



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE
UN BIOFILTRO INTEGRADO CON *EISENIA FOETIDA* Y
MATERIALES FILTRANTES PARA EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS DE LABORATORIO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

MELISSA FLORES BALLESTEROS

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. GABRIELA PÉREZ OSORIO



Puebla, Puebla.

Febrero 2025

Dedicatoria

Para mis padres, Campanita, Ziggy, Barry, Toulouse, Rigo, Chihiro, Gandalf, Mishi, amigos, profesores, a mi bebé y a Alejandro, por el apoyo y motivación que me llevaron a concluir esta etapa académica.

Agradecimientos

La inspiración de la presente investigación fue el Dr. Alejandro Isaías Augusto Calderón, por siempre transmitir la curiosidad y fomentar la investigación y a mi asesora, la Dra. Gabriela Pérez Orozco quien siempre me guío con paciencia y sus conocimientos, gracias por su confianza en esta investigación.

A mis padres por el apoyo en todos los aspectos durante todas mis etapas académicas.

A mis amigos por animarme, motivarme y ayudarme. Gracias por creer en mí.

A Campanita por acompañarme por más de 18 años y estar presente en todos mis logros y esfuerzos para llegar hasta donde estoy el día de hoy.

A Ziggy, Barry, Toulouse, Rigo, Chihiro, Gandalf y Mishi por tanto amor incondicional.

A Alejandro, por recordarme y contagiar la motivación para seguir el camino que siempre soñé.

Resumen

El tratamiento de residuos acuosos de laboratorio es un desafío ambiental debido al impacto, la complejidad de los tratamientos y los costos. Esta tesis investiga la eficiencia de un biofiltro basado en el sistema Tohá y diversos materiales filtrantes para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio con colorantes como el azul de metileno y el anaranjado de metilo.

Se evaluaron dos modelos del biofiltro en condiciones controladas. El modelo 1 contenía antracita y zeolita, mientras que el modelo 2 incorporó carbón activado, arena fina y gruesa, grava fina, aserrín, algodón y tezontle. Se analizó la temperatura, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos totales (ST), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total, nitratos, fosfatos y pH de antes y después del tratamiento. Los resultados se compararon con la NOM-001-SEMARNAT-2021 y otras normativas pertinentes con el fin de demostrar su eficacia y estabilidad. El modelo 2 demostró una eficiencia aproximada del 90% en reducción de los contaminantes a comparación del modelo 1, se observó la capacidad para ajustar el pH y eliminar el azul de metileno. Aunque algunos parámetros aumentaron no rebasaron los límites máximos permisibles de las normas. La *Eisenia foetida* demostró una excelente adaptación a los colorantes. Esta investigación propone este biofiltro como una solución innovadora y sostenible para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio.

Palabras clave: residuos acuosos de laboratorio, biofiltro, lombrices, *Eisenia foetida*.

Abstract

The treatment of aqueous laboratory waste is an environmental challenge due to the impact, treatment complexity and costs. This thesis investigates the efficiency of a biofilter based on the Tohá system and various filter materials for the treatment of aqueous laboratory waste with dyes such as methylene blue and methyl orange.

Two models of the biofilter were evaluated under controlled conditions. Model 1 contained anthracite and zeolite, while model 2 incorporated activated carbon, fine and coarse sand, fine gravel, sawdust, cotton and tezontle. Temperature, total suspended solids (TSS), total dissolved solids (TDS), total solids (TS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen, nitrates, phosphates and pH before and after treatment were analyzed. The results were compared with NOM-001-SEMARNAT-2021 and other relevant regulations in order to demonstrate efficiency and stability. Model 2 showed an approximate 90% efficiency in pollutant reduction compared to model 1, and the ability to adjust pH and eliminate methylene blue was observed. Although some parameters increased, they did not exceed the maximum permissible limits of the standards. *Eisenia foetida* showed excellent adaptation to the dyes. This research proposes this biofilter as an innovative and sustainable solution for the treatment of aqueous laboratory waste.

Key words: aqueous laboratory waste, biofilter, earthworms, *Eisenia foetida*.

Introducción

La generación de residuos acuosos de laboratorio es uno de los problemas actuales para el ambiente y representa un reto la disposición de estos; el manejo de los residuos no es completamente sustentable debido a el tipo de sustancias químicas, sin mencionar que al final del tratamiento hay residuos remanentes. Entre los residuos más complicados de eliminar de manera sustentable se encuentran los subproductos de la catálisis para la eliminación de colorantes, como son: dióxido de titanio (TiO_2), azul de metileno y anaranjado de metilo. Resolver de manera eficaz esta problemática requiere la innovación o creación de tecnologías sustentables para la eliminación de estos residuos y sus remanentes.

Considerando lo anterior, es de manera imperativa la exploración de nuevas alternativas para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio con la finalidad de utilizar materiales sustentables. Este trabajo se centra se centra en la investigación y análisis del proceso de un biofiltro, el modelo 1 compuesto, por orden, lombrices *Eisenia foetida*, antracita, zeolita y rocas de río y modelo 2 lombrices *Eisenia foetida*, aserrín, carbón activado, tezontle, grava fina, arena gruesa, arena fina y algodón.

El biofiltro se sustenta en el sistema Tohá, que es aplicado originalmente para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, el modelo 1 pretende eliminar el residuo acuoso con catalizador y colorantes, mientras que el modelo 2 es para eliminar muestras acuosas con colorante azul de metileno y anaranjado de metilo a una concentración de 1 ppm. Cabe mencionar que es capaz de favorecer los procesos de transformación de los residuos a formas menos dañinas. Gracias a la participación de la *Eisenia foetida* como agentes biológicos activos y la sinergia de

las propiedades materiales filtrantes, da como resultado un sistema sustentable.

El sistema Tohá se creó desde la necesidad de tener tecnologías no convencionales para el tratamiento de aguas residuales que cumplan con la normativa ambiental, con bajos costos de mantenimiento y operación para que sea viable en comunidades de escasos recursos. La tecnología antes mencionada usa la lombriz *Eisenia foetida* de manera directa para la oxidación biológica.

Este trabajo tiene como finalidad tratar los residuos acuosos de laboratorio con colorantes azul de metileno y el anaranjado de metilo en medio acuoso y los residuos de fotocátalisis de la eliminación de colorantes. Al terminar el proceso se espera que el agua cumpla con la normativa ambiental mexicana para su descarga al drenaje y no generar ningún residuo de manejo especial como un biosólido, en este caso el *humus*; que podrá ser utilizado en plantas como un fertilizante natural y eliminar cualquier residuo remanente, por lo que, no generará algún impacto ambiental en su disposición. Sin embargo, también se espera a contribuir a las innovaciones sustentables de tecnologías para el tratamiento de residuos de manejo especial.

En pocas palabras el biofiltro del sistema Tohá es una adaptación de la lombricultora porque se involucra la cría y producción de *Eisenia foetida*, además del tratamiento de residuos orgánicos que resultan generar grandes beneficios.

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	I
Resumen	I
Abstract	I
Introducción	I
Índice	I
Capítulo I	1
1. Generalidades de la investigación	1
1.1 Contextualización del problema	1
1.2 Objetivos de la investigación	2
1.3 Justificación de la investigación	2
Capítulo II	5
2. Antecedentes	5
2.1 Biofiltros	5
2.2 Origen del sistema Tohá	7
2.3 Aplicaciones del sistema Tohá en Latinoamérica	8
2.4 Lombricultura: enfoque para el tratamiento de residuos	9
2.5 Capacidad regenerativa de la lombriz <i>Eisenia foetida</i>	11
2.5.1 Aplicaciones de la lombriz <i>Eisenia foetida</i>	13
2.6 Ventajas y desventajas del sistema Tohá	14
Capítulo III	15
3. Fundamentos teóricos	15
3.1 Introducción a la contaminación en laboratorios	15
3.1.1 Impacto ambiental y en la salud de contaminantes específicos	17
3.2 Métodos de tratamientos de residuos acuosos de laboratorio y aguas residuales	19
3.3 Mecanismos de remoción de contaminantes específicos	28
3.4 Marco legal	32

3.4.1 Leyes federales:	32
3.4.2 Programas y políticas:	33
3.4.3 Normativas estatales	34
3.4.4 Marco normativo para comparación	34
3.5 Agenda de Sostenibilidad 2030 y su relevancia para el estudio	35
3.6 Desafíos y limitaciones	37
Capítulo IV.....	38
4. Planteamiento metodológico.....	38
4.1 Diseño y construcción de la estructura del biofiltro	38
4.2 Componentes de los modelos del biofiltro	41
4.2.1 Modelo 1	41
4.2.2 Modelo 2	51
4.3 Preparación de muestras sintéticas de residuos acuosos de laboratorio	57
4.4 Proceso de filtración	57
4.4.1 Configuración del sistema de filtración	57
4.4.2 Procedimiento de filtración	59
4.5 Análisis de muestras filtradas	60
4.6 Mantenimiento del biofiltro	65
Capítulo V.....	66
5. Resultados.....	66
5.1 Análisis de los residuos acuosos de laboratorios tratados y comparación con la normativa correspondiente	66
5.2 Análisis y discusión de resultados	77
5.2.1 Comparación modelo 1 y modelo 2	77
5.2.2 Análisis comparativo de las muestras sintéticas de colorante pre y post tratamiento en el modelo 2	84
Capítulo VI.....	91
6. Conclusiones.....	91
7. Referencias.....	93

Capítulo I

1. Generalidades de la investigación

1.1 Contextualización del problema

La contaminación por residuos acuosos de laboratorio, tanto escolares como industriales, es un tema relevante que requiere atención e innovación de soluciones considerando los siguientes aspectos críticos: **la protección al ambiente, salud ambiental y humana, cumplimiento a las regulaciones y responsabilidad social.**

El tratamiento de residuos acuosos de laboratorio es un desafío económico y ambiental debido a que pueden contener sustancias químicas tóxicas, compuestos peligrosos y en algunos casos materiales biológicos con el potencial de contaminar los demás recursos. La disposición inadecuada puede generar graves daños.

En la actualidad hay diferentes métodos y tecnologías para el tratamiento de residuos de laboratorio, por ejemplo, la incineración, la adsorción y la oxidación química. Sin embargo, pueden ser costosos, ineficientes y generan subproductos tóxicos y contaminantes remanentes.

En este contexto, el uso de un biofiltro basado en el sistema Tohá es una propuesta prometedora, debido a que se ha demostrado que son eficaces en la eliminación de diferentes residuos y contaminantes de diversas fuentes. Sin embargo, es necesario una investigación a mayor profundidad para comprender cómo esta tecnología puede aplicarse de manera óptima a la gestión de residuos acuosos de laboratorio para resolver los desafíos específicos de esta categoría de residuos.

A pesar del potencial de los biofiltros es esencial abordar esta brecha de conocimiento para entender los mecanismos de

eliminación de la *Eisenia foetida* y las características de los materiales.

1.2 Objetivos de la investigación

Objetivo general

Implementar y evaluar la eficiencia de un biofiltro de lombrices para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio, buscando innovar una alternativa de bajo impacto ambiental, económica y eficiente para la gestión de desechos generados en laboratorios.

Objetivos específicos

1. Analizar la composición química del desecho específico para la experimentación en el modelo para determinar la complejidad y el impacto ambiental que pueda generar.
2. Diseñar y evaluar dos modelos con configuraciones diferentes (modelo 1 y modelo 2) a pequeña escala que proporcione las condiciones óptimas (temperatura, pH, dieta adecuada y humedad) para la actividad biológica de las lombrices y se seleccionará el más eficiente.
3. Determinar la eficiencia del sistema al comparar los parámetros fisicoquímicos de los residuos acuosos antes y después del tratamiento del biofiltro. Los parámetros son: temperatura, SST, ST, SDT, DQO, nitrógeno total, pH, conductividad eléctrica, nitratos y fosfatos.
4. Examinar el impacto en la calidad de la vida de las lombrices al ser expuestas al contaminante.

1.3 Justificación de la investigación

El tratamiento de residuos de laboratorio es crucial para la preservación del ambiente y la salud humana y ambiental. Con el aumento de la demanda de laboratorios, hay un incremento significativo en la generación de estos residuos, que exige la

creación o innovación de soluciones eficaces y sostenibles para su purificación, sin dejar subproductos tóxicos.

Esta tesis se centra en la investigación y experimentación de dos modelos de biofiltro basado en el sistema Tohá con diferentes configuraciones, aprovechando las capacidades naturales de la lombriz *Eisenia foetida*. La importancia de este trabajo es primordial debido a las siguientes razones:

1. **Escasez de recursos hídricos:** el crecimiento poblacional y la constante demanda de potable agotan los recursos hídricos. La contaminación en los cuerpos de agua representa una amenaza grave para la disponibilidad de agua limpia y segura para consumo humano, la agricultura y la industria. Por lo que, la investigación en métodos y tecnologías efectivos para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio es esencial para garantizar la disponibilidad de agua limpia en el futuro.
2. **Impacto ambiental:** la descarga de aguas residuales que no tienen el tratamiento adecuado o no son tratadas en su totalidad tiene un impacto asolador en los cuerpos de agua y los que necesitan de ella. Los contaminantes en aguas residuales que incluyen sustancias químicas, patógenos y nutrientes en exceso degradan la salud ambiental, la pérdida de diversidad y la proliferación de zonas muertas.
3. **Sostenibilidad ambiental:** la creación e innovación de soluciones es imperativo en la actualidad. Los métodos tradicionales de tratamiento de residuos acuosos de laboratorio son costosos y no eliminan la contaminación en su totalidad, por lo que los materiales de este filtro hacen que sea una solución económica considerando que se espera que no genere subproductos tóxicos.
4. **Innovación de tecnología:** la investigación, la experimentación y la innovación de tecnologías o sistemas

es fundamental para terminar con las problemáticas ambientales y mejorar la calidad de vida en general. La combinación de lombrices, antracita y zeolita, además, de los cuidados de las lombrices e investigación profunda representa una innovación en el campo del tratamiento de residuos acuosos de laboratorio.

5. **Transferencia de conocimientos:** la investigación en este campo no sólo tiene implicaciones teóricas, sino también prácticas. Los resultados esperados de este trabajo pueden tener aplicaciones a gran escala conduciendo a impactos positivos a la salud ambiental y humana.

Aunque no hay investigaciones previas de un biofiltro de *Eisenia foetida* para tratar residuos acuosos de laboratorio, existen investigaciones sobre el sistema Tohá que sirven como base. Gracias a las investigaciones que han estudiado a las lombrices *Eisenia foetida* y su fascinante cuerpo, sus procesos e incluso su regeneración con fines médicos, se comprende que sí son capaces de procesar contaminantes peligrosos en un ambiente controlado.

Esta investigación es vital para solucionar las problemáticas del tratamiento de residuos acuosos de laboratorio, ampliará el panorama de soluciones sostenibles y el desarrollo tecnológico.

Capítulo II

2. Antecedentes

2.1 Biofiltros

Los biofiltros son dispositivos para el tratamiento de aguas residuales que integran procesos físicos, químicos y biológicos para eliminar contaminantes (CIECO UNAM , s. f.). Es un sistema utilizado comúnmente a nivel doméstico para tratar aguas grises (proveniente de la cocina, lavadero, lavabo y regadera); se le conoce como biojardinera o lavadero ecológico (ECOTEC, s. f.); (Condorchem Enviro Solutions, s. f.).

A continuación, se mencionan sus componentes (CIECO UNAM , s. f.):

- a) **Lecho filtrante:** su función principal es eliminar los sólidos y proporcionar una superficie para el desarrollo de microorganismos que se encargan de degradar la materia orgánica. Los criterios para la selección del lecho filtrante dependen del objetivo y de la granulometría, la porosidad, la permeabilidad y la resistencia física ante el desgaste. Los materiales usados comúnmente son la grava, piedra triturada, piedra volcánica o de río (Figura 1) (Water and sanitation program, 2006).
- b) **Plantas de pantano:** es fundamental debido a que las raíces incrementan la filtración y el desarrollo de microorganismos. Las macrófitas tienen proveen un hábitat óptimo para la vida silvestre y aporta valor estético (Water and sanitation program, 2006).

- c) **Microorganismos:** su función es degradar la materia orgánica de forma aeróbica o anaeróbica y la remoción del nitrógeno (Water and sanitation program, 2006).

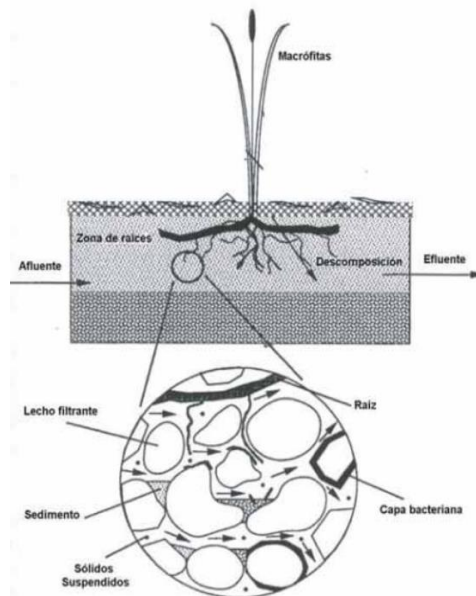


Figura 1. Lecho filtrante y planta macrófita. Fuente: (Water and sanitation program, 2006).

Los materiales dependen del tipo de biofiltro y de la función que deben cumplir. Generalmente incluyen **materiales orgánico-húmedos**, son aquellos que se necesitan para absorber, degradar y eliminar olores; ejemplos de algunos materiales: compost, turba y aserrín, en ocasiones se puede hacer una combinación de materiales porosos (Zuñiga, Buelna, & Chávez, 2012).

Los biofiltros se dividen en (Odour Observatory, s. f.):

- **Abiertos:** contiene una capa de material filtrante poroso debajo de un flujo de agua; en climas fríos no se recomienda el uso.
- **Cerrados:** contiene una capa de material que sirve como soporte estructural para la población microbiana y se coloca debajo de un sistema que distribuye el agua contaminada.

