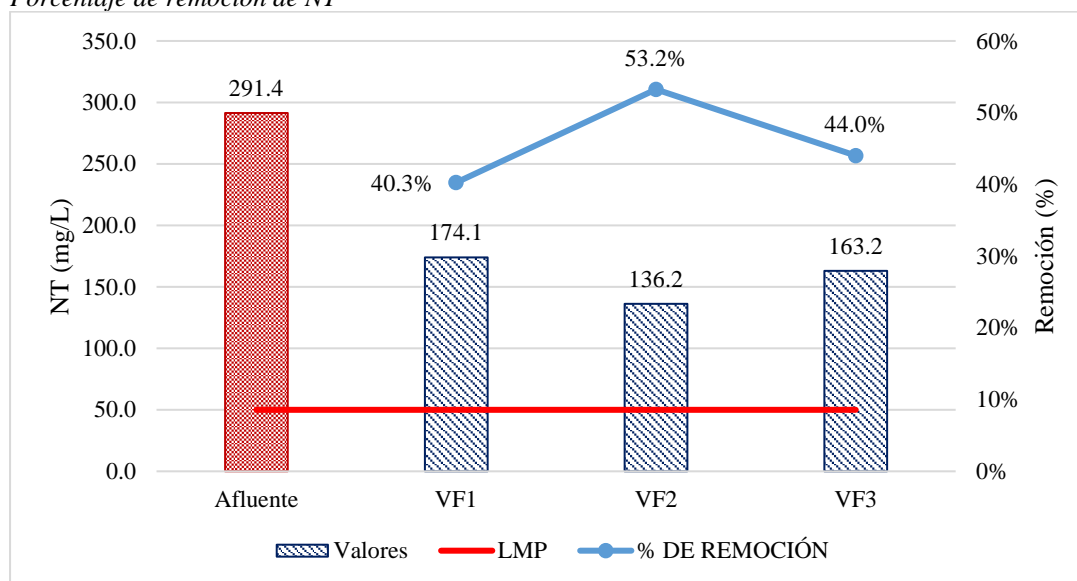
La presencia de las tapas PET en el VF2 ayudaron a lograr una mayor de remoción y reducción de materia orgánica, gracias a una mejor formación de biopelículas debido a su estructura, puesto que posee mayor superficie de contacto y rugosidad (García et al., 2021). Por otra parte, el VF3 obtuvo porcentajes bajos con respecto al VF2 debido a que la adaptación de microorganismos y reacciones químicas en las esponjas se desarrollan de forma lenta.

Figura 4

Porcentaje de remoción de PT



Fuente: elaboración propia, 2022

Figura 5*Porcentaje de remoción de NT*

Fuente: elaboración propia, 2022

En la figura 4 se observa una reducción de PT de 29.1 mg/L a 8.7 mg/L (VF2), 9.2 mg/L (VF1) y 9.8 mg/L (VF3), con porcentajes de remoción del 70%, 68.3% y 66.4% respectivamente. Los resultados evidenciaron que los tres sistemas de tratamiento obtuvieron una remoción significativamente alta, lo cual permitió el cumplimiento del LMP (40 mg/L).

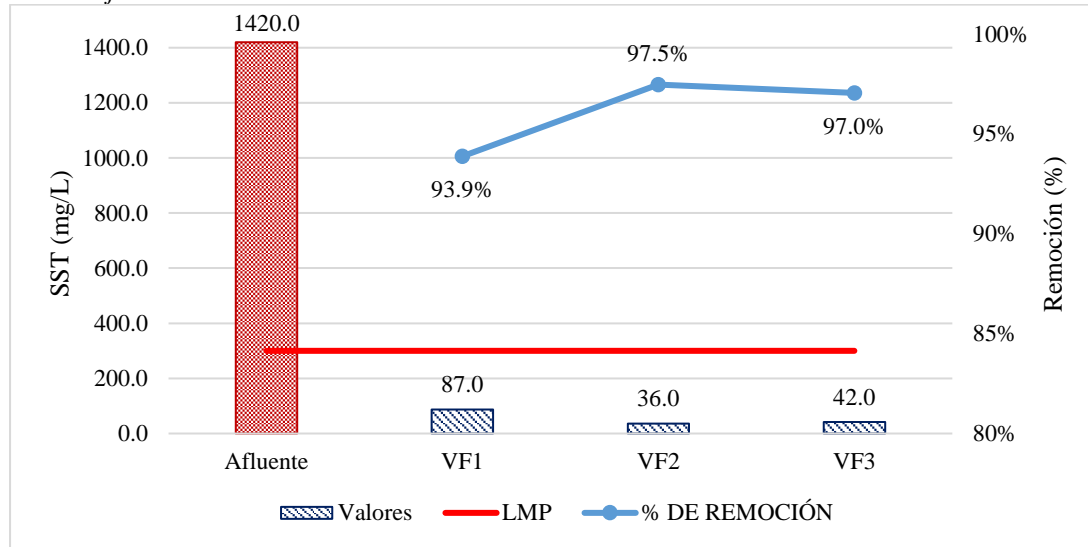
En la figura 5 se observa una reducción de NT de 291.4 mg/L a 175.87 mg/L (VF1), 139.37 mg/L (VF2) y 165.29 mg/L (VF3). El tratamiento que presentó una máxima remoción fue el VF2 con un 52.17%, seguido por VF3 con 43.28% y finalmente el VF1 con un 39.65%. Los resultados evidenciaron que los tres sistemas de tratamiento no tuvieron una remoción significativa para el cumplimiento del LMP (50 mg/L).

Para la remoción biológica de estos parámetros se requiere de un ambiente aerobio (Singh, et al., 2019). Lourenço & Nunes, (2017) y (Singh et al., 2021) afirman que la presencia de oxígeno disuelto (OD) se encuentra en la capa superior del filtro, debido a la aireación producida por la actividad de excavación de las lombrices.

Según Singh, Bhunia, et al., (2019) y Miito et al., (2021) mencionan que la reducción de PT y NT en el proceso de vermifiltración, también es atribuible a la capacidad de adsorción que tienen los distintos medios filtrantes y a la acción enzimática y de los microorganismos asociados (Lourenço & Nunes, 2017).

Otro aspecto a tener en cuenta es la altura del vermifiltro. En el estudio realizado por Singh et al., (2021) se trabajó con profundidades de lecho de 20, 40 y 60 cm, en donde se obtuvo una remoción de 50 a 90% de PT y 40 a 70% de NT en el vermifiltro con una profundidad de lecho de 40 cm, mientras que a 60 cm la remoción fue menor. Otro estudio realizado por Patil et al., (2020) muestra una remoción de PT y NT de 30 a 50% con una profundidad de 60 cm. Ambos estudios concluyeron que la altura del vermifiltro, juega un papel importante en la eliminación de estos parámetros, demostrando una similitud con los resultados obtenidos en esta investigación.

Figura 6
Porcentaje de remoción de SST



Fuente: elaboración propia, 2022

En la figura 6 se observa una reducción de SST de 1420 mg/L a 36.0 mg/L (VF2), 42.0 mg/L (VF3) y 87.0 mg/L (VF1), con porcentajes de remoción del 97.5%, 97.0% y 93.9% respectivamente. Los resultados evidenciaron que los tres tratamientos obtuvieron una remoción significativamente alta, lo cual permitió el cumplimiento del LMP (300 mg/L).

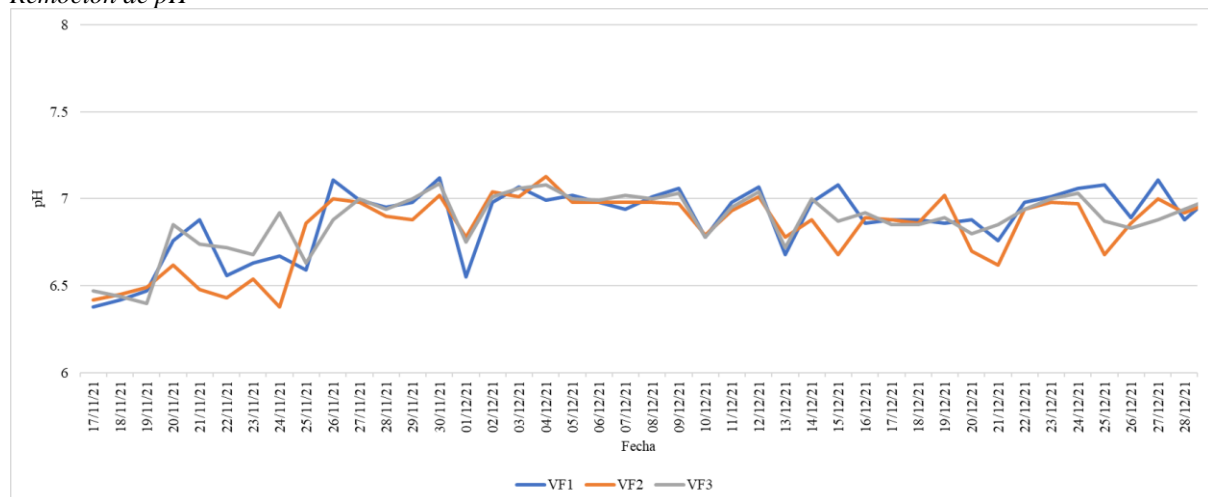
Teniendo en cuenta a Manyuchi et al., (2018) la disminución significativa de SST se debe a la actividad de las lombrices de biofiltración y bioconversión del material sólido presente en las aguas residuales en vermicompost.