La mayoría de los biofiltros utilizados son de lecho abierto, debido a que son menos costosos, aunque los biofiltros cerrados han demostrado ser más eficientes.

Aunque las lombrices son protagonistas también se usaron diferentes materiales filtrantes según la configuración del modelo 1 y modelo 2. La selección de materiales fue según las características y precio de estos.

La combinación de estos materiales con las lombrices completa la eliminación y retención de contaminantes y dar un resultado prometedor, sin embargo, la información respecto a los biofiltros es limitada debido a que se enfoca únicamente al tema de tratamiento de aguas residuales.

2.2 Origen del sistema Tohá

Fue creado por el chileno, el Dr. José Tohá Castellá (1923-1999). En la década de los 70 se enfocó en la tecnología para buscar alternativas para la generación de biocombustibles y así logró obtener gas de las tunas, producir biomasa de un sistema sustentable de microalgas. Durante sus investigaciones descubrió el potencial de las lombrices *Eisenia foetida* para eliminar los residuos orgánicos sin contaminantes remanentes. Esta tecnología es sustentable, eficiente y económico para el tratamiento de aguas residuales (Fleming, 2014).

Como resultado de su experiencia en el año 1981, en la planta Lufkin ubicada en Texas comenzó a experimentar con este sistema y oficialmente en el 1986 nace el sistema Tohá (A. V. F. Ingeniería Ambiental, 2003). Este biofiltro aeróbico dinámico ha sido aplicado en varios países de Latinoamérica, entre ellos están Chile, Argentina, Bolivia, Paraguay, México y Ecuador, gracias a la patente de UNTEC. Es una alternativa con alto rendimiento, ya que ha demostrado eliminar patógenos y contaminantes hasta un

90%, por lo cual se ha podido verter el agua tratada a los cuerpos de agua dulce o al suelo (Fleming, 2014); (Salazar, 2005).

El sistema Tohá se basa en el uso de un biofiltro constituido por diferentes estratos con materiales porosos para la remoción de coliformes fecales, sólidos suspendidos, sedimentables y totales, DBO y grasas y aceites. Proporciona un pretratamiento físico y tratamiento biológico (Arango, 2004); (Guzmán, 2004).

2.3 Aplicaciones del sistema Tohá en Latinoamérica

Actualmente cuenta con un aproximado de 500 plantas en funcionamiento. Se destaca la planta piloto en Melipilla debido a que el Dr. Tohá dirigió personalmente ese proyecto y con el cual se logró la patente gracias al apoyo del FONDEF (Fondo Nacional de la Defensa) (Fleming, 2014). Con apoyo del FONDEF (Fondo Nacional de la Defensa), en 1994 se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales en Chile, para experimentar con el sistema Tohá con una población de 1,000 personas (A. V. F. Ingeniería Ambiental, 2003).

Este sistema ha superado las condiciones extremas en proyectos en Putre, Chile; en donde se contempló un cobertizo climatizado por la sensación térmica es de -40°C y en Argentina las temperaturas sobrepasan los 40°C y sigue siendo eficiente (Fleming, 2014).

Un ejemplo concreto de las aplicaciones de este sistema es un modelo integrado de un sistema de biodepuración para aguas residuales de zonas residenciales. El experimentó dio como resultado que es posible la separación del agua y la materia orgánica, se pudo recuperar los nutrientes presentes (nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros) y, además, hubo reducción de DBO, de metales pesados, sólidos suspendidos, coliformes fecales) haciendo posible su reutilización para el uso agrícola y cabe mencionar que también se obtuvo biomasa, un recurso aprovechable

como sustrato orgánico o abono. Todo este proceso presenta beneficios para la salud ambiental, salud humana y económicos (Rojas, 2013).

En Chile es común encontrar este sistema en funcionamiento en plantas domiciliarias e industriales para tratar aguas de fraccionamientos, empresas de giro agrónomas, comunidades rurales, campamentos, balnearios y empresas de procesamiento de alimentos. En la actualidad una empresa busca la licencia para la distribución de este sistema en México y Venezuela a escalas mayores (CONICYT, s. f.).

2.4 Lombricultura: enfoque para el tratamiento de residuos

La lombricultura es fundamental en este sistema Tohá, es llevada a cabo por la lombriz *Eisenia foetida*. Es la crianza y manejo de estas en condiciones de cautiverio con la finalidad de reducir residuos orgánicos y obtener fertilizante conocido *humus* (INCAP, s. f.).

La *Eisenia foetida* utilizan una variedad de microorganismos intestinales que producen enzimas que incluyen amilasa, proteasas, lipasas y celulasas, que mejoran la biodegradación de la materia orgánica (Domínguez, 2010).

La composta de lombrices o vermicompostaje, también tiene la capacidad de mejorar la calidad del agua en términos de turbiedad, pH y conductividad eléctrica. Esto se debe a que los microorganismos presentes en la composta pueden actuar como agentes aglutinantes y coagulantes que ayudan a remover partículas en suspensión y otros contaminantes del agua (Tchobanoglous, 2000). Es un proceso biológico que se utiliza para la transformación de materia orgánica en abono, llevado a cabo por la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*), la cual se encarga de degradar los residuos orgánicos y convertirlos en compost de

alta calidad. Además de su uso como fertilizante, se ha demostrado que el compostaje de lombrices puede contribuir a la eliminación de contaminantes presentes en el agua (Marnetti, 2012).

Gracias al compostaje se busca que los biolodos tengan un valor agregado, por lo que la *Eisenia foetida* permite transformar sustancias o residuos contaminantes en biomasa o abono orgánico y como resultado, un sistema limpio, de bajo costo y fácil desarrollo (Nelly B. Morales P., 2020).

Es importante mencionar las mejoras que genera esta técnica de vermicompostaje:

- **En la calidad del suelo:** aporta nutrientes esenciales al suelo, por lo que mejora la estructura, fertilidad, incrementa la disponibilidad de nutrientes para las plantas, aumenta la actividad microbiana y aumenta la retención de agua del suelo (Soriano, 2020);
- **Mejora de la calidad del agua:** actúa como una barrera para prevenir la contaminación hacia los cuerpos de agua porque reduce el paso de nutrientes y contaminantes, su función es como la de un filtro (Soriano, 2020), y
- **Eliminación de contaminantes:** la composta elimina los contaminantes que se encuentran en los residuos orgánicos, debido a que la *Eisenia foetida* degradan compuestos tóxicos (Soriano, 2020); (Zaborski, 2022).

Para el vermicompostaje se recomienda el uso de la *Eisenia foetida* por sus características. Su capacidad de comer su peso al día, que convierten más del 50% de los residuos en *humus* y que posteriormente puede ser usado como fertilizante, además de su reproducción es conforme el tamaño del recipiente y la cantidad de comida (kompost, s. f.).

En resumen, este biofiltro es una adaptación de la lombricultura porque se involucra la cría y producción de *Eisenia foetida*.

2.5 Capacidad regenerativa de la lombriz *Eisenia foetida*

Por sus capacidades de supervivencia, disponibilidad y su rápida regeneración, se han estudiado los mecanismos de regeneración de los anélidos. La *Eisenia foetida*, al igual que otras especies de lombrices es tripoblástica, con celoma, metámero, un sistema nervioso longitudinal, sistema vascular cerrado y ganglios cerebrales centralizados. Se considera que su regeneración es por la evolución al tener que sobrevivir a sus depredadores (Nengwen Xiao, 2011).

Un aspecto destacado, es comprender la expresión génica que explica la regeneración de la *Eisenia foetida*; científicos han estudiado los mecanismos moleculares de estas. Se descubrió que los genes labiales (Pex-lab01, Pex-lab02 y Pex-lab03) desempeñan un papel importante en la regeneración de los tejidos de la cabeza. Pex-lab01 y Pex-lab02 aumentan durante la regeneración de la cabeza, lo que indica que participan en la cicatrización de heridas y la formación de blastemas (Figura 2) (Sung-Jin Cho, 2009).

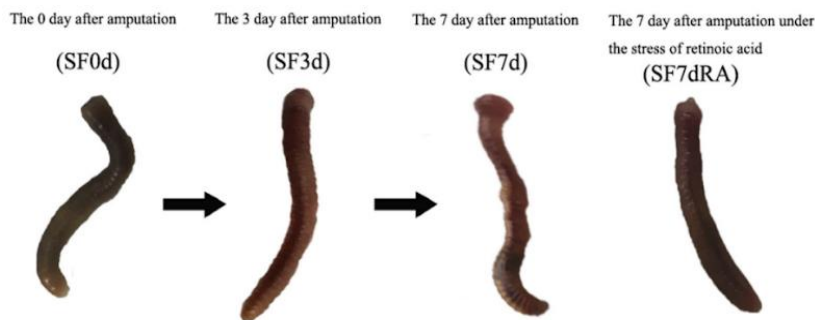


Figura 2. Muestra las 3 etapas de desarrollo cuando se sufre una amputación. De izquierda a derecha las 3 primeras imágenes demuestran como logra sobrevivir y la cuarta imagen demuestra como quedaría si se encuentra bajo estrés (Jing Tao, 2019).

La capacidad de regeneración de las lombrices depende del número de segmentos perdidos o de la posición del corte. En un estudio se demostró que esta capacidad se reducía a medida que se amputaban más segmentos de su cuerpo (Gates, 1950), de igual forma la velocidad de regeneración depende del lugar de la amputación (Nengwen Xiao, 2011); también se debe considerar que la capacidad de regeneración está ligada a factores ambientales como la temperatura y la alimentación (Liebmanm, 1942).

Cada proceso de regeneración en la *Eisenia foetida* comienza con la formación de un blastema donde ocurrió la amputación, después comienza la proliferación celular, aproximadamente 4 horas después, la herida está cerrada. Entre 5 y 7 días después de la amputación la cola ya estaba lisa y cónica, pero con poca pigmentación. Entre los días 7 y 11 se nota la delineación segmentaria y los surcos intersegmentarios ya eran evidentes. El crecimiento de la cola implicó un aumento de la longitud y diámetro de la lombriz, pero no del número de los segmentos (Nengwen Xiao, 2011).

Se clasificaron 3 curvas tasa-tiempo (Nengwen Xiao, 2011):

- **Tipo SI:** alta tasa de supervivencia cuando el número de los segmentos restantes es mayor a la mitad (Figura 3);
- **Tipo SII:** tasa de supervivencia media cuando el número de segmentos restantes es de entre un cuarto y la mitad del número total de segmentos (Figura 3); y
- **Tipo SIII:** baja de supervivencia ocurre cuando la amputación es los segmentos anteriores (Figura 3).

La capacidad regenerativa es influenciada por factores de su entorno; comprender el mecanismo de regeneración nos permite desarrollar sistemas en los cuales es posible aplicar su capacidad para la solución de problemas.

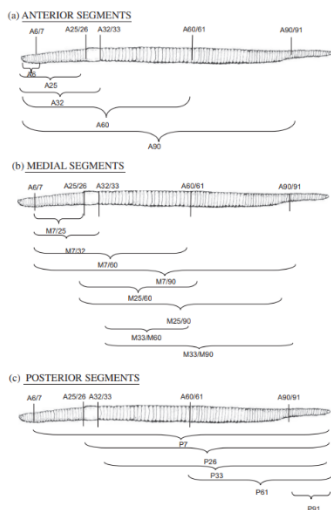


Figura 3. Segmentos de las amputaciones de la *Eisenia foetida*. Fuente: (Nengwen Xiao, 2011).

2.5.1 Aplicaciones de la lombriz *Eisenia foetida*

La *Eisenia foetida* va más allá del compostaje, por su composición, por su alto valor de proteínas y colágeno, la facilidad de crianza y de reproducción se ha experimentado con ella dando como resultado una crema cicatrizante hecha por esta especie de lombriz. Los resultados fueron exitosos en la creación de una crema regenerativa a base de lombriz de bajo costo (Morganico , 2014); (López, s. f.).

Además, el aceite extraído de la lombriz *Eisenia foetida* tiene como componentes principales aminoácidos y vitaminas en un 70%, lisina, metionina, lelinominal, soleusina, leucina, niacina, riboflavina, tiamina (B1), ácido pantetonico, complejo B, pirodixina (B6), vitamina B12 y ácido fólico. Sus beneficios son: alivia el dolor muscular, ayuda a la recuperación postfractura, desvanece las cicatrices, promueve la cicatrización de heridas, reduce el dolor por artritis, reumatismo, las molestias del túnel carpiano, evita la dermatitis y alivia la tendinitis (Morganico , 2014).

Se ha comprobado que la harina de la *Eisenia foetida* es de alto valor nutricional comparada con la harina de pescado, de carne y hueso; es posible usarlo como suplemento o sustituto en

animales monogástricos (García, Oruña, Domínguez, & Martínez, 2005).

2.6 Ventajas y desventajas del sistema Tohá

Las ventajas de este sistema son (Mechan, 2018):

- **Eficiencia:** las lombrices consumen su peso en alimento en 24 horas aproximadamente y una tasa de reproducción lo que permite un procesamiento efectivo y continuo de la materia orgánica. No genera olores ni lodos inestables.
- **Sostenibilidad:** este sistema aprovecha la capacidad natural de las lombrices para procesar los residuos.
- **Baja emisión de olores y ruidos:** debido a la rapidez con la que las lombrices consumen los desechos orgánicos en cuestión (verdura y fruta), la digestión y movimiento de las lombrices no genera ruido.
- **Bajo costo de mantenimiento:** si bien la alimentación debe ser equilibrada para evitar el síndrome proteico, no significa que sea costosa, es decir, pueden alimentarse de los residuos orgánicos en dosis comprensibles. El mantenimiento se refiere si la infraestructura sufre algún daño, lo cual es difícil que suceda.

Las desventajas son (Mechan, 2018):

- **Baja tasa de nacimiento:** para la reproducción si hay poco espacio, poca comida y si las temperaturas bajas son extremas.
- **Mantenimiento y supervisión:** necesitan supervisión periódicamente para revisar humedad, pH, comida y colocar viruta de madera o como otra opción hojas de árboles, secado o limpieza de los materiales.

Capítulo III

3. Fundamentos teóricos

3.1 Introducción a la contaminación en laboratorios

Los residuos de laboratorio son materiales o sustancias generados durante actividades que se realicen de investigación, análisis y experimentación en un laboratorio (SEMARNAT, 2020). La NOM-052-SEMARNAT-2005 menciona que los residuos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos que comúnmente contienen productos categorizados en CRETIB, que es una clasificación según sus características que significan: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso.

Su clasificación es en las siguientes categorías: Residuos Sólido Urbano (RSU), Residuos de Manejo Especial RME y Residuos Peligrosos (RP). Cada categoría requiere un manejo y disposición adecuada según la normatividad o regulación específica (DOF, 2003).

En México, la gestión de residuos de laboratorio está regulada por varias leyes y normas, principalmente las federales que son: la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y la NOM-052-SEMARNAT-2005. Estas regulaciones establecen los requisitos para la identificación, clasificación, almacenamiento, transporte y disposición de residuos peligrosos.

Cabe recalcar que la responsabilidad de las instituciones y de los laboratorios en México es implementar programas para gestión de residuos de laboratorios que cumplen con las regulaciones vigentes; incluso la NOM-018-STPS-2015 dicta que se

debe tener personal capacitado que cumpla con los procedimientos para un manejo seguro, el etiquetado adecuado y la colaboración con las empresas autorizadas para la recolección y disposición final.

El personal de laboratorio debe recibir la información y capacitación sobre el manejo, identificación y disposición adecuado de los residuos, así como las medidas de seguridad necesarias para prevenir accidentes.

En el PSMaYRN (Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales) se propone atender los problemas que enfrenta el manejo integral de los residuos mediante el fomento de instrumentos para el mejoramiento del desempeño ambiental de las actividades productivas, el aumento de la eficiencia de los procesos productivos, la corresponsabilidad en la atención de los problemas ambientales (productores-sociedad-gobierno) y el empleo de nuevas estrategias para distribuir en forma justa los costos de prevenir y solucionar los problemas ambientales (SEMARNAT, 2008).

En el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (SEMARNAT, 2008) menciona que el principio de responsabilidad compartida implica la participación de todos los miembros de la sociedad para el manejo integral de los residuos por lo que la gestión adecuada no sólo es cumplir con las regulaciones impuestas por la autoridad competente, sino también cumplir con la responsabilidad ambiental y social. La protección del entorno, la salud pública, la salud ambiental y el bienestar de la comunidad complementa una buena gestión de residuos.

3.1.1 Impacto ambiental y en la salud de contaminantes específicos

Dióxido de titanio

Tanto el titanio elemental como el dióxido de titanio tienen un nivel bajo de toxicidad, sin embargo, estudios en ratas de laboratorio expuestas por inhalación prolongada se demostró que desarrollaron pequeñas áreas con polvo oscuro en los pulmones. Los efectos por esta exposición son: tirantez, dolor en el pecho, tos y dificultad para respirar; en contacto con la piel y los ojos causa irritación. En cuanto al ámbito ambiental, no se han encontrado efectos negativos del titanio (LENNTECH, s. f.).

La agencia internacional de investigación sobre el cáncer (IARC), lo ha clasificado en el grupo de carcinógenos 2B, es decir, es posible que provoque cáncer en humanos (National Institute for Occupational Safety and Health (US), 2016).

La OMS ha establecido recomendaciones respecto a los límites de exposición en los entornos laborales debido a la suficiente información sobre su potencial daño al sistema respiratorio. Aunque es utilizado como conservador, sus efectos aún no son explorados totalmente, pero podría tener consecuencias en el sistema gastrointestinal. Se sospecha que consumir este conservador podría provocar inflamación en el tracto intestinal provocando colitis (Huerta, 2018).

El dióxido de titanio utilizado como catalizador para la eliminación de colorantes adiciona preocupaciones, a pesar de sus aplicaciones alimenticias ha generado contaminación ambiental. Sus nanopartículas son de difícil remoción y pueden ser tóxicas para la vida marina al tener contacto con el entorno acuático a través de productos como protectores solares. Aunque este compuesto es eficaz como catalizador para la eliminación de

colorantes, su impacto ambiental y los riesgos asociados requieren una evaluación cuidadosa y una regulación estricta (Huerta, 2018).

Anaranjado de metilo y azul de metileno

El azul de metileno y anaranjado de metilo son compuestos tóxicos que dañan la vida en el agua al evitar que las plantas tengan contacto con la luz que provoca una disminución de la concentración de oxígeno (Bulgariu, 2019). La presencia de colorantes en cuerpos de agua tiene graves consecuencias ambientales, incluyendo una severa contaminación siendo un riesgo para la vida acuática y salud humana debido a que provoca tumores, cáncer, alergias y las consecuencias menos graves es irritación en ojos y en la piel (Apatsidou M., 2018)

A nivel global año las textileras generan un aproximado de 700,000 toneladas de tintes y colorantes, de lo cual se estima que entre el 10 y 15% se pierde en los efluentes generados en los procesos de teñido. Actividades como el baño de tinte y el lavado contienen subproductos como colorantes hidrolizados, tintes no reaccionados y productos químicos auxiliares para la pigmentación, estos forman parte de las aguas residuales; resultando que por cada kilogramo de tela teñida se generan entre 125 y 166 litros de aguas residuales (Garces Giraldo L., 2007).

El azul de metileno tiene una estructura heterocíclica aromática y es considerado un colorante catiónico tóxico porque provoca consecuencias graves a los humanos por ingesta o contacto (Nayak, 2017). Por otro lado, el anaranjado de metilo tiene una estructura aromática y tiene un tinte aniónico, sus propiedades son mutagénicas que han causado enfermedades crónicas. Es utilizado como colorante e indicador de pH; se encuentra en un estado sólido y se disuelve con facilidad en el agua (Uddin, 2020).

3.2 Métodos de tratamientos de residuos acuosos de laboratorio y aguas residuales

En aguas residuales

En la página de la Procuraduría Ambiental y el Ordenamiento Territorial explica el tratamiento de aguas residuales y principales tratamientos (PAOT, s. f.):

1. **Tratamiento primario:** este tratamiento se enfoca en la eliminación de partículas grandes y no disueltas mediante métodos mecánicos. Este proceso implica el uso de cribas, mallas de filtrado, trampas para grasa, tanques desarenadores, floculadores y tanques de sedimentación, además de la aplicación de productos químicos. Se logra eliminar aproximadamente el 60% de los sólidos suspendidos y hasta un 35% de la DBO.
 2. **Tratamiento secundario:** se combinan los métodos mecánicos para la eliminación de partículas grandes con procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios. Las tecnologías aplicadas son: lodos activados, filtros percoladores, reactores anaerobios y biodiscos. Estos sistemas permiten la eliminación de sólidos suspendidos, nitratos, fosfatos, metales pesados, bacterias patógenas y hasta el 85% de la DBO.
 3. **Tratamiento terciario:** se aplican técnicas avanzadas como la microfiltración, coagulación y precipitación, cloración, ionización, absorción con carbón activado, electrodiálisis, intercambio iónico, ósmosis inversa y eliminación de nutrientes.
- **Tanque séptico:** se lleva a cabo en un recipiente cerrado e impermeable que proporciona un tratamiento primario a las aguas residuales mediante oxidación anaerobia. Esto permite

la eliminación de sólidos suspendidos y su fragmentación anaeróbica, logrando remover un aproximado del 45% de la DBO.

- **Lagunas de estabilización:** su objetivo es mantener el agua contaminada en estanques poco profundos durante un tiempo prolongado, permitiendo que la materia orgánica se degrade por medio de la actividad microbiológica. Su eficiencia en la eliminación de DBO está entre el 80 y 90%, aunque depende de la temperatura ambiental.
- **Lodos activados:** se involucra la generación de una masa activa de microorganismos capaces de eliminar la materia orgánica presente en el agua. El lodo activado tiene la función de absorber y flocular, y como contiene una gran cantidad de microorganismos, es un proceso aeróbico que requiere un suministro continuo de oxígeno. La eficiencia en la reducción de la DBO está entre el 85 y el 90%.
- **Digestor anaerobio:** consiste en calentar las aguas residuales para aumentar la producción de gas, seguido de una sedimentación estática y la separación de los sólidos. Es un tratamiento aeróbico que también incluye el manejo de lodos.
- **Biológico:** los tanques con difusores generan burbujas de aire, aportando el oxígeno necesario para la degradación aerobia de la materia orgánica disuelta en el agua residual.
- **Biodiscos:** son sistemas de tratamiento biológico aeróbico en los cuales la población bacteriana se autorregula según la afluencia, garantizando una calidad constante del efluente. Logra eliminar hasta un 80% de la DBO.
- **Dual:** combina la degradación de la materia orgánica en el agua residual por medio de métodos biológicos. Durante este proceso, el agua es fuertemente aireada para estimular el

crecimiento de bacterias aerobias y otros microorganismos, que oxidan la materia orgánica en dióxido de carbono y agua.

- **RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente):** este reactor cuenta con un sistema de separación de gas, líquido y sólido que impide la salida de sólidos suspendidos en el efluente, favoreciendo la expulsión de gases y la sedimentación de flóculos. Su eficacia se refleja en una remoción moderada de sólidos suspendidos totales y en la reducción del 35 al 55% de la DBO.
- **Tanque Imhoff:** este tanque es séptico cilíndrico diseñado para el tratamiento anaeróbico de aguas residuales. Cuenta con un dispositivo decantador que evita la mezcla de gases y sólidos en suspensión, mejorando así la sedimentación y la digestión; logra eliminar el 60% de la DBO.
- **Lagunas de aireación:** estas son cuerpos de agua poco profundos donde la oxigenación de las aguas residuales se realiza mediante unidades de aireación, las cuales mantienen los sólidos en suspensión y proporcionan oxígeno disuelto en toda el agua. Las bacterias anaerobias realizan la depuración, reteniendo la mayoría de los sólidos en suspensión, que se depositan en el fondo. Este proceso elimina hasta un 80%.
- **Tratamiento anaerobio:** se realiza mediante la hidrólisis de compuestos orgánicos complejos, que se transforman en unidades más pequeñas, las cuales los organismos metanogénicos convierten en metano y dióxido de carbono.
- **Primario avanzado:** este tratamiento incluye la filtración a través de arena o grava y la desinfección mediante cloro, luz ultravioleta u ozono. Esto permite una depuración significativa de organismos patógenos, sólidos suspendidos, DBO, fósforo, H₂S y metales pesados.

- **Zanjas de oxidación:** son zanjas de poca profundidad que reciben las aguas residuales crudas y las tratan mediante procesos de estabilización natural. La actividad anaerobia contribuye a la estabilización parcial de los lodos y libera materia orgánica en forma soluble, lo que facilita su mayor degradación en la zona aerobia. el porcentaje de DBO que remueve es aproximadamente del 85%.
- **Filtros biológicos:** estos filtros albergan colonias de bacterias y permiten que el agua pase a través de ellos, facilitando el reciclaje del agua y la participación de las bacterias en el proceso de limpieza. Su eficiencia alcanza aproximadamente el 80% en la remoción de la DBO.

En laboratorios

Gracias al documento de publicado por SEMARNAT coescrito con los subsectores llamado Guía para la elaboración de la Cédula de Operación Anual Tratamiento de Residuos Peligrosos menciona los diferentes tipos de tratamiento dependiendo de los residuos y los desafíos particulares que presenten (SEMARNAT, s.f.):

- **Físico:** requiere la manipulación física de los residuos para reducir o eliminar el volumen del contaminante; por ejemplo: centrifugación, filtración común y sus variaciones (filtro de prensa de cinturón, de prensa, de vacío), ósmosis inversa, microfiltración, nanofiltración, sedimentación, separación magnética, cribado, coagulación y floculación, adsorción con carbón activado, destilación, evaporación, cristalización por fusión (enfriamiento), espesamiento de lodos, la trituración y compactación.
- **Químico:** se necesitan de reacciones químicas para neutralizar o descomponer el residuo; hidrólisis, intercambio iónico con resinas, intercambio iónico y

adsorción con biopolímeros (con quitosán, zeolitas, arcillas, lignina, materiales ricos en taninos, cenizas volantes, otros biosorbentes y neutralización), oxidación química avanzada y precipitación, reducción química y absorción.

- **Biológico:** implica microorganismos como bacterias, hongos, virus, priones y protozoos para biodegradar los residuos orgánicos, por ejemplo, lodos activos, lagunas aerobias, digestión aerobia, reactores de lecho compacto, compostaje, digestión anaerobia, tratamiento con hongos y bacterias, biosorción y tratamiento enzimático.
- **Térmico:** implica la aplicación de altas temperaturas como la incineración y la pirolisis.
- **Mecánico-biológico:** combina ambos métodos, generalmente en la etapa inicial es la separación mecánica y la siguiente etapa es la descomposición biológica de los residuos orgánicos.

Tratamientos combinados

En el libro Potabilización del agua (Rivas & Bravo, 2015) explica que la filtración y la biodegradación son dos procesos distintos pero complementarios utilizados en el tratamiento de aguas residuales urbanas.

Filtración

La filtración se emplea para separar partículas y microorganismos que no son retenidos por otros procesos convencionales. Se puede llevar a cabo utilizando un medio poroso o granular, aunque estudios han demostrado que los medios fibrosos mejoran la calidad de la filtración. Este proceso puede clasificarse según la gravedad o la presión del agua, así como por la velocidad de filtración (rápida, lenta o variable). Además, existen dos

enfoques principales: la filtración de torta, donde se desarrolla una capa sobre el filtro que facilita la separación, y la filtración a profundidad, que mejora la calidad del filtrado con la profundidad del medio (Coulson, 2003).

Clasificación de los sistemas de filtración

- **Gravedad o presión:** es el proceso en el que se hace pasar el agua por un filtro y se realiza por efectos de la gravedad. Los filtros de presión están contenidos en recipientes y el agua fluye de manera forzada.
- **Velocidad de filtración:** rápida, lenta o variable. La filtración lenta se da a velocidades entre 0.1 y 0.2 m/h, mientras que la rápida oscila entre 5 y 20 m/h.
- **Filtración de torta o en profundidad:** la filtración de torta es un proceso lento, en los que sobre la superficie del filtro se desarrolla una torta y así se genera la filtración por medio de esa superficie. La filtración a profundidad se genera cuando la mayor parte del espesor está activo y la calidad del filtrado mejora con la profundidad (Pérez, 2011).

Biodegradación

Por otro lado, la biodegradación implica la descomposición de contaminantes mediante procesos biológicos. Se pueden distinguir varios tipos de biodegradación: aeróbica, que utiliza oxígeno para descomponer contaminantes; anaeróbica, que opera en ausencia de oxígeno; fitorremediación, donde las plantas se utilizan para extraer, acumular o degradar contaminantes; y compostaje biológico, en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica (Manahan, s. f.).

Clasificación de biodegradación:

- **Biodegradación aeróbica:** los organismos aeróbicos utilizan oxígeno para descomponer los contaminantes (Greentology, s. f.).
- **Biodegradación anaeróbica:** descomponen contaminantes de en ausencia de oxígeno (Greentology, s. f.).
- **Biodegradación abiótica:** algunos materiales se pueden degradar por procesos químicos no biológicos, aunque pueden estar involucrados por microorganismos y factores ambientales (Portillo, 2013).
- **Biodegradación foto degradación:** degrada materiales gracias a la luz solar debido a que puede romper enlaces químicos en materiales orgánicos, es decir, degradación térmica (Portillo, 2013).
- **Fitorremediación:** se utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (Kelley, 2000).
- **Compostaje biológico:** los microorganismos descomponen la materia orgánica (Greentology, s. f.).

Biofiltración

La biofiltración combina tanto la filtración como la biodegradación en un solo proceso. Esto se logra al utilizar un medio poroso o granular que permite que los microorganismos presentes en él descompongan los contaminantes presentes en el agua que fluye a través de él. La biofiltración lenta, en particular, destaca por su capacidad para separar agentes patógenos y mejorar la estética del agua mientras se realizan procesos físicos y bioquímicos para purificarla (Ruíz Arango, 2004).

Ventajas y desventajas de la biofiltración

Ventajas

- **Alta eficiencia en la eliminación de contaminantes:** es un método versátil que permite tratar una amplia gama de compuestos, por ejemplo, el sulfuro de hidrógeno, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (zuez, 2022).
- **Bajo costo:** los medios filtrantes son de bajo costo per cápita y operación, además de que no usan químicos (Forero, 2018).
- **No generación de subproductos tóxicos:** a comparación de otros métodos, la biofiltración no genera subproductos peligrosos porque se convierten en productos no dañinos a través de la actividad biológica de los microorganismos (Pacheco, 2017).
- **Bajo impacto ambiental:** al utilizar procesos biológicos naturales para la degradación de contaminantes, minimiza el impacto (zuez, 2022).
- **Fácil mantenimiento:** el mantenimiento de los biofiltros es relativamente sencillo debido a que el medio filtrante se reemplaza cada cierto tiempo, pero dependerá de diversos factores (Condorchem Envitech, s. f.).

Desventajas

- **Cambio de lecho filtrante:** si se desea una mayor eficacia se debe vigilar que el lecho filtrante asegure condiciones óptimas para el crecimiento de microorganismos se mantenga, esto va de la mano con el riego y monitoreo de diversos parámetros (Sagastume, 2000).
- **Sensibilidad a condiciones ambientales:** la actividad microbiana es sensible a cambios de temperatura, pH y a la

concentración de contaminantes, las condiciones extremas y drásticas afectarían la eficacia (Revah, 2005).

- **Tiempo de inoculación:** este proceso puede ser prolongado, incluso puede tomar meses para que el sistema alcance su máxima eficiencia y esto puede generar retrasos (Sercu, 2005).
- **Limitaciones de la carga de contaminantes:** los biofiltros pueden tener limitaciones en cuanto a la concentración y tipo de contaminantes para que el proceso sea eficaz, debido a que algunos compuestos pueden inhibir el crecimiento microbiano (Arana, 2010).
- **Eficiencia variable:** su variación puede ser significativa según las condiciones operativas y el tipo de contaminantes (Forero, 2018).

Tipos de biofiltración

- **Biofiltro de lecho fijo o inmóvil (BLE):** utiliza un soporte fijo y poroso que puede ser sintético u orgánico, por ejemplo, el compost, cáscara de arroz, bagazo de caña, hojarasca y café, pero si hablamos de los inorgánicos serían rocas porosas, conchas, cascajo, etc. El material de soporte debe ser óptimo para una población de microorganismos. Consiste en pasar un gas saturado de humedad con sustancias contaminantes y olor que no sean solubles en agua por medio de una biopelícula donde se degrada a CO_2 y H_2O (Varnero, 2012); (Velázquez, 2015).
- **Biolavadores o bioscrubber:** este proceso está constituido por dos etapas, en la primera el gas a degradar es absorbido hacia una torre que contiene líquido y en la segunda fase el líquido recircula hacia el reactor biológico, por lo que los gases contaminantes son degradados por la oxidación de

los microorganismos que pueden estar inmovilizados o libres (Arana, 2010); (Varnero, 2012).

- **Biofiltro de lecho escurrido o percolador (BLE):** similar al biofiltro de lecho fijo, consiste en una columna de material sintético, de plástico o cerámica donde se desarrolla la biopelícula en la que se desarrollan los microorganismos, este lecho es alimentado por los gases que se necesitan depurar contra una corriente de estado líquido con nutrientes inorgánicos (nitrógeno, fósforo, potasio, sodio, etc.) (Arana, 2010); (Varnero, 2012).

Aplicaciones exitosas de biofiltros en diferentes ámbitos

- Tratamiento de aguas residuales sanitarias y municipales (Garzón-Zúñiga, 2012).
- Tratamiento de efluentes en industrias (Garzón-Zúñiga, 2012).
- Tratamiento del estiércol de puerco (Garzón-Zúñiga, 2012).
- Tratamiento de emisiones gaseosas en el aire (Jiménez, 2005).
- Tratamiento de olores provenientes de industrias (Thalasso & Pineda Olmedo, 2002).
- Tratamiento para limitar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles, como imprentas e industrias químicas (Thalasso & Pineda Olmedo, 2002).

3.3 Mecanismos de remoción de contaminantes específicos

Los colorantes son compuestos químicos diseñados para dar color en alguna superficie, suelen ser moléculas orgánicas complejas para que sean resistentes a diferentes condiciones. El principal problema de los colorantes es que son la principal fuente de contaminación; por su naturaleza tiñe el agua y reduce la

penetración de la luz solar, la resistencia fotoquímica y reacciones biológicas (Yagub M. T., 2014).

Anaranjado de metilo y azul de metileno

Aunque los métodos de remoción son similares, las condiciones óptimas y la eficiencia de remoción varían. Para el anaranjado de metilo el pH 4 facilita la adsorción, mientras que el azul de metileno su condición óptima es de aproximadamente un pH de 10 y que el HDL-Silicato es más efectivo para el azul de metileno y el HDL-Carbonato fue mejor para el anaranjado de metilo. El hidróxido doble laminar (HDL) son materiales adsorbentes que poseen una estructura en capas y son capaces de intercambiar aniones en la superficie (Morales A. J., 2016).