Singh et al., (2017) afirma que los sólidos retenidos en la capa de viruta, son consumidos por las lombrices y convertidos en humus, por lo tanto, no hay generación de lodo como en otras tecnologías de tratamiento de agua.

Otro factor a considerar es el TRH, Castillo & Chimbo, (2021) concluye que mientras más tiempo tarda el agua residual en descender por los materiales filtrantes, más eficiente es la remoción de materia orgánica.

Kannadasan et al., (2021) y Pous et al., (2021) informaron la efectividad del vermifiltro con una remoción del SST del 90 al 95%, semejante a los resultados obtenidos en esta investigación.

Figura 7
Remoción de pH



Fuente: Elaboración propia, 2022

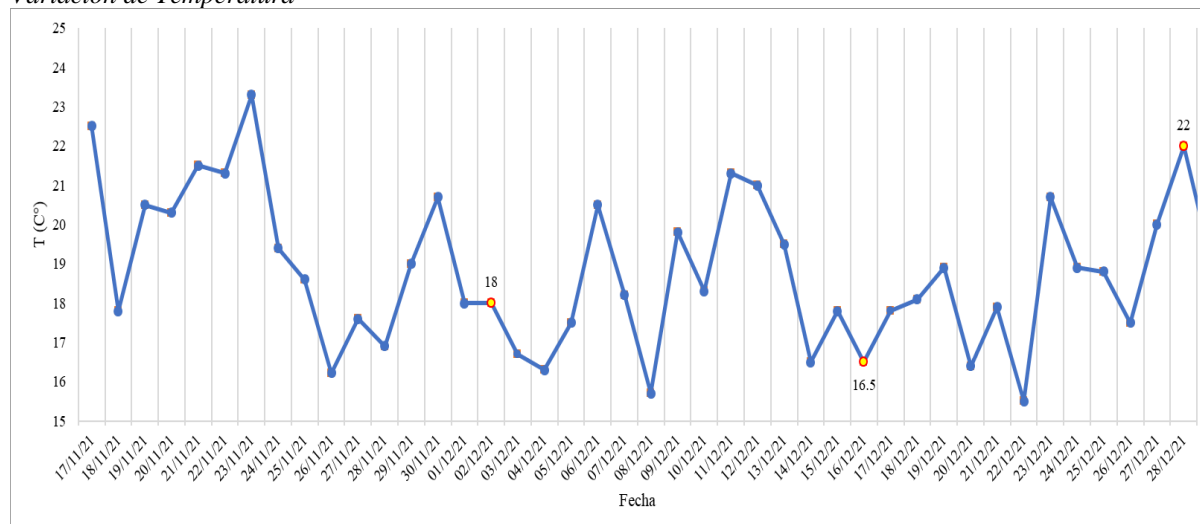
En la figura 7 se presenta un seguimiento diario del pH en los tres tratamientos de vermifiltración, cambiando de ácido a neutro. Se observó que el agua residual del camal sin tratamiento fue de 5.52, mientras que el agua tratada

por los tres vermifiltros presentó variaciones mínimas, con los siguientes rangos de pH: VF1 (6.42 - 7.12), VF2 (6.38 - 7.13), VF3 (6.40 - 7.09), permitiendo el cumplimiento del LMP (6.0 - 9.0).

Este resultado se debe a la capacidad inherente natural de las lombrices para actuar como agente amortiguador y neutralizador de pH, aumentando los niveles de mineralización del compuesto orgánico al CO₂ y otras sales mineralizadas (Ghasemi et al., 2020), (James et al., 2020). Singh et al., (2021) reconoce la sensibilidad de las lombrices a niveles de pH ácidos, recomendando un pH óptimo de 7.5 ±0.5.