- **Adsorción:** es el método más común, económico y eficaz para la remoción de colorantes. En el proceso hay una adherencia de las moléculas del colorante a la superficie del material adsorbente, por ejemplo, el carbón activado y los HDL con los materiales ideales debido a sus propiedades como el intercambio de iones el espacio interlaminar reactivo (Morales A. J., 2016); (Bernal, Hernández, Berber, Martínez, & Delgado, 2017).
- **Fotocatálisis:** es considerado como un proceso de oxidación que utiliza la energía de la luz y con la ayuda de un catalizador genera las reacciones químicas esperadas (Nevárez Martínez M. C., 2017). Específicamente el método de fotocatalisis con nanopartículas de TiO_2 y radiación solar.
- **Oxidación química:**
 - a) Con hipoclorito de sodio ($NaClO$)

Este oxidante fuerte al disolverse en agua, se descompone y libera un oxígeno atómico el cual reacciona con los

enlaces químicos de las moléculas de los colorantes rompiendo su estructura y así eliminando el color (Flores Morales C. R., 2022).

b) Con peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

Aunque es menos efectivo que el $NaClO$, también es una alternativa. El H_2O_2 se descompone con la finalidad de formar radicales hidroxilo por medio de la fotólisis y la catálisis. Los radicales hidroxilo descomponen el colorante y como resultado es la eliminación de este (Banquero Guayacán, 2014).

c) Reactivo Fenton

Resulta de la suma de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas para oxidar ácidos tartáricos y compuestos orgánicos (Banquero Guayacán, 2014).

- **Electrocoagulación:** en este proceso se desestabilizan los contaminantes que estén en una suspensión, emulsión o disueltos por medio de una corriente eléctrica de bajo voltaje y por electrodos metálicos de aluminio o hierro. En el proceso hay una elevada carga de cationes que al desestabilizar el contaminante genera hidróxidos complejos (Condorchem Enviro Solutions , s. f.).

Ventajas y desventajas de las técnicas de remoción

Según las tablas encontradas en el libro Calidad de agua (Martínez, 2012):

- **Adsorción**
 - **Ventaja:** es eficiente para la remoción de varios colorantes, además, de que se pueden emplear diferentes materiales.
 - **Desventaja:** algunos materiales tienen un costo elevado y pérdidas; los materiales más baratos aún

no han sido completamente estudiados para verificar su eficiencia.

- **Filtración de membrana**

- **Ventaja:** es un método eficaz para la remoción de colorantes que tengan baja concentración, también es resistente a la temperatura y los ataques microbianos.
- **Desventaja:** podría tener altos costos, la remoción de sólidos disueltos es ineficiente y por lo tanto, necesita tratamientos extras.

- **Electroquímico**

- **Ventaja:** al ser un método nuevo, tiene resultados eficientes para la remoción y degradación de contaminantes sin generar subproductos tóxicos.
- **Desventaja:** los costos de electricidad son altos.

- **Oxidación**

- **Ventaja:** rompe los anillos aromáticos.
- **Desventaja:** genera lodos, subproductos tóxicos y carcinógenos.

- **Fotoquímico**

- **Ventaja:** puede degradar moléculas orgánicas en CO₂ en lote o sistema continuo.
- **Desventaja:** genera subproductos y los costos son altos.

- **Coagulación**

- **Ventaja:** presenta alta eficiencia de remoción, se efectúa en poco tiempo y sus costos de inversión son bajos.
- **Desventaja:** no se adapta a los colorantes ácidos y es un método costoso.

- **Biodegradación**

- **Ventaja:** existen microorganismos capaces de procesar colorantes en sistemas anaeróbicos o aeróbicos.
- **Desventaja:** se necesita más información genética de los microorganismos, el proceso de aclimatación es largo.
- **Bioadsorción**
 - **Ventaja:** el proceso de bioadsorción puede ir acompañado de la biodegradación.
 - **Desventaja:** sigue en investigación, no se ha utilizado a grandes volúmenes.

3.4 Marco legal

3.4.1 Leyes federales:

1. **Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPEGIR):**

Esta ley establece los principios generales y las responsabilidades en la gestión de residuos de México. Contiene disposiciones específicas para la gestión de residuos peligrosos y residuos biológico-infecciosos.

2. **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA):**

Esta ley proporciona el marco general para la protección del ambiente y la regulación de la gestión de residuos, incluidos los residuos acuosos de laboratorio.

3. **Reglamento de la LGPGIR:**

Este reglamento establece disposiciones más detalladas sobre la gestión de todos los residuos.

4. **Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005:**

Aquí establece las especificaciones y los procedimientos para la gestión de residuos peligrosos generados en actividades de manejo, transporte, tratamiento y disposición final.

5. **Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021:**
Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
6. **NMX-AA-008-SCFI-2016 Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales y residuales tratadas:** establece el método de prueba para la medición del pH en el intervalo de pH 0 a 14 y en un intervalo de temperatura de 0°C a 50°C.
7. **NMX-AA-007-SCFI-2013 Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas:** establece el método de prueba para la medición de la temperatura según los instrumentos de medición directa o instrumentos que indican expansiones o fuerzas proporcionales en los cambios de temperatura; en el intervalo comprendido entre 0°C y 45°C.
8. **NMX-AA-093-SCFI-2018 Determinación de la conductividad electrolítica:** establece el método de prueba para determinar la conductividad electrolítica.
9. **NMX-AA-034-SCFI-2015 Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas:** establece el método para la medición de este parámetro.
10. **NMX-AA-030/2-SCFI-2011 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y tratadas - Método de tubo sellado a pequeña escala:** especifica un método para la determinación de la DQO-TS.
11. **NMX-AA-026-SCFI-2010 Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas:** establece el método de prueba de medición.

3.4.2 Programas y políticas:

1. **Programa Nacional para la Gestión Integral de Residuos (PRONAGIR) :**

Tiene como objetivo promover una gestión integral de residuos en México y establece las directrices y estrategias para lograr una gestión más eficiente y sostenible.

2. Programa de Manejo de Sustancias Químicas y Residuos Peligrosos (PRONAMEG):

Este programa se enfoca en la regulación y el manejo de sustancias químicas y residuos peligrosos, lo cual es relevante en esta investigación.

3.4.3 Normativas estatales

Además de las leyes y regulaciones de carácter federal en varios estados de México hay normativas específicas sobre la gestión de residuos, por lo que estas regulaciones pueden variar de un estado a otro, sin embargo, están en gran medida vinculadas a las leyes y regulaciones federales.

En el estado de Puebla, las regulaciones estatales están basadas en la LGPGIR, LGEEPA y la NOM-052-SEMARNAT-2005.

3.4.4 Marco normativo para comparación

El objetivo particular de investigación es la medición de parámetros y el cumplimiento con la normatividad correspondiente. La comparación de resultados de los parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 si bien, esta norma proporciona un marco regulatorio, también se han considerado otros parámetros que se consideran relevantes para el análisis de la calidad como los nitratos, fosfatos, sólidos totales (ST), sólidos disueltos (SD) y la conductividad eléctrica; estos parámetros no están incluidos en la norma mencionada por lo que se han considerado otras normas para comparar resultados y saber si el biofiltro cumple con los límites máximos permisibles.

1. Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua

de consumo humano: sólo se considera el parámetro para la conductividad eléctrica.

2. Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003: que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos (sólo se considera para la comparación de SDT).

3. Reglamento para la Calidad del Agua Potable de Costa Rica (Decreto N°38924-s): sólo se considera el límite máximo permisible para fosfatos.

4. Documento de Estándares del Reglamento Nacional Primario Potable de la EPA: sólo se considera el límite para nitratos.

3.5 Agenda de Sostenibilidad 2030 y su relevancia para el estudio

Al abordar un tema ambiental relevante y crítico es posible alinearse con los múltiples ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenibles) que se encuentran en la Agenda 2030.

Estos objetivos se encuentran en la página de las Naciones Unidas (Naciones Unidas, s.f.); son un total de 17 objetivos con 169 metas que abarcan los temas económicos, social y ambiental. Los puntos más importantes es erradicar la pobreza en el mundo, erradicar el hambre y lograr la seguridad alimentaria, garantizar una buena calidad de vida, educación de calidad, asegurar el acceso al agua y energía, promover el crecimiento económico sostenido, innovar o adoptar medidas contra el cambio climático, promover la paz y facilitar el acceso a la justicia.

Las características de los ODS son la universalidad porque aplican a todos los países a pesar del nivel de desarrollo, la interconexión entre todos los problemas de los países, cada objetivo tiene metas específicas e indicadores que miden el progreso y la participación inclusiva porque fomenta la

participación de los gobiernos, de la sociedad y del sector privado.

5. **ODS 4 Educación de calidad:** esta investigación podría servir como un recurso educativo para generar consciencia sobre la importancia de la gestión de residuos y sobre el tratamiento de agua.
6. **ODS 6 Agua limpia y saneamiento:** esta investigación aborda de manera directa la búsqueda de un tratamiento de agua para proporcionar un acceso a agua limpia y segura. Este filtro busca mejorar la calidad de agua para que en un futuro se pueda garantizar la disponibilidad y gestión sostenible.
7. **ODS 9 Industria, innovación e infraestructura:** la innovación del sistema Tohá con materiales accesibles y reciclables contribuyen a este objetivo por su enfoque hacia soluciones sostenibles e innovadoras a la industria.
8. **ODS 11 Ciudades y comunidades sostenibles:** el modelo más eficiente se puede llevar a gran escala no sólo para tratar residuos acuosos de laboratorio, sino a residuos industriales lo que beneficiaría a las ciudades y comunidades.
9. **ODS 12 Producción y consumo responsables:** la reutilización de agua tratada busca promover un consumo responsable debido a la optimización del tratamiento y una gestión eficiente.
10. **ODS 13 Acción por el clima:** esta investigación al contribuir al tratamiento de residuos acuosos de laboratorio para obtener agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 podría ayudar a mitigar efectos del calentamiento global.
11. **ODS 15 Vida en ecosistemas terrestres:** la implementación de este biofiltro con recursos renovables como las lombrices *Eisenia foetida*, carbón activado, algodón, grava y arena, promueve la biodiversidad y el uso sostenible y consciente de los ecosistemas. También es importante mencionar que el

agua tratada que cumpla con la normativa protege el entorno terrestre e incluso el acuático.

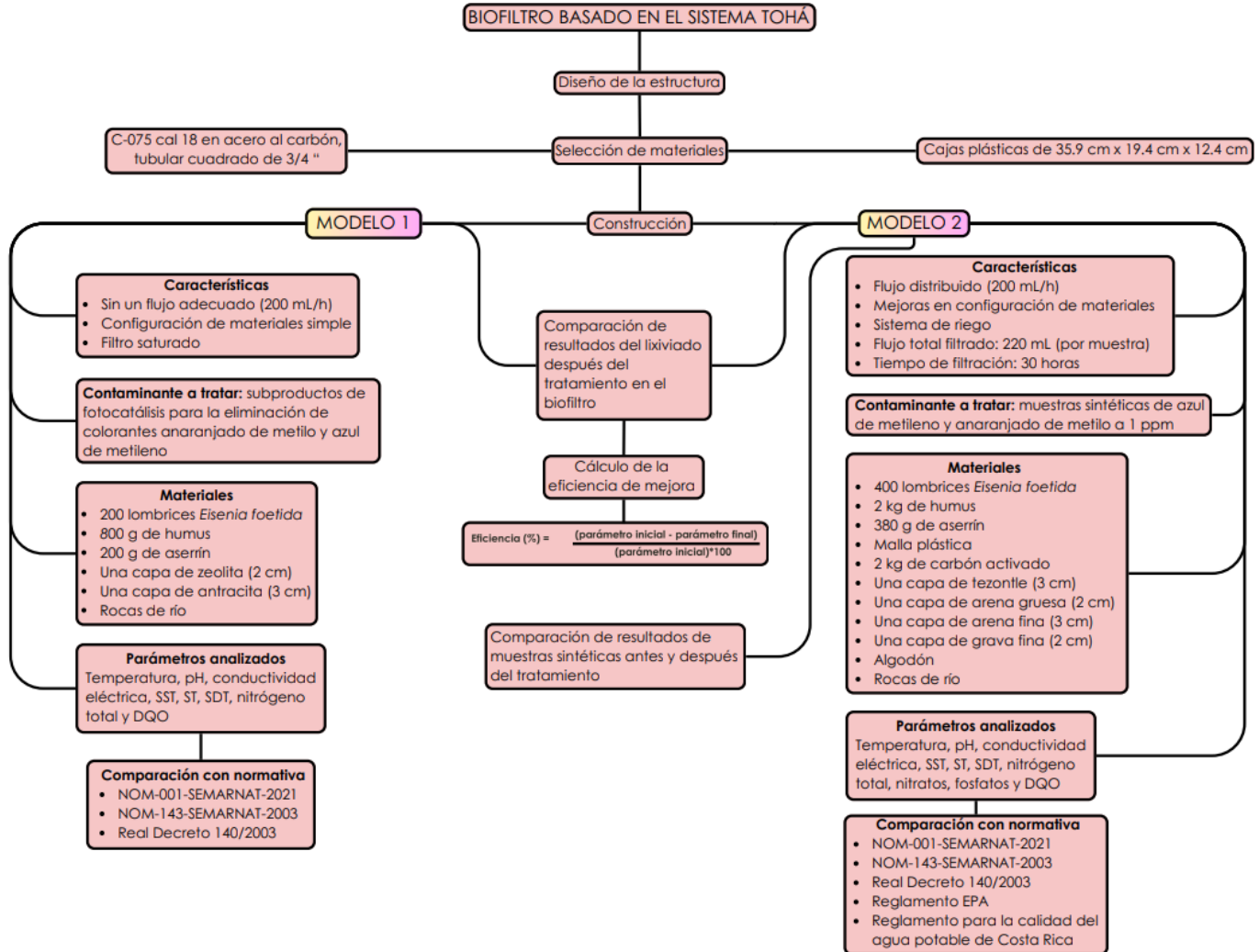
3.6 Desafíos y limitaciones

La implementación de la innovación del sistema Tohá puede presentar varios desafíos y limitaciones hablando de un modelo a mayor escala a comparación de los que se realizaron en esta investigación. A continuación, se enumeran:

1. **Costos iniciales y operativos:** la implementación y construcción de este biofiltro puede requerir una inversión significativa por los materiales y construcción de la estructura y de los estratos, sin embargo, se compensa con la disminución de los costos operativos, alimentación y cuidado de las lombrices.
2. **Escalabilidad (complejidad):** la implementación del biofiltro a medida de la cantidad de residuos acuosos de laboratorio podría aumentar, por lo que, la expansión de la tecnología aumenta.
3. **Tipo de residuos:** algunos residuos pueden ser compuestos por sustancias que las lombrices no podrían ser capaces de procesar eficientemente, sin embargo, no hay estudios al respecto.
4. **Falta de información:** existe una escasez de información sobre la *Eisenia foetida* y en general. No es un tema común y los artículos que mencionan su fascinante funcionamiento tienen un enfoque en la medicina.
5. **Condiciones específicas para las lombrices:** para el correcto desarrollo de las lombrices necesitan las siguientes controladas: temperatura, humedad, pH y dieta balanceada.
6. **Mantenimiento:** cambio de la capa de algodón de manera periódica y comida cada dos semanas para las lombrices.

Capítulo IV

4. Planteamiento metodológico



4.1 Diseño y construcción de la estructura del biofiltro

La estructura utilizada para el modelo 1 y el modelo 2 es la misma, sin embargo, la diferencia radica en la configuración, es decir, el orden y el tipo de materiales filtrantes. El objetivo es encontrar un sistema eficiente para la remoción de contaminantes acuosos de laboratorios, en este caso, el azul de

metileno y el anaranjado de metilo, por lo que las características más importantes tanto de la estructura y de los componentes son: la resistencia, durabilidad, materiales económicos y eficiencia en la remoción.

En cuanto a las pruebas realizadas, en el modelo 1 se utilizó exclusivamente el residuo de la catálisis para la eliminación de colorantes, sin embargo, la cantidad era limitada y se agotó. Se optó por probar el modelo 2 utilizando muestras sintéticas de colorante.

Antes de la adquisición de las cajas, se elaboraron planos en AutoCAD para la construcción de estructura. Tras un cuidadoso análisis de la literatura, se optó por utilizar cajas de plástico que son comunes para el almacenamiento de objetos. Se espera que sus medidas sean aproximadamente como las mostradas en la Figura 4. Finalmente se compraron 5 cajas con las siguientes medidas: 35.9cm x 19.4cm x 12.4cm incluyendo las agarraderas, con un volumen de 5.7 L (Figura 5).

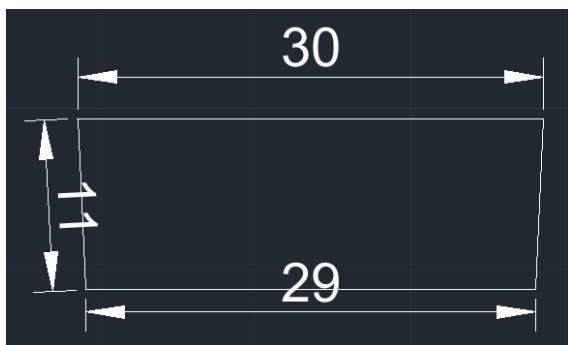


Figura 4. Plano de la caja con acotación en cm, las medidas esperadas.



Figura 5. Caja plástica con medidas 35.9 cm x 19.4 cm x 12.4 cm y un volumen de 5.7 L. En la parte inferior de la caja ha sido perforada de manera que el flujo sea uniforme.

La parte inferior (la base) de la caja tiene bordes sobresalientes, los cuales sirvieron como guía para realizar las perforaciones necesarias. De las 5 cajas, sólo 4 fueron modificadas con 60 agujeros distribuidos de manera uniforme en la base. El objetivo de los agujeros es asegurar un flujo uniforme. Las perforaciones de las cajas se hicieron con una broca de 1/8. La quinta caja no tiene ninguna perforación que su función es la recolección y almacenamiento de la muestra filtrada.

La quinta caja que es el estrato de recolección queda sin ninguna perforación, lo cual complica la recolección de la muestra filtrada.

Teniendo el tamaño de las 5 cajas, se contactó a un Ingeniero Industrial para la elaboración de la estructura. Se realizó en AutoCAD un esquema acotado con las medidas con diversas perspectivas. Se consideró un material económico, pero resistente; el Ingeniero al tener las medidas de los estratos y las medidas recomendó C-075 cal 18 en acero al carbón, es decir, un tubular cuadrado de $\frac{3}{4}$ ".

Figura 6. Plano frontal y plano vista $\frac{3}{4}$ de la estructura del biofiltro acotado.

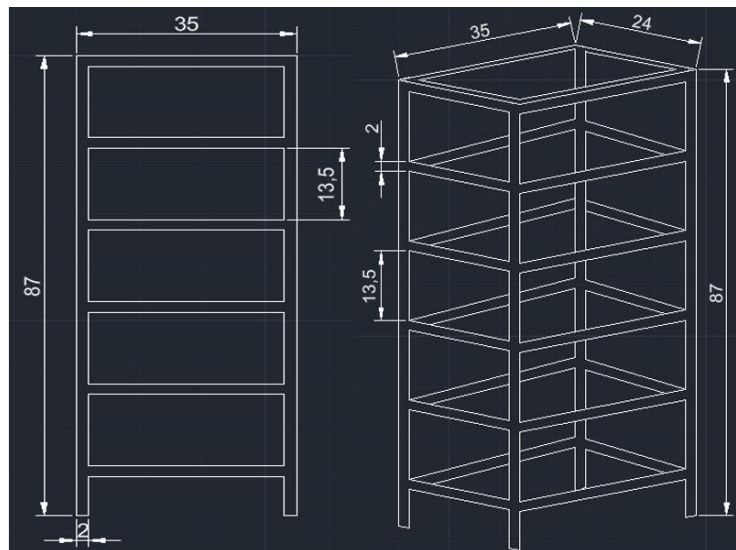




Figura 7. Estructura del biofiltro final con las cajas plásticas.

4.2 Componentes de los modelos del biofiltro

4.2.1 Modelo 1

Lombrices *Eisenia foetida*

Se eligió esta especie debido a que hay múltiples artículos que corroboran una gran capacidad de supervivencia y remoción de diferentes contaminantes, por su alta capacidad de reproducción, no tiene hábitos migratorios, su respuesta al cautiverio es buena, se adapta bien en cualquier clima, además de su capacidad regenerativa que aún no se ha estudiado por completo (Guanche García, 2015).

En los últimos 15 años se han realizado estudios sobre las impresionantes particularidades de las lombrices, entre ellas: regeneración, capacidad para procesar materia orgánica, patógenos (bacterias, hongos, virus, priones y protozoos).

Las lombrices de tierra son consideradas ingenieras del ecosistema, ya que intervienen en la aireación e infiltración del suelo, y proporcionan materia orgánica disponible para otros

organismos del suelo. En México se han descrito 93 especies, de las cuales 46 son nativas y 47 exóticas y pertenecen a las familias *Megascolecidae*, *Acanthodrilidae* y *Glossoscolecidae*. De acuerdo con las categorías ecológicas, el 72% de las lombrices de tierra en México son endógenas o geófagas de acuerdo como lo mencionan (Huerta E., 2005).

Es importante mencionar los tipos de lombrices (Guanche García, 2015):

1. **Epigeas:** su alimentación de restos de plantas que están sobre la superficie del suelo o dentro de restos vegetales, es poco común que formen madrigueras y su tamaño es de pequeño a mediano. El tipo de la *Eisenia foetida*.
2. **Endógenas o geófagas:** comedoras de suelo, forman amplios sistemas de madrigueras o galerías horizontales, su tamaño puede ser de pequeñas a grandes.
3. **Anécicas:** se alimentan de restos de plantas y suelo, suelen vivir en madrigueras o galerías verticales y son de muy grandes (Figura 8).



Figura 8. Ejemplo de lombriz anécica. Fuente: (Guanche García, 2015).

Hábitat y distribución

El entorno ideal para la *Eisenia foetida* principalmente es húmedo y oscuro, es primordial evitar la luz solar. Esta especie se desarrolla de manera adecuada en la capa superior del suelo, por ejemplo, en los estercoleros y en donde haya hojarasca debido a la humedad y a la gran cantidad de materia orgánica.

Fisiología

Las lombrices californianas, de nombre científico *Eisenia foetida* es una especie de lombriz de tierra que pertenece a la familia *Lumbriciadae*, del orden de los haplotáxidos, perteneciente a la subclase de los oligoquetos (Bouché, 1972).

La *Eisenia foetida* puede medir entre 2 y 20 centímetros y la constitución de su cuerpo:

- a) **Cutícula:** lámina quitinosa muy delgada y con estrías muy finas (Figura 9),
- b) **Epidermis:** es un epitelio simple con células glandulares y encargadas de producir mucus y sustancias cerosas,
- c) **Capas musculares** (Figura 9),
- d) **Celoma:** es un espacio retiene y almacena el líquido y envuelve el canal alimenticio; el líquido lo expulsan cuando se sienten en peligro,
- e) **Peritoneo:** delimita al celoma,
- f) **Tubo digestivo:** es un canal que abarca desde la boca hasta el ano de la lombriz. Después de la boca se encuentra el prostomio (conjunto de células del paladar), la faringe, el papo, la molleja, el intestino (Figura 9).
- g) **Sistema circulatorio:** entre el comienzo del aparato digestivo y la pared corporal hay pares de corazones contráctiles o vasos sanguíneos. La sangre absorbe el oxígeno y alimentos, además de eliminar los residuos

solubles de los riñones y libera gas carbónico por la piel (Figura 9).

- h) **Sistema respiratorio:** es un sistema primitivo, no existen pulmones como tal, el oxígeno pasa por la pared del cuerpo. (Ferruzzi, 1986), menciona que tiene 5 pares de corazones,
- i) **Clitelio:** estructura tegumentaria glandular que se desarrolla en la edad reproductiva de la lombriz (Figura 9),
- j) **Sistema excretor:** este proceso es realizado por órganos especiales llamados nefridios, hay un aproximado de 2 por cada anillo y son parecidos a un cuerno de vaca. La extremidad más abierta está dentro de un celoma y después los tubos uriníferos que desechan la orina por los poros uriníferos; al ser células internas son ciliadas y sus movimientos permiten retirar la orina del celoma (Figura 9).
- k) **Sistema nervioso:** de tipo ganglionar escaleriforme, tiene dos ganglios dorsales supraesofásicos, es decir, los ganglios cerebrales unidos por la comisura transversal, de estos parten dos tiras laterales que se dirigen hacia atrás y hacia abajo a otros dos ganglios subesofágicos de igual manera unidos.
- l) **Visión:** a lo largo de su epidermis hay un gran número de células fotosensibles, especialmente en el protomio. Sus órganos de visión son primitivos. Las lombrices huyen de la luz, no detectan la luz roja y los rayos ultravioletas les provocan la muerte (Tineo, 1994); (Cristales, Módulo de capacitación de la lombricultura, 2000); (Ferruzzi, 1986); (Santos, 1997).

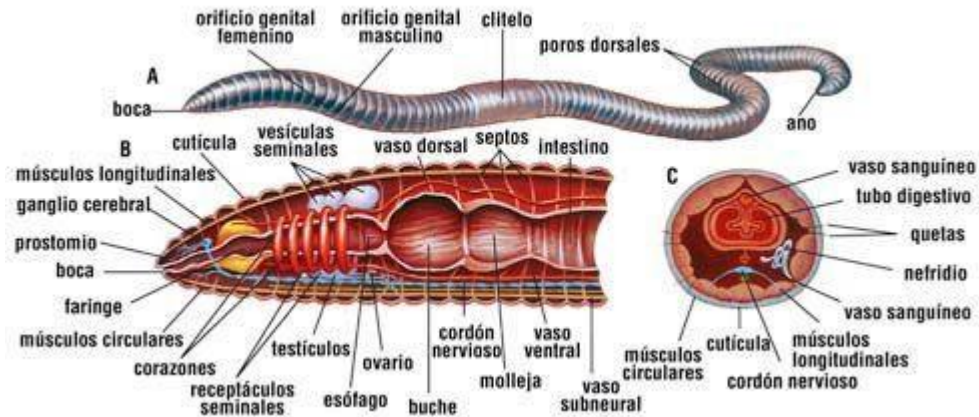


Figura 9. Partes de una lombriz *Eisenia foetida* de la boca hasta el ano.

(Fuente:

https://lookfordiagnosis.com/mesh_info.php?term=Oligoquetos&lang=3, s. f.).

A pesar de tener órganos y sistemas primitivos son complejos por su tamaño y los procesos que generan las lombrices. Tienen entre 40 y 120 anillos y según la ubicación de los anillos es su función. La primera sección contiene la boca y el prostomio, en cada anillo hay pequeñas cerdas para que se puedan mover a su voluntad. La secreción lubricante para su desplazamiento se llama mucus.

Su musculatura es poderosa para su tamaño, permite procesar el alimento y su desplazamiento. Consideradas sanitizadoras naturales porque no contraen ni transmiten enfermedades, los desechos son transformados en *humus*.

Ciclo de vida

El ciclo biológico de la *Eisenia foetida* comprende de 3 etapas (Figura 10):

- 1) **Cocón o cápsula:** su color al inicio es blanco amarillento y cambia de color conforme su madurez, puede ser de color café cuando eclosione.

- 2) Lombriz joven: son aquellas que eclosionan de los cocones, de color blanco semitransparente.
- 3) Lombriz clitelada o adulta: esta fase se alcanza a los tres meses de edad y comienza a reproducirse, se aparea cada 7 días aproximadamente.

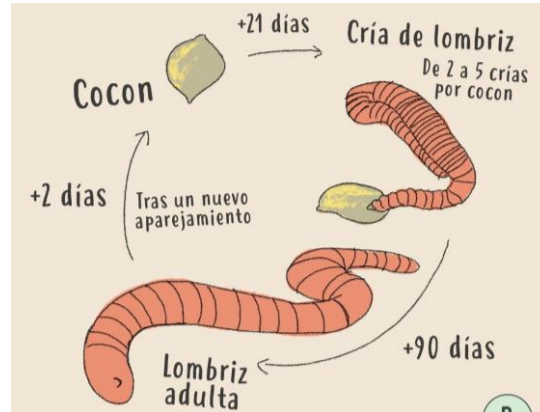


Figura 10. Ciclo de vida de la lombriz *Eisenia foetida*. (Fuente: <https://www.purplant.es/blog/todo-sobre-lombriz-roja-californiana/>, s. f.).

Los cocones eclosionan entre 12 y 21 días de incubación según la temperatura del ambiente, cada huevo o cápsula contiene de 2 a 20 lombrices; las lombrices recién nacidas de color transparente toman un color rosado entre los 5 y 7 días y el color oscuro es después de los 15 a 20 días (Ferruzzi, 1986).

La lombriz *Eisenia foetida* es hermafrodita, sin embargo, no se puede auto fecundar debido a que necesita un intercambio de esperma (Edwards, 1996).

Alimentación

Las lombrices comen por succión ya que no tienen dientes, por lo que es de suma importancia compostar los alimentos antes de darlo como alimento porque a que se debe superar la fase termófila del proceso, esto debido a que las temperaturas pueden llegar a ser 50-60°C y afectarían el desarrollo de las lombrices (Guanche García, 2015).

Los alimentos orgánicos útiles para la dieta de la *Eisenia foetida* son (Serebrinsky, 2004); (Gastón, Martínez, & Córdón, s. f.):

- Aserrín y restos de industrias relacionadas con la madera,
- Restos vegetales y de cultivo,
- Estiércol de aves, porcinos y vacuno,
- Restos de cocina como frutas, verduras, café molido e infusiones,
- Tejidos vegetales como algodón, cartón, papel sin tinta, cartón, lino o esparto.

Condiciones óptimas para el desarrollo

Sus épocas reproductivas son en las épocas más frías y cálidas donde la temperatura oscila entre los 14 y 27 °C, sin embargo, cuando la temperatura es menor a los 7 °C dejan de reproducirse, pero siguen generando abono (Cristales, Sistema de crianza de lombriz de tierra, alternativas de su uso para el manejo de los desechos sólidos, 1997).

Antracita

Es un carbón mineral, formado por la transformación de plantas por un proceso lento por efecto de la presión y la temperatura. Es el más denso y duros de los carbones con un alto contenido de carbono (86-82%) y una humedad entre 7-10% (Maldonado, 2021).

Al ser más dura y quebradiza se le conoce como carbón de betún. Se enciende con dificultad y se quema sólo con un suministro de aire fuerte con una llama corte debido a que desarrolla poco gas. El poder calorífico es mayor que el de los demás tipos de carbón (Fossen, 2020).

Su principal aplicación es para la obtención de energía eléctrica en centrales térmicas de carbón, pero también se usa para calefacción, filtración de agua, fabricación de electrodos

de carbono, como agente reductor para la obtención de metales a partir de minerales (industria siderúrgica), mejora del suelo en agricultura, industria química, eliminación de olores, filtración de aire, fabricación de carbón activado y tratamiento de aguas residuales como adsorbente de contaminantes (Romero, s. f.).

Se presenta en masas homogéneas de gran grosor, color negro brillante, con estrías y vetas que varían de aspecto opaco a vítreo, es una roca dura, pero se fractura fácilmente (Geocontacto, 2023).

Zeolita

Es un mineral natural de origen volcánico, son de la familia de aluminosilicatos micro porosos. Pueden hidratarse y deshidratarse, es decir, se puede reutilizar más de una vez. Su uso y venta es porque se considera un absorbente comercial, da la coloración en gases y líquidos y en control de la contaminación (polución) (Grace Enriching Lives, Everywhere, s. f.); (Britannica, s. f.).

Se encuentran en rocas sedimentarias y en estratos volcánicos de diversos tipos, su clasificación depende del tipo de ambiente donde se forme: lagunas salinas o alcalinas, superficies y suelos alcalino, sedimentos de fondo oceánico, zonas donde hay sistemas hidrológicos abiertos y lugares donde hay alteración hidrotermal.

Su composición es por tetraedros formados por un catión y cuatro átomos de oxígeno, el catión puede ser de silicio, aluminio y germanio, aunque el silicio predomina. Existen varios tipos de zeolita natural constituidas por aluminio, silicio, hidrógeno, oxígeno y un número considerable de moléculas de agua.

Tienen múltiples usos: la agricultura, acuicultura, alimentación del ganado, intercambiador iónico, catalizar en industrias químicas y medio filtrante en el tratamiento de agua.



Figura 11. Antracita y zeolita, materiales utilizados en la configuración del modelo 1. Fuente: zeolita - Aguamarket; antrasitt - Store norske leksikon (snl.no)

Rocas de río

Tienen un origen natural debido que su formación es por procesos naturales en los lechos de ríos. Su forma normalmente es redondeada por la erosión causada por el agua, es decir, sus bordes son suaves y formas redondas, tienen diversos tamaños (Mármoles Puente, 2020).

Las rocas de río son consideradas como substratos en un biofiltro. Las funciones principales es el soporte de organismos en las rocas, la permeabilidad, es decir, el movimiento del agua, facilitan el drenaje del agua tratada del estrato de recolección hacia la salida, soporte estructural debido a que proporciona una base estable y ayudan a la distribución uniforme del agua (Rey C., 2018); (PGCCRD/MARENA, S. f.); (Water and sanitation program, 2006).

Sin embargo, aunque no es la principal función de este material y no se ha probado su eficacia como material filtrante,

las rocas de río puede atrapar algunas partículas que no han sido filtradas en los estratos anteriores (ECHO community, 2001).

Aserrín

Es el conjunto de partículas o polvillo que se desprende de la madera cuando es aserrada, también incluye partículas de madera producidas durante el proceso y manejo de la misma, además del polvo del proceso de generación de viruta, que es parte del material residual con forma de lámina curvada (Reyes Mejía, 2013).

Es un tipo de biomasa que se puede utilizar como recurso energético, entra en la categoría de biomasa residual debido a que se genera en actividades de agricultura, ganadera, forestales, industria maderera y agroalimentaria (Serret Guasch, 2016).

La composición principalmente es por fibras de celulosa con la lignina que es un polímero aromático tridimensional que actúa como relleno y aglutinante en la pared celular, estas características presentan un alto grado de cristalinidad y esto proporciona una resistencia a la madera (Barrera Ochoa, 2016).

El uso de este material en el biofiltro es porque sirve como alimento de lombrices, medio de filtración, retención de humedad y soporte estructural. El aserrín se aprovecha en todos los tamaños, sin embargo, cuando es pulverizado es más fácil la descomposición (Coronel Pazmiño, 2015).

Orden y composición de los estratos

1. Primer estrato (biofiltro superior):

- Aproximadamente 100 lombrices *Eisenia foetida* (incluyen adultas, recién nacidas, crías y cocones),
- 400 gr de humus,
- 200 gr de aserrín.

2. Segundo estrato (biofiltro inferior):

- Composición idéntica al primer estrato.

3. Tercer estrato (filtro superior):

- Una capa de 2 cm de zeolita.

4. Cuarto estrato (filtro mixto inferior):

- Una capa de 3 cm de antracita.

5. Quinto estrato (recolección):

- Rocas de río aproximadamente un 70% del volumen de la caja.



Figura 12. Primer modelo armado.

4.2.2 Modelo 2

Modificaciones

El estrato de recolección se modificó de manera que optimiza la recolección de la muestra final:

1. La caja de plástico se acomoda de manera que un tercio de la caja quede fuera de la estructura metálica con la finalidad de que no afecte la perforación donde saldrá la muestra filtrada.
2. Para el punto de recolección que sólo es una esquina, se perforó y se optó por colocar un popote a presión lo cual

no contamina las muestras debido a que en cada muestra se puede cambiar y al colocarse a presión no hay fugas.

3. Se colocó una tela geotextil de plástico para retener la grava gruesa y las rocas de río y que no salgan del punto de recolección.
4. El popote se dobla y se coloca una pinza con la finalidad de impedir la salida de la muestra, también se coloca un vaso de precipitados para evitar cualquier fuga.



Figura 13. Modelo 2 con la modificación en el estrato de recolección.

Se agregaron nuevos materiales filtrantes en capas como: algodón, carbón activado, tezontle, grava fina y gruesa, arena fina eliminando totalmente la zeolita y la antracita.