Figura 8

Variación de Temperatura



Fuente: *Elaboración propia, 2022*

En la figura 8 se observa la variación diaria de la temperatura, el cual es de 19°±4. Este parámetro es un factor importante en la operación del vermifiltro, por lo que debe ser monitoreado constantemente (Castillo & Chimbo, 2021), afectando de manera directa a la tasa de filtración, e influyendo en el rendimiento del lecho del filtro junto con la actividad de las lombrices y microorganismos asociados (Arora et al., 2020). Por otro lado, Castillo & Chimbo, (2021), alega que la especie *eisenia foétida* en comparación con otras especies posee mayor tolerancia a la fluctuación de la temperatura, las condiciones óptimas de temperatura para el desarrollo de las lombrices son de 15°C a 24°C (Singh et al., 2021).

CONCLUSIONES

Se obtuvo una remoción mayor al 90% de DBO, DQO y SST y un porcentaje de remoción del 40 al 70% de PT y NT para los tres vermifiltros, a una temperatura de 19°±4 y un pH (6.38 - 7.13), confirmando el potencial de la tecnología de vermifiltración como alternativa para la remoción de carga orgánica presente en las aguas residuales de camal, debido a la interacción de las lombrices con los microorganismos asociados.

El vermifiltro con mayor eficiencia de remoción para todos los parámetros fue el VF2 asistido por tapas PET, presentando un mayor porcentaje de biomasa de las lombrices, seguido del VF3 con esponjas de poliuretano que a pesar de su buena remoción no logró superar al VF2, puesto que la adaptación de microorganismos y reacciones químicas en las esponjas se desarrollan de forma lenta.

La DBO, DQO, SST y PT analizados en los tres tratamientos cumplen con la normativa del LMP para camales y plantas de beneficio, sin embargo, el NT a pesar de su buena remoción no alcanzó el límite establecido.

Cabe resaltar que este sistema no posee un tiempo de saturación gracias a la acción de enzimática de los microorganismos y es considerado una tecnología económicamente accesible y ambientalmente sustentable, ya que no genera olores, lodos residuales y se usa materiales reciclables. Además, no requiere insumos químicos, su consumo de energía bajo y se genera el vermicompost como sub producto para ser utilizado en la agricultura.

RECOMENDACIONES:

Se recomienda la implementación de un invernadero, para brindar las condiciones climáticas adecuadas para el buen funcionamiento del sistema, en lugares con temperaturas menores a 15°C. También se sugiere implementar un sistema de aireación o un post tratamiento con macrófitas, para una mayor remoción de PT y NT.

Asimismo, para evitar una posible saturación del vermifiltro se debe mantener el caudal constante de acuerdo al diseño establecido previniendo la formación de lodo en la superficie, puesto que, las lombrices se alejan de estas zonas lo cual dificulta la degradación de la materia orgánica.

REFERENCIAS

- Adugna, A. T., Andrianisa, H. A., Konate, Y., & Maiga, A. H. (2019). Fate of filter materials and microbial communities during vermifiltration process. *Journal of Environmental Management*, 242, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.076>
- Arora, S., & Saraswat, S. (2021). La vermifiltración como tecnología natural, sostenible y verde para la remediación ambiental: un nuevo paradigma para el proceso de tratamiento de aguas residuales. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100061>
- Arora, S., Saraswat, S., Mishra, R., Rajvanshi, J., Sethi, J., Verma, A., Nag, A., & Saxena, S. (2020). Design, performance evaluation and investigation of the dynamic mechanisms of earthworm-microorganisms interactions for wastewater treatment through vermifiltration technology. *Bioresource Technology Reports*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100603>
- Arora, S., Saraswat, S., Rajpal, A., Shringi, H., Mishra, R., Sethi, J., Rajvanshi, J., Nag, A., Saxena, S., & Kazmi, A. A. (2021). Effect of earthworms in reduction and fate of antibiotic resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistant genes (ARGs) during clinical laboratory wastewater treatment by vermifiltration. *Science of the Total Environment*, 773. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145152>
- Castillo, J., & Chimbo, J. (2021). Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales. *Enfoque UTE*, 12(2), 80–99. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.746>
- Chávez, I. (2017). Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales. *Dominio de Las Ciencias*, 3(1), 536–560.
- Cun, M., & Álvarez, C. (2017). *Estudio de Impacto Ambiental de un Camal Municipal Urbano en la Provincia de el Oro. Ecuador*.
- García, R., González, P., Meza, E., Rentería, A., Mirquez, L., & Denisse, S. (2021). Mejora del efluente de un Reactor UASB mediante un sistema Biopelícula y Carbón Activado Granular (GAC). *La Sociedad Académica*, Núm, 57.
- Ghasemi, S., Mirzaie, M., Hasan, A., Ashrafnejad, M., Hashemian, S. J., & Shahnemati, S. R. (2020). Design, operation, performance evaluation and mathematical optimization of a vermifiltration pilot plan for domestic wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103587>
- James, C., Meenal, S. H., Elakkiya, S., & Logarshani, S. (2020). Sustainable environment through treatment of domestic sewage using MFC. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 1495–1502. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.110>
- Kannadasan, N., Balasubramanian, B., Palanisamy, T., Shanmugam, S., Pushparaj, K., Al-Dhabi, N. A., Arasu, M. V., & Narayanan, M. (2021). Sustainable biotreatment of textile dye effluent water by using earthworms through vermifiltration. *Journal of King Saud University - Science*, 33(8). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101615>
- Kumar, C., & Ghosh, A. K. (2019). Fabrication of a vermifiltration unit for wastewater recycling and performance of vermifiltered water (vermiaqua) on onion (*Allium cepa*). *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(4), 405–415. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0247-9>
- Lourenço, N., & Nunes, L. (2017). Is filter packing important in a small-scale vermifiltration process of urban wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(11), 2411–2422. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1323-1>
- Manyuchi, M. M., Mupoperi, N., Mbohwa, C., & Muzenda, E. (2019). Treatment of wastewater using

- vermifiltration technology. In *Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges* (pp. 215–230). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3179-4_12
- Manyuchi, M., Mbohwa, C., & Muzenda, E. (2018). Biological treatment of distillery wastewater by application of the vermifiltration technology. *South African Journal of Chemical Engineering*, 25, 74. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2017.12.002>
- Medina, C., Uriarte, W., Cardenas, E., & Orrego, S. (2020). *Treatment wastewater of slaughterhouses through technology advanced oxidation: fenton process*.
- Miito, G. J., Ndegwa, P., Alege, F. P., Coulibaly, S. S., Davis, R., & Harrison, J. (2021). A vermifilter system for reducing nutrients and organic-strength of dairy wastewater. *Environmental Technology and Innovation*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101648>
- Patel, H. K., Kalaria, R. K., More, B. S., Jokhakar, P. H., & Khimani, M. R. (2022). Microbial ecology of biofiltration. In *An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPs)* (pp. 235–266). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823946-9.00008-5>
- Patil, Y. M., Patki, V. K., Jahagirdar, S., Karale, R., & Angathekar, V. (2020). Greywater treatment by vegetated vermifilter: A low cost material for rural sanitation in India. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6946–6950. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.395>
- Pous, N., Barcelona, A., Sbardella, L., Gili, O., Hidalgo, M., Colomer, J., Serra, T., & Salvadó, V. (2021). Vermifilter and zooplankton-based reactor integration as a nature-based system for wastewater treatment and reuse. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100153>
- Quilla, I. (2015). *Visita técnica al camal municipal de Ilave*.
- Samal, K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2017). Treatment of wastewater by vermifiltration integrated with macrophyte filter: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2274–2289. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.026>
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. (2019a). Optimización de biobloqueo en vermifiltros: Un enfoque estadístico. *Journal of Environmental Management*, 233, 576–585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.065>
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. R. (2017). A mechanistic review on vermifiltration of wastewater: Design, operation and performance. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 197, pp. 656–672). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.042>
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. R. (2019b). Optimization of organics removal and understanding the impact of HRT on vermifiltration of brewery wastewater. *Science of the Total Environment*, 651, 1283–1293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.307>
- Singh, R., D'Alessio, M., Jahangeer, Meneses, Y., Bartelt-Hunt, S., & Ray, C. (2021). Nitrogen removal in vermifiltration: Mechanisms, influencing factors, and future research needs. *Journal of Environmental Management*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111868>
- Singh, R., Samal, K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2019). Vermifiltration as a sustainable natural treatment technology for the treatment and reuse of wastewater: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 247, pp. 140–151). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.075>
- Yanes, E. (2019). *Informe de Ensayo: LAS01-AG-AC-19-00108*.
- Zhao, Q., & Liu, Y. (2019). Is anaerobic digestion a reliable barrier for deactivation of pathogens in biosludge? In *Science of the Total Environment* (Vol. 668, pp. 893–902). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.063>