Materiales agregados

Algodón

Este material es una fibra textil vegetal, es considerada como una de las fibras más importantes. Las fibras están compuestas inicialmente por celulosa, que es un biopolímero compuesto por

moléculas de glucosa; posteriormente las fibras contienen proteínas y azúcares (Enciclopedia Humanidades, s. f.).

Dentro de sus propiedades es que en el biofiltro al colocarse al final del estrato sirve como una barrera física para así retener los sólidos o partículas presentes en el agua, ayuda a distribuir de manera uniforme el flujo de agua evitando la saturación. Al detener los sólidos asegura que los elementos filtrantes no pasen a los siguientes estratos (Iturralde, 2022).

Carbón activado

Su presentación puede ser en polvo, granular o peletizado. El componente principal es carbono, aunque también contiene un porcentaje de oxígeno, hidrógeno, azufre, nitrógeno y cloro. Su estructura es fina, pero tiene la capacidad de absorber gas, líquido o sólido coloidal. Su adsorción es afín a las sustancias no polares aunque también depende de las características las sustancias por adsorber como el punto de ebullición, la temperatura y la concentración (CHIWATEC, s. f.).

Sus aplicaciones son la extracción de metales, potabilización del agua, medicina para envenenamiento, tratamientos de aguas residuales, purificación y purificación de sustancias, purificador de aire, etcétera (Equipos y laboratorio, s. f.).

Posee una gran cantidad de porosidad, una gran área superficial, su estructura es cristalina, variedad en el tamaño de poros, es un material reutilizable, tiene capacidad catalítica, resistencia térmica y se ha comprobado la capacidad de eliminar toxinas (Equipos y laboratorio, s. f.).

Arena gruesa y fina

La arena generalmente es un material utilizado en la construcción de inmuebles, al ser un material natural, su extracción es cerca cercana a cuerpos de agua. Su textura es granulada y áspera, el tamaño de la partícula es consistente de 2 a 4.7 mm (cemix, s. f.); (HOMEGOLDEN, s. f.).

Es un material reconocido por su dureza, durabilidad, resistencia, por su drenaje debido a que es útil en proyectos de drenajes y sistemas de filtración porque permite el paso del agua y evita la erosión (RIVEMAT, s. f.).

La diferencia entre la arena fina y la gruesa es que la fina se utiliza para realizar el hormigón y revestimientos, es decir, dar un acabado más fino por su granulometría y la gruesa es recomendada para la preparación de mezcla para unir ladrillos y bloques (RIVEMAT, s. f.).

Grava fina

La grava fina se crea por medio de la trituración de máquinas especializadas, el uso de este material dependerá de la granulometría. La grava fina es utilizada más para un fin estético (VISE, s. f.).

El tamaño de partícula oscila entre 5 y 10 mm, proporciona una superficie lisa, se compacta con facilidad, permite un buen drenaje gracias al espacio entre partículas (La casa del constructor, s. f.).

Sus usos principales son la creación de terrazas y patios, pavimentación, el relleno de adoquines, mezclas de hormigón, zonas decorativas, sistemas de drenaje y base para pavimentos (Cementos Torices, 2022); (Cementos Torices, 2022).

Tezontle

Se considera un material inerte, con un valor de pH cercano a 7 (neutralidad), baja capacidad de intercambio catiónico que significa una menor capacidad de retención o intercambio de nutrientes, una buena retención del agua que depende de la porosidad ayuda a prevenir problemas fitotóxicos y es ligero (Bastida, 1999); (Trejo, 2013).

Orden y composición de los estratos

El diseño del modelo 2 del biofiltro consta de 5 estratos, cada uno con un volumen de 5.7 L con dimensiones de 35.9cm x 19.4cm x 12.4cm. Para optimizar el mantenimiento se colocó una malla plástica entre cada material. La composición de cada uno, de arriba hacia abajo el orden es:

- **Primer estrato (biofiltro superior):**
 - 1) 200 lombrices *Eisenia foetida* (incluyen adultas, recién nacidas, crías y cocones),
 - 2) 1 kg de humus,
 - 3) 190 gramos de aserrín ,
 - 4) Una malla plástica,
 - 5) 3 cm de carbón activado y,
- **Segundo estrato (biofiltro inferior):**
 - 1) Composición idéntica al primer estrato.
- **Tercer estrato (filtro mixto superior):**
 - 1) Carbón activado 5 cm,
 - 2) Tezontle granulo fino 3 cm,
 - 3) Arena gruesa 2 cm y,
 - 4) algodón 2 cm.



Figura 14. Tercer estrato, después de filtrar una muestra.

- **Cuarto estrato (filtro mixto inferior):**

- 1) Carbón activado 5 cm,
- 2) Arena fina 3 cm,
- 3) Grava fina 2 cm y,
- 4) algodón 2 cm.



Figura 15. Cuarto estrato, después de filtrar una muestra.

- **Quinto estrato (recolección):**

- 1) Rocas de río 24.44% del volumen final (1.4 L),
- 2) El espacio restante, que es aproximadamente más de la mitad del volumen, permite la recolección y el flujo del agua filtrada.

Cada estrato tiene una función específica:

- **Primer y segundo estrato:** la biodegradación inicial de contaminantes y la filtración biológica,

- **Tercer y cuarto estrato:** proporcionan filtración física (arena y grava), adsorción (carbón activado) e intercambio iónico (tezontle).
- **Quinto estrato:** diseñado para la recolección final de muestra tratada.

4.3 Preparación de muestras sintéticas de residuos acuosos de laboratorio

Azul de metileno y anaranjado de metilo

La preparación de las muestras es idéntica, aunque cada colorante se prepara por separado. Se pesaron 5 mg de cada colorante, que se disolvieron en un poco de agua desionizada. Posteriormente, se añadió agua desionizada hasta completar un volumen total de 5 litros, que da como resultado una concentración de 1 ppm.

Es fundamental evitar la exposición de las muestras sintéticas a la luz, ya que provocaría su degradación y por ende, interferencias con los resultados finales.

4.4 Proceso de filtración

4.4.1 Configuración del sistema de filtración

Se diseñó una estrategia de filtración con el objetivo de optimizar el rendimiento del filtro y que la distribución y flujo de la muestra sea constante. Se implementó un sistema de riego por goteo con puntas especiales distribuidas uniformemente sobre la superficie del primer estrato, organizadas en una matriz de 2x4 en el área superficial de 35.9cm x 19.4cm x 12.4 cm.

Cada que se filtre una muestra se cambiarán tanto las puntas como la botella para evitar alguna interferencia en los análisis. Además, se consideró un flujo para prevenir la saturación de humedad a las lombrices y garantizar una que la oxigenación en el sistema fuera la óptima.



Figura 16. De izquierda a derecha, puntas colocadas en una matriz 2x4 y posteriormente punta utilizada para riego por goteo.

La distribución equidistante de las puntas asegura una cobertura uniforme del primer estrato. El sistema se diseñó para un flujo de 200 mL/h, debido a que las ventajas de que el flujo sea lento es el mayor tiempo son:

- Un menor riesgo de saturación,
- Un mayor tiempo de contacto entre el agua y los materiales filtrantes lo que mejora la eficiencia de remoción de contaminantes y,
- Optimización de procesos biológicos para los estratos con *Eisenia foetida* ya que tendrían más tiempo para procesar los contaminantes.

Considerando que el flujo sea de 200 mL/h, cada punta de goteo debería suministrar aproximadamente 25 mL/h = 0.42 mL/min.

$$\text{Flujo por punto} = \frac{\text{Flujo total}}{\text{Número de puntas}}$$

$$\text{Flujo por punto} = \frac{200 \text{ mL/h}}{8} = 25 \text{ mL/h}$$

4.4.2 Procedimiento de filtración

Se utilizan 24 botellas de PET con capacidad de 500 mL, previamente lavadas, y 24 puntas de goteo con boquilla adaptadas para las botellas de PET.

Antes de comenzar la filtración de las muestras se hizo una prueba con agua potable para verificar que el biofiltro funcione adecuadamente. Cada muestra utilizará 8 botellas y para evitar contaminación o alteración, se cambiarán cada que se filtre una muestra diferente.

Se ajustan las puntas para que el flujo total sea de 200 mL/h. Por lo que cada punta de goteo suministra aproximadamente 25 mL/h = 0.42 mL/min. Para el cálculo de gotas se toma como referencia el valor 0.05 mL como el equivalente de una gota, si el flujo que se requiere es de 0.42 mL/min por punta, las gotas necesarias serían:

$$\frac{0.42 \text{ mL/min}}{0.05 \text{ mL/gota}} \approx 8.4 \text{ gotas/min}$$

Redondeando a 9 gotas por minuto, para mejorar la perspectiva práctica sería 1 gota cada 7 segundos y en una hora serían alrededor de 514 gotas. Cada botella se llena a 200 mL para un total de 22000 mL. Se colocan simultáneamente las 8 botellas con puntas ajustadas en la matriz ya señalizada.

Se registra el tiempo que tarda la muestra en pasar a través de cada estrato hasta llegar al estrato de recolección, que da un aproximado de 30 horas. Esto proporciona el tiempo total del proceso de filtración. Se recolecta la muestra en envases adecuados según la cantidad de muestra filtrada. Se deja reposar 24 horas el biofiltro entre cada muestra, esto tiene como objetivo no saturar el biofiltro ni ahogar a las lombrices.

Mantenimiento

Después de cada ciclo de filtración, se verifica el estado de los materiales filtrantes y se realiza el mantenimiento necesario.

4.5 Análisis de muestras filtradas

Se analizarán 5 muestras diferentes con duplicado sólo de los parámetros de DQO, SST, ST, SDT, nitratos y fosfatos. Las abreviaturas de las muestras son las siguientes:

L: lixiviado (agua de garrafón filtrada a través del biofiltro)

MN: muestra sintética de anaranjado de metilo a 1 ppm

MA: muestra sintética de azul de metileno a 1 ppm

MNF: muestra MN después de pasar por el biofiltro

MAF: muestra MA después de pasar por el biofiltro

B: blanco (agua desionizada)

pH

La medición de pH se realiza utilizando un potenciómetro PC 18 Conductronic, es fundamental calibrar el equipo con las soluciones buffer antes de medir las muestras. Se enjuaga el electrodo con agua destilada y se introduce en la muestra esperando a que la lectura se estabilice (aproximadamente entre 30 segundos a 1 minuto), repetir con cada muestra. Para este parámetro se consideró la NMX-AA-008-SCFI-2016 Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales y residuales tratadas.

Temperatura

La temperatura se midió al mismo tiempo que el pH, en cada medición se anotaron los resultados. Se midió este parámetro según la NMX-AA-007-SCFI-2013.

Conductividad

Se midió con el potenciómetro PC 18 Conductronic, el procedimiento fue según NMX-AA-093-SCFI-2018.

Sólidos Suspendidos Totales y Sales Disueltas

Se lleva a cabo la preparación de los crisoles Gooch y cápsulas de porcelana, los cuáles son etiquetados y pesados antes de ser introducidos en la mufla a 550°C durante 20 minutos. Posteriormente, se transfieren a una estufa a 100°C ± 5°C durante 20 minutos y se enfrían en un desecador hasta alcanzar un peso constante. Todos los procedimientos se llevan a cabo conforme la NMX-AA-034-SCFI-2015 Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

Determinación de sólidos totales (ST)

Se añaden 50 mL de muestra en cada cápsula, que posteriormente se colocan en la estufa a 100°C ± 5°C, se enfrían en el desecador y se pesan; se registran los valores.

$$ST = \frac{(m_3 - m_1)}{V} * 1000000$$

ST = sólidos totales, en mg/L

m₃ = es la masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en g

m₁ = es la masa de la cápsula vacía a masa constante, en g

V = es el volumen de muestra, en mL

Determinación de sólidos suspendidos totales (SST)

Se coloca un papel filtro en los crisoles, se miden 100 mL de muestra homogenizada y se filtra utilizando una bomba de vacío. Los crisoles se secan en la estufa a 100°C ± 5°C aproximadamente una hora y trasladarlos al desecador y determinar su peso.

$$SST = \frac{(m_6 - m_2)}{V} * 1000000$$

SST = sólidos suspendidos totales, en mg/L

m_2 = es la masa del soporte secado con el filtro antes de la filtración, en g

m_6 = es la masa del soporte secado con el filtro, en g

V = es el volumen de muestra, en mL

Nitrógeno Total

Se homogeniza vigorosamente seguida de la medición de 50 mL de cada muestra y etiquetar cada matraz de Kjeldahl con el código de cada muestra. Durante la etapa de digestión se vierte cada muestra en su matraz, se añaden 10 mL de reactivo de digestión con 6 perlas de ebullición y se calientan gradualmente hasta la ebullición hasta que el volumen se reduzca a la mitad. En la etapa de destilación, la muestra digestada se transfiere a un vaso de 50 mL y se mezcla con 10 mL de disolución de hidróxido-tiosulfato de sodio. El destilado se recoge en un vaso con 10 mL de solución indicadora de ácido bórico. Finalmente, el destilado se titula utilizando una solución de ácido sulfúrico hasta obtener un cambio de color. Todos los procedimientos se realizan según la NMX-AA-026-SCFI-2010, que establece los lineamientos para la medición de nitrógeno total Kjeldahl.

Cálculos:

Para calcular el nitrógeno total, se necesita calcular antes el nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico.

Nitrógeno amoniacal

$$Y_{(N-NH_3)} = (V_A - V_B) * c(H_2SO_4) * A_r(N)/V_m$$

$Y_{(N-NH_3)}$ = es la concentración de masa de nitrógeno amoniacal

V_A = son los mL de ácido sulfúrico gastados en la titulación de la muestra

V_B = son los mL de ácido sulfúrico gastados en el blanco

$c(\text{H}_2\text{SO}_4)$ = es la concentración del ácido sulfúrico en mol/L

V_m = son los mL de muestra

$A_r(\text{N})$ = masa atómica del nitrógeno

Nitrógeno orgánico

$$Y_{(\text{NOrg})} = (V_C - V_B) * c(\text{H}_2\text{SO}_4) * A_r(\text{N})/V_m$$

$Y_{(\text{NOrg})}$ = es la concentración de masa de nitrógeno orgánico

V_C = son los mL de ácido sulfúrico gastados en la titulación de la muestra

V_B = son los mL de ácido sulfúrico gastados en el blanco

$c(\text{H}_2\text{SO}_4)$ = es la concentración del ácido sulfúrico en mol/L

V_m = son los mL de muestra

$A_r(\text{N})$ = masa atómica del nitrógeno

Nitrógeno Total

$$Y_{(\text{NTK})} = Y_{(\text{N-NH}_3)} + Y_{(\text{N-Org})}$$

$Y_{(\text{N-NH}_3)}$ = es la concentración de masa de nitrógeno amoniacal

$Y_{(\text{N-Org})}$ = es la concentración de masa de nitrógeno orgánico

$Y_{(\text{NTK})}$ = es la concentración de masa de nitrógeno total Kjeldahl

Demanda Química de Oxígeno

Para el inicio del análisis se verifica que todos los tubos de la marca HANNA instruments HI93754C-25 high range estén sellados y libres de cualquier tipo de contaminación. Posteriormente se homogenizan las muestras. En la etapa de preparación de los tubos de digestión, se etiquetan con los códigos de las muestras, incluyendo el blanco (agua destilada) para su comparación. Se

añaden 0.2 mL de muestras en cada tubo con una micropipeta. Para homogenizar se invierten los tubos lentamente tres veces. La digestión se realiza precalentado la mufla 150°C, colocando los tubos en un vaso de precipitados y manteniéndolos a esta temperatura por dos horas. Posteriormente, se eleva la temperatura a 170°C durante 15 minutos. Después se retiran los tubos, se espera 20 minutos antes de invertirlos nuevamente y dejarlos enfriar. Finalmente se enciende el espectrofotómetro LaMotte 2000-02 y se selecciona la configuración para DQO; se limpia el tubo del blanco para ajustar el valor cero del equipo y se procede a medir cada muestra. Todos los procedimientos se realizan conforme la norma NMX-AA-030/2-SCFI-2011.

Fosfatos

Se verifica que los tubos estén etiquetados y lavados correctamente y que contengan 10 mL de la muestra correspondiente. Se procede a recortar de manera cuidadosa de dos lados del sobre low range marca HANNA HI93713-0 y se añade el contenido al tubo con la muestra. Después se agita el tubo hasta disolver completamente el reactivo en polvo y se deja reposar durante 3 minutos para permitir la reacción. Para la medición se enciende y configura el espectrofotómetro LaMotte 2000-02 en el programa correspondiente. Se ajusta el cero con el blanco (agua desionizada) y se procede a medir todas las muestras. Todos los procedimientos se realizan conforme la NMX-AA-029/1-SCFI-2008.

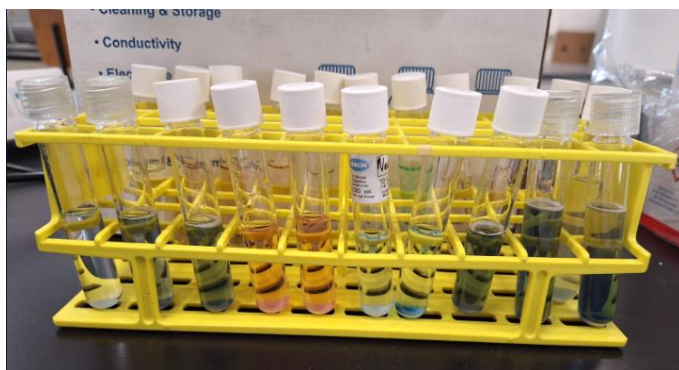


Figura 17. Tubos con la muestra correspondiente y el reactivo para determinar fosfatos.

Nitratos

Para este análisis se comprueba que los tubos estén correctamente etiquetados y limpios, cada tubo debe contener 10 mL de muestra. Se recorta cuidadosamente dos lados del sobre low range marca HANNA HI93728-0 y se vierte el reactivo en el tubo con la muestra. Se agita el tubo hasta disolver completamente el reactivo en polvo y se deja reposar durante 5 minutos para permitir la reacción. Para la medición se enciende y configura el espectrofotómetro LaMotte 2000-02 en el programa correspondiente. Se ajusta el cero con el blanco (agua desionizada) y se procede a medir todas las muestras. Todos los procedimientos se realizan conforme la NMX-AA-079-SCFI-2001.



Figura 18. Tubos con la muestra correspondiente y el reactivo para determinar nitratos.

4.6 Mantenimiento del biofiltro

Fue necesario cambiar las capas de algodón de los estratos cada que se filtraba una nueva muestra, para evitar interferencias en los análisis de laboratorio. Cada semana se revisó el estado de las lombrices y que siguieran reproduciéndose y el tamaño de estas. Además, de proporcionar comida (fruta, verdura y residuos orgánicos no ácidos) para las lombrices cada semana o cada dos semanas, dependiendo si se terminaban su porción.

Capítulo V

5. Resultados

5.1 Análisis de los residuos acuosos de laboratorios tratados y comparación con la normativa correspondiente

Este estudio evaluó dos modelos de configuración de un biofiltro para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio. Se tomarán como guía el valor instantáneo (v. i.) de la descarga en ríos, arroyos, canales y drenes y la descarga en suelos de áreas verdes debido a que sólo se hizo un lote de cada muestra.

Los parámetros que fueron medidos por duplicados fueron SST, ST, SDT, DQO, nitratos y fosfatos, por lo que en resultados se colocará el promedio del duplicado.

Resultados del modelo 1

En la Tabla 1 muestran los resultados del modelo 1 que consiste únicamente del lixiviado (agua de garrafón filtrada a través del biofiltro). Es importante destacar que las muestras filtradas son de un contaminante diferente a la del modelo 2 como se menciona en la metodología.

Modelo 1				
Parámetro	Resultado	LMP agua V.I.	LMP suelo V.I.	Normativa
pH	8.22	6 - 9	6 - 9	NOM-001-SEMARNAT-2021
T °C	14.7	35	35	
DQO mg/L	1950.5	210	84	
NTK mg/L	26.88	35	NA	
SST mg/L	750	84	42	
SDT mg/L	73.5	500	-	NOM-143-SEMARNAT-2003
CE µs	8.19 mS	2,500	-	Real Decreto 140/2003
ST mg/L	823.5	-	-	-

Tabla 1. Resultados fisicoquímicos del modelo 1 y comparación con normativa.

Para la interpretación de la Tabla 1 T°C se refiere a temperatura y CE a conductividad eléctrica. Se presentan los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos, los parámetros que exceden los límites máximos permisibles se han resaltado para su fácil identificación. Los resultados muestran que el pH y el nitrógeno total están cerca de los LMP de las normas. En cuanto la temperatura y SDT no sobrepasan los LMP establecidos por las normas. Sin embargo, en los parámetros de conductividad eléctrica, SST y DQO sobrepasan los LMP por un factor aproximado de 10 veces, lo cual son resultados alarmantes. Dado que la muestra del lixiviado sobrepasa al menos un parámetro, no es apta para su descarga en cuerpos de agua ni para riego en áreas verdes.

Resultados del modelo 2

Parámetros químicos

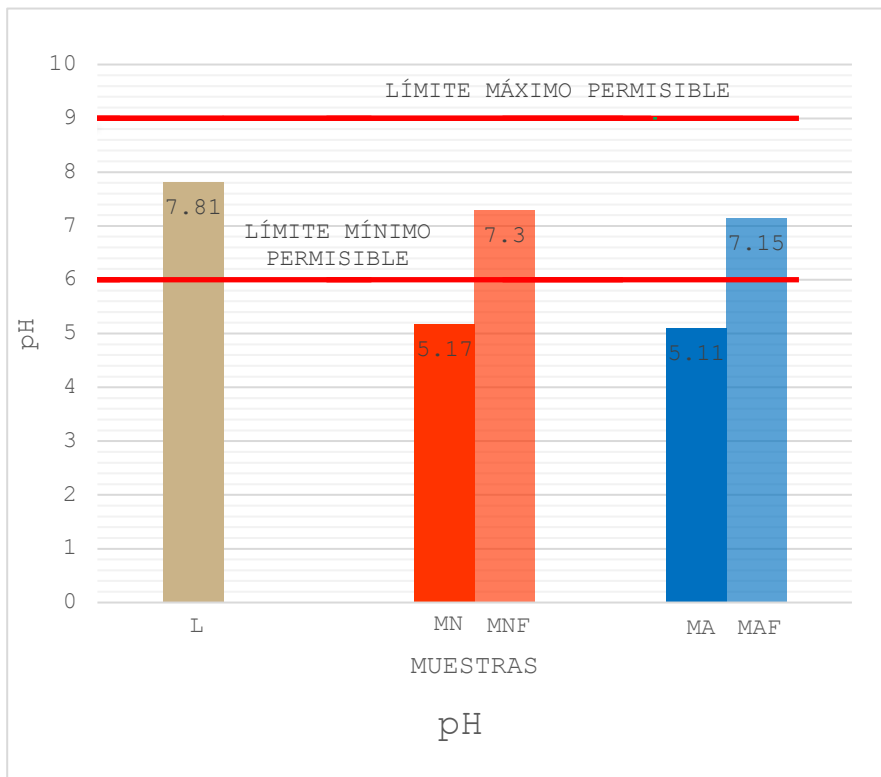
Parámetros químicos del modelo 2							
Muestra/ Parámetro	pH	DQO mg/L	Nitrógeno mg/L	CE μ S	SDT mg/L	Fosfatos mg/L	Nitratos mg/L
B	-	-	0	-	-	-	-
L	7.81	62.5	6.7233	500	12.5	1.225	4
MN	5.17	33.5	2.2411	6	3.5	0	1
MNF	7.3	48.5	8.9644	470	13.5	1.285	4
MA	5.11	34	2.2411	6	1	0	1.5
MAF	7.15	48.5	6.7233	468	16	1.185	4.5
LMP V.I. drenes	6-9	210	35	2,500	500	25	10
LMP V.I. suelo	6-9	84	NA	-	-	-	-
Normatividad	NOM-001-SEMARNAT-2021			Real Decreto 140/2003	SEMARNAT- NOM-143- 2003	Reglamento para la calidad del agua potable de Costa Rica	Reglamento EPA

Tabla 2. Resultados químicos de las muestras filtradas en el modelo 2 y su comparación con la normativa correspondiente.

Para su interpretación CE se refiere a conductividad eléctrica. En la Tabla 2 se puede observar los parámetros químicos del modelo 2. Los datos indican que todos estos parámetros están por debajo de lo LMP de la normatividad entre un 30% y 50%, lo que indica un rendimiento excelente. Este modelo incorpora más compuestos filtrantes y un sistema de riego que demuestra ser más efectivo que el modelo 1. Estos hallazgos sugieren que el modelo 2 no sólo cumple con la normativa, sino que ofrece un margen de seguridad significativo.

pH

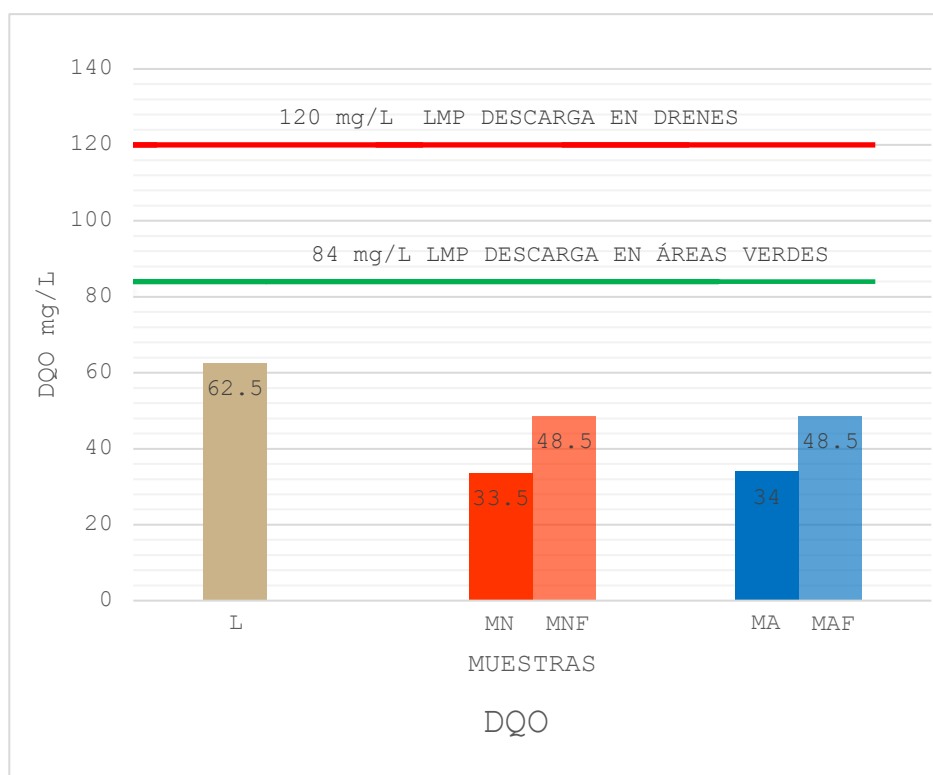
En la Gráfica 1 se presentan los niveles de pH de las muestras L, MN, MNF, MA y MAF. Se observa que las muestras MN y MA están debajo del límite mínimo permisible. Las muestras MNF y MAF aumentaron en los niveles de pH dentro de los límites permitidos. Por último, L presenta un valor de pH dentro del rango permitido.



Grafica 1. Niveles de pH en las muestras tratadas en el modelo 2.

DQO

En la Gráfica 2 se presentan los niveles de DQO medidos en las muestras del modelo 2. La muestra L presenta el valor más alto de DQO entre todas las muestras analizadas sin sobrepasar el LMP, las muestras MN y MA muestran valores más bajos que las demás muestras; se observa un ligero aumento de DQO en las muestras MNF y MAF en comparación con MN y MA, respectivamente. Sin embargo, todas las muestras registran valores dentro de la normativa correspondiente.

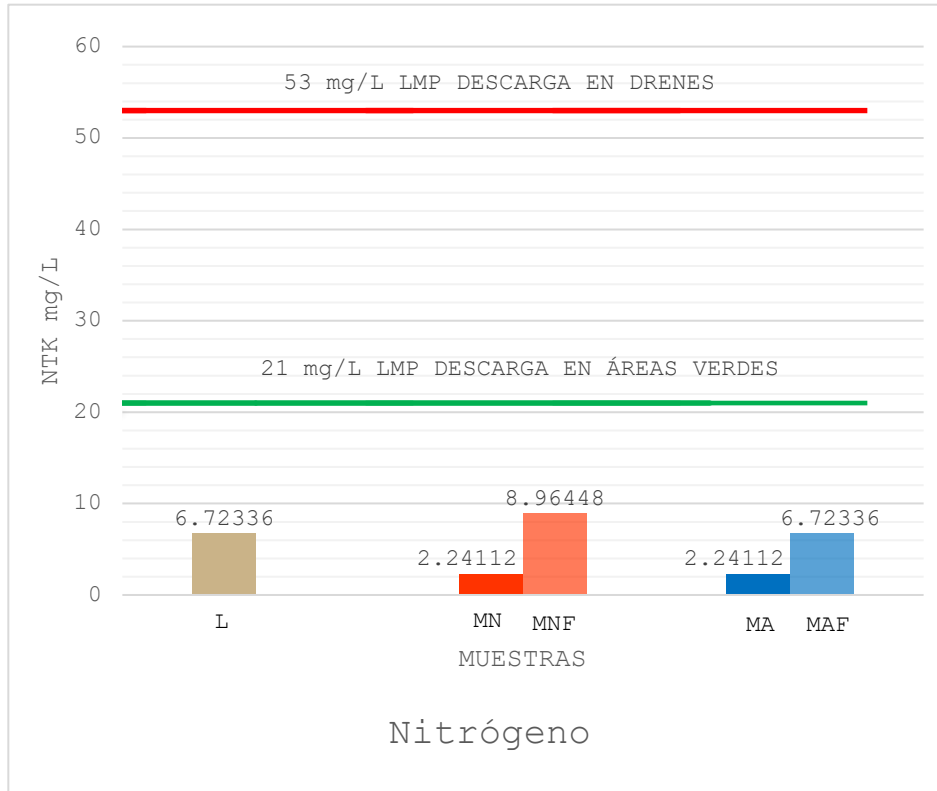


Gráfica 2. Niveles de DQO en las muestras tratadas en el modelo 2.

Nitrógeno

La Gráfica 3 muestra los valores de Nitrógeno Total para todas las muestras y se observa lo siguiente: L tiene el valor más alto entre todas las muestras, las muestras MN y MA presentan los valores más bajos por su naturaleza. Se observa un incremento en las muestras MNF y MAF en comparación con MN y MA,

respectivamente. Todas las muestras registraron valores por debajo del LMP.



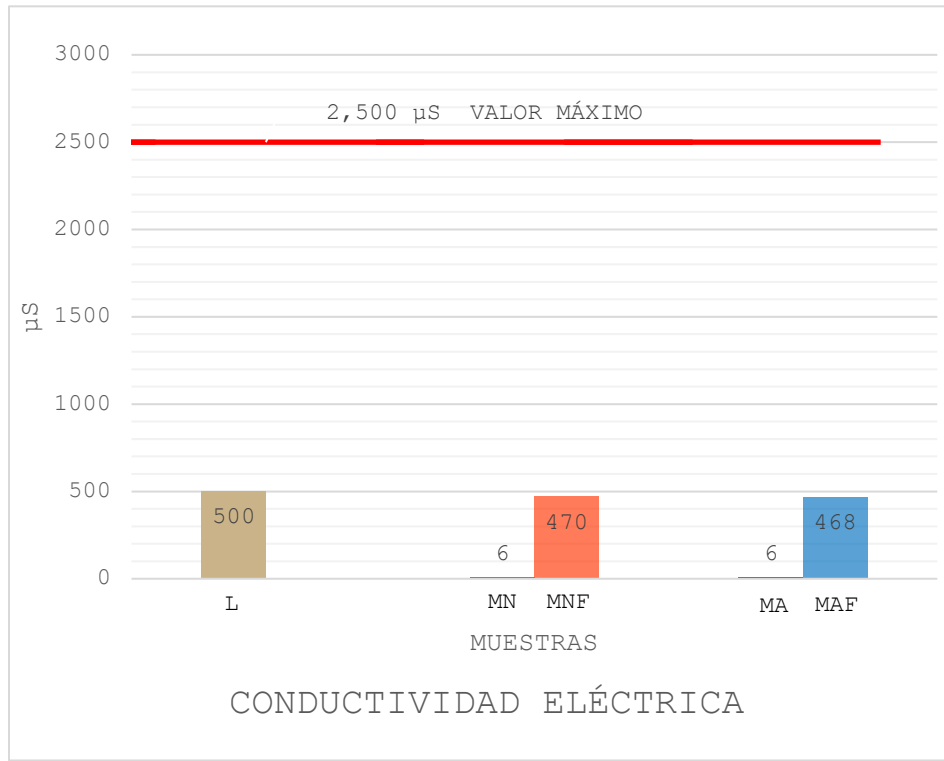
Gráfica 3. Niveles de Nitrógeno total en las muestras tratadas en el modelo 2.

Conductividad eléctrica

Para la comparación de la conductividad eléctrica no existe alguna norma mexicana que establezca los límites máximos permisibles en descargas de aguas o en riego de suelo, por lo que se consideró el Real Decreto 140/2003 de España en el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano y establece que el valor máximo es de **2,500 μ S a una temperatura de 20°C.**

La Gráfica 4 muestra los valores de este parámetro y se demuestra lo siguiente: la muestra L presenta el valor más alto entre todas las muestras tratadas en el modelo 2, MN y MA tienen

los valores más bajos, mientras que se observa un aumento en las muestras MNF y MAF en comparación con MN y MA, respectivamente.



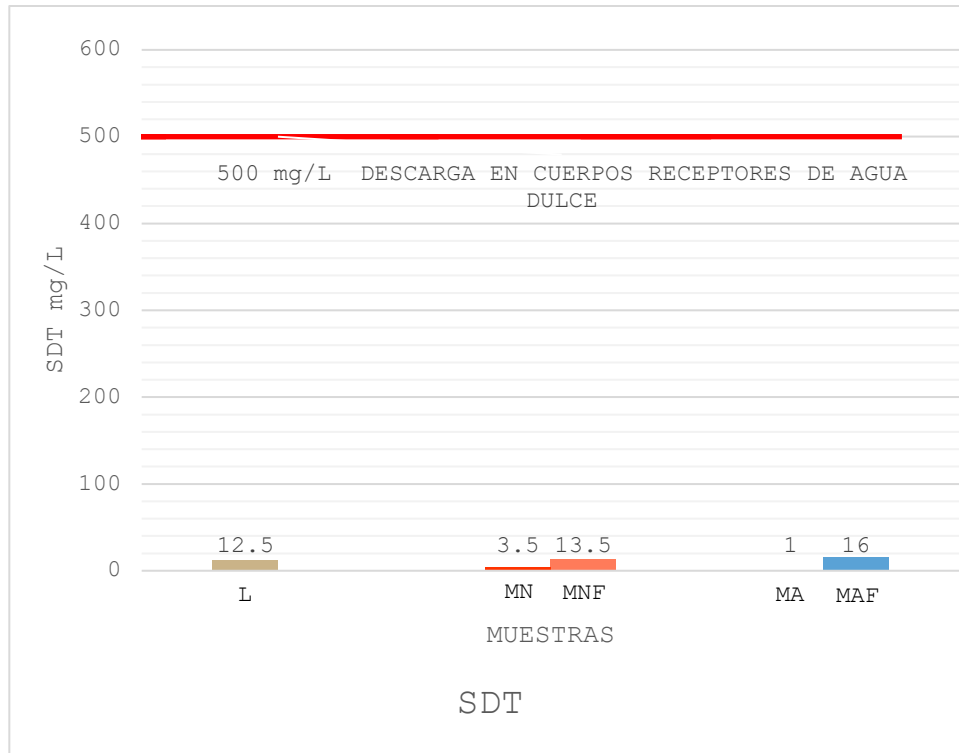
Gráfica 4. Niveles de conductividad eléctrica en las muestras tratadas en el modelo 2.

Sólidos Disueltos Totales

Se ha utilizado como referencia la NOM-143-SEMARNAT-2003. Aunque esta norma se refiere a la descarga de agua congénita, que es aquella que está relacionada con la extracción de hidrocarburo debido a que surge durante la extracción de este (SEMARNAT, 2005), se ha considerado como un punto de comparación en ausencia de una norma mexicana específica para SDT. **El LMP en cuerpos receptores de agua dulce es de 500 mg/L.**

La Gráfica 5 presenta los valores de los Sólidos Disueltos Totales para todas las muestras tratada en el modelo 2. La muestra L tiene el valor más alto entre todas las muestras analizadas, las muestras MN y MA presentan los valores más bajos, mientras

que hay un incremento en MNF y MAF en comparación con MN y MA. Hay una diferencia de valores entre MAF y MNF.



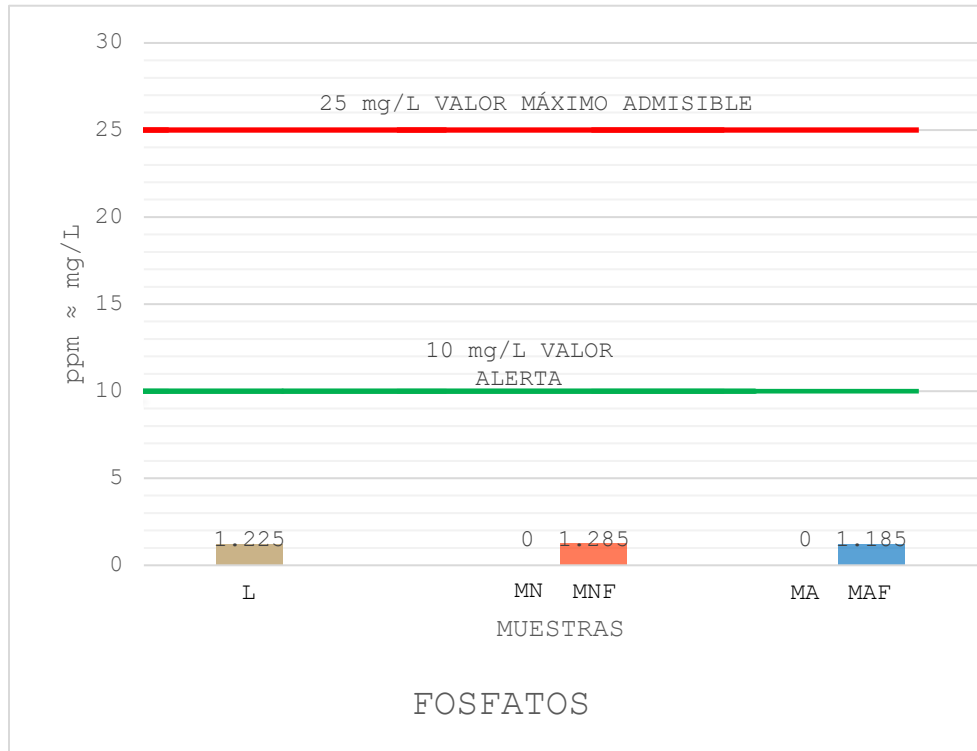
Gráfica 5. Niveles de SDT en las muestras tratadas en el modelo 2.

Fosfatos

Debido a que no hay normatividad mexicana que establezca los límites máximos permisibles en descargas de agua y riego de suelos, se utiliza como referencia para la comparación el Reglamento para la Calidad del Agua Potable de Costa Rica (Decreto N°38924-S), en el cual establece los siguientes valores (SCIJ, s. f.):

Límites máximos permisibles fosfatos	
Valor alerta	10 mg/L
Valor máximo admisible	25 mg/L

La Gráfica 6 muestra los valores para las muestras tratadas en el modelo 2 y demuestran lo siguiente: el valor más alto es el de MNF seguido de L. Las muestras MN y MA obtuvieron valores no detectables. La muestra con el valor más bajo es MAF. Ninguna muestra excede los LMP.



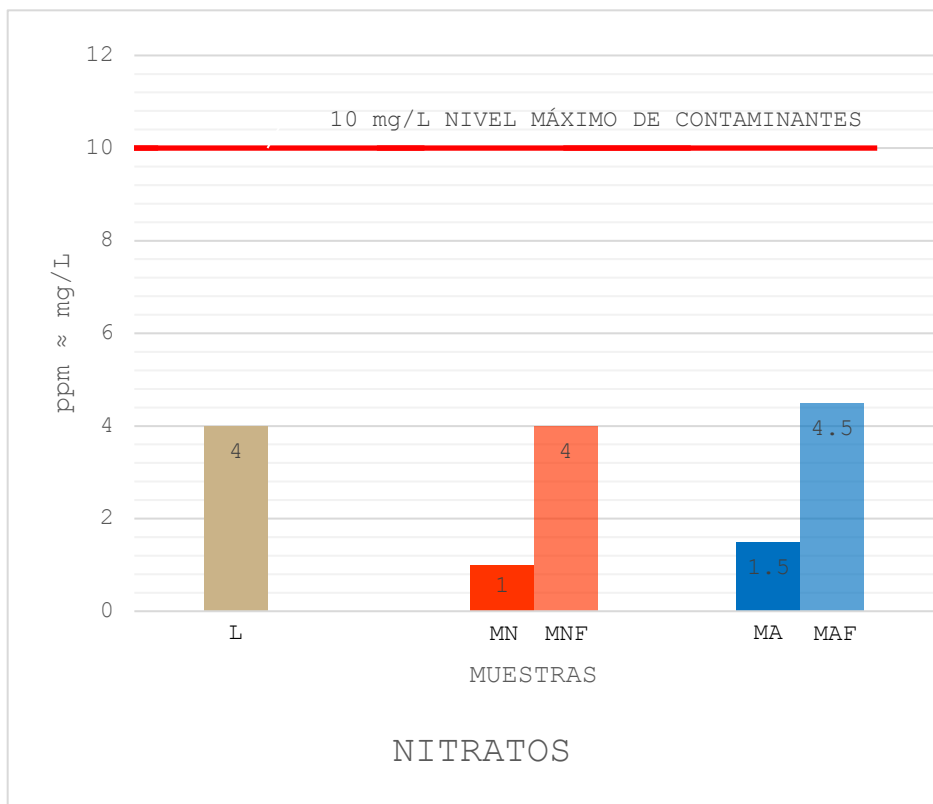
Gráfica 6. Niveles de fosfatos en las muestras tratadas en el modelo 2.

Nitratos

Debido a la ausencia de la normativa mexicana que establece los límites máximos permisibles de nitratos en la descarga de aguas o riego de suelos, se utiliza como referencia **los niveles máximos de contaminantes de la página de la EPA que son de 10 mg/L**, del documento Estándares del Reglamento Nacional Primario Potable (Environmental Protection Agency, s. f.).

En la Gráfica 7 se observan los valores de las muestras tratadas en el modelo 2 y se demuestra lo siguiente: la muestra MAF tiene el valor más alto entre todas las muestras, los valores de MN y MA son casi iguales y son los valores más bajos. Hay un

incremento de más de la mitad de las muestras MNF y MAF en comparación con MN y MA, respectivamente. Ninguna muestra excede el nivel máximo de contaminantes.



Gráfica 7. Niveles de nitratos en las muestras tratadas en el modelo 2.

Parámetros físicos

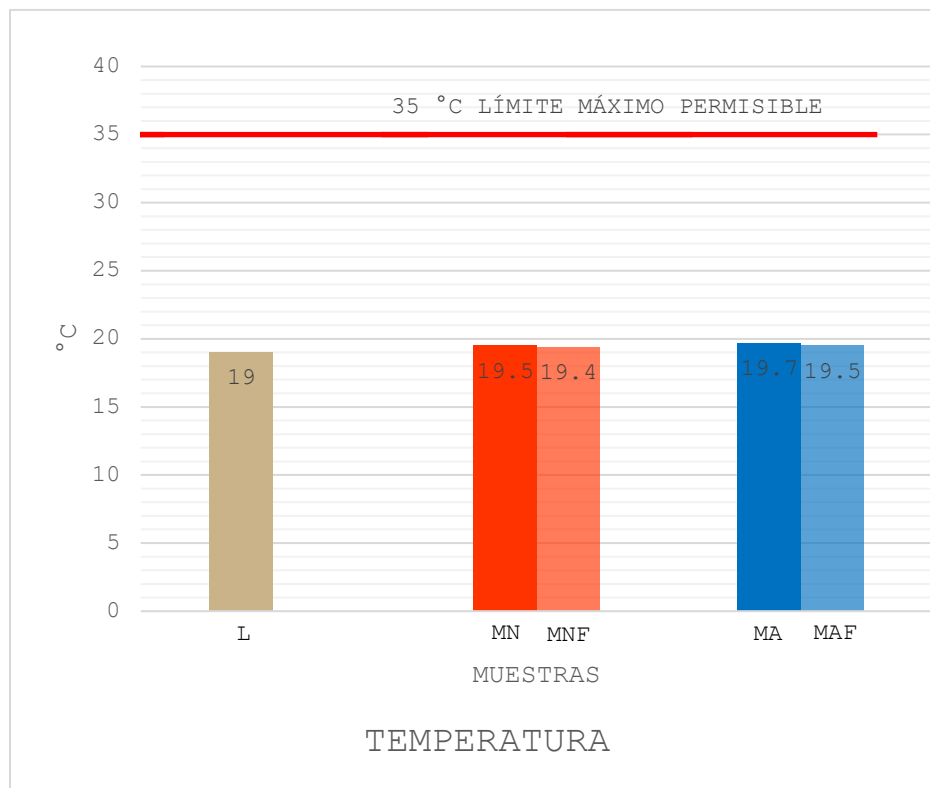
Parámetros físicos del modelo 2			
Muestra/Parámetro	T °C	SST mg/L	ST mg/L
B	-	-	-
L	19	65.5	78
MN	19.5	2.5	6
MNF	19.7	66.5	80
MA	19.4	2	4
MAF	19.5	66	82
LMP V.I. drenes	35	84	-
LMP V.I. suelo	35	42	-
Normatividad	NOM-001-SEMARNAT-2021		-

Tabla 3. Resultados físicos de las muestras filtradas en el modelo 2 y su comparación con la norma correspondiente.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los parámetros físicos de las tratadas en el modelo 2 y los LMP establecidos por la normativa correspondiente. Se puede observar que las muestras L, MNF y MAF exceden los LMP para el riego de suelo o en áreas verdes. Sin embargo, es importante señalar que dichos resultados no superan los LMP de descarga de aguas en drenes. Esto indica que las muestras no son aptas para el riego, pero su calidad es aceptable para ser vertidas en drenajes.

Temperatura

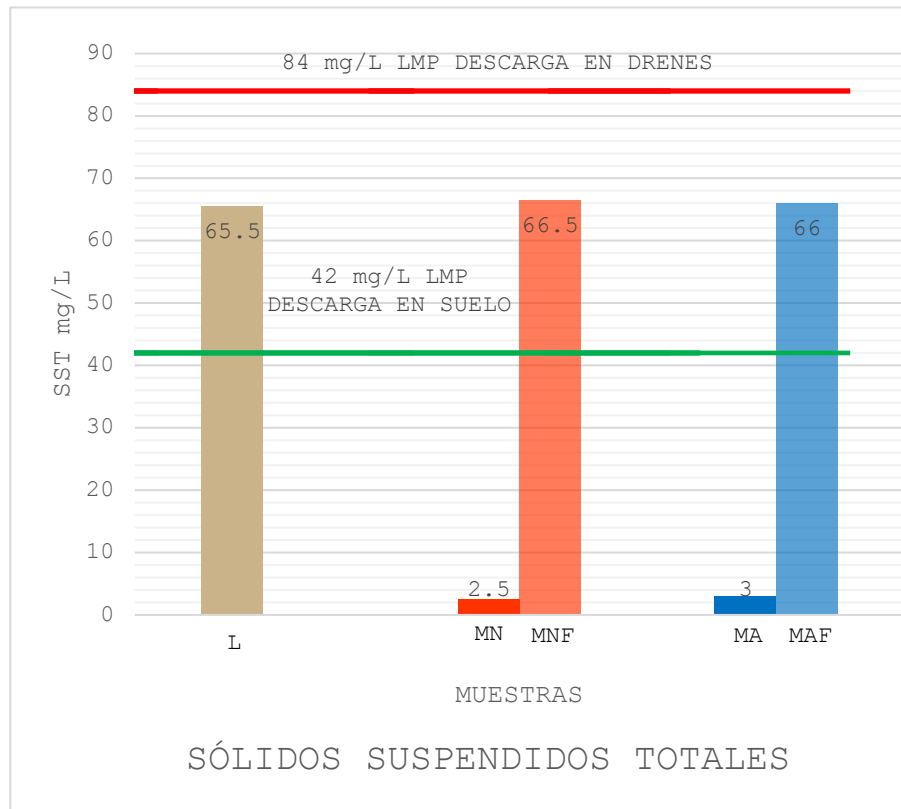
La Gráfica 8 muestra los valores para la temperatura de todas las muestras tratadas en el modelo 2. Se puede observar el valor de temperatura de todas las muestras es muy similar entre ellas y que están dentro de los LMP de la norma.



Gráfica 8. Niveles de temperatura de las muestras tratadas en el modelo 2.

Sólidos Suspendidos Totales

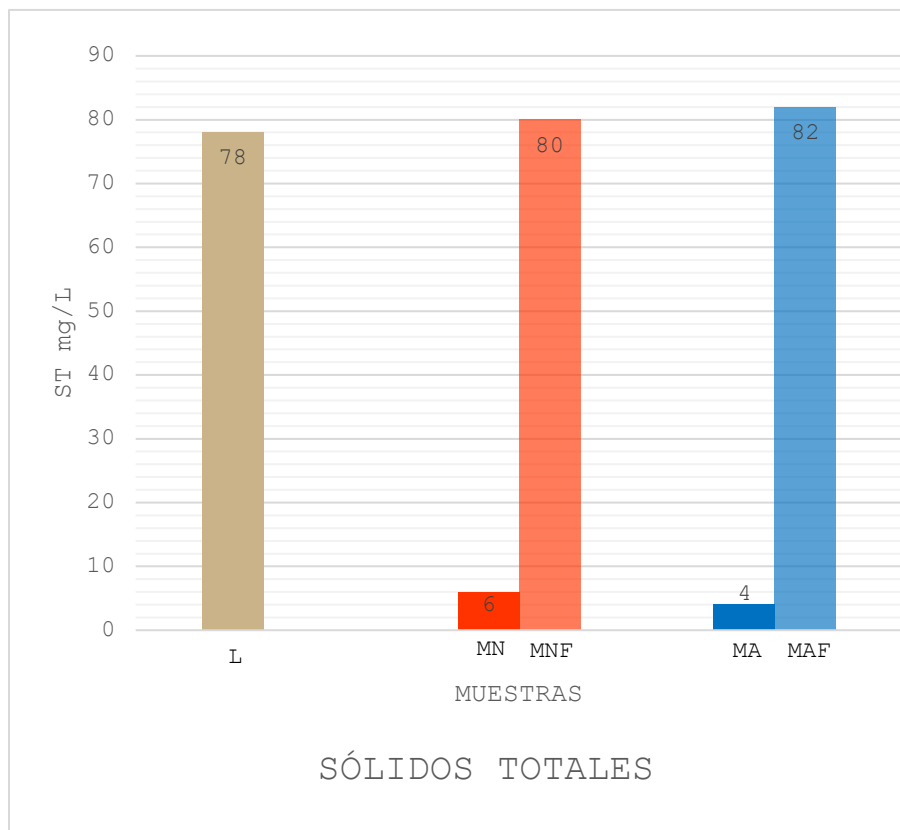
En la Gráfica 9 se presentan los valores de los Sólidos Totales Suspendidos (SST). Los datos muestran lo siguiente: las muestras L, MNF y MAF tienen valores muy similares que las hace no aptas para el riego de áreas verdes, mientras que las muestras MN y MA están por debajo de los LMP para descarga de suelo.



Gráfica 9. Niveles de SST en las muestras tratadas en el modelo 2.

Sólidos Totales

En la Gráfica 10 se muestran los niveles de Sólidos Totales (ST) para las muestras tratadas en el modelo 2. Las muestras L, MNF y MAF tienen niveles similares y las muestras MN y MA tienen valores más bajos a comparación, lo cual indica que el comportamiento es muy parecido a la de la Gráfica 9.



Gráfica 10. Niveles de ST en las muestras tratadas en el modelo 2.

5.2 Análisis y discusión de resultados

5.2.1 Comparación modelo 1 y modelo 2

La comparación del modelo 1 y del 2 se realizó únicamente con los resultados de la única muestra en común, el lixiviado, esto debido a que cada modelo trabajó con diferentes contaminantes. El modelo 1 trabajó con los residuos acuosos de fotocatalisis con TiO_2 y en el modelo 2 con anaranjado de metilo y azul de metileno. Mencionado lo anterior, es necesario limitar la comparación entre el modelo 1 y 2.

A continuación, se analizarán los siguientes aspectos: valores obtenidos en cada modelo, cumplimiento con los LMP y la eficiencia de mejora entre el modelo 1 y 2.

pH

Ambos modelos presentan pH dentro de los LMP que establece la norma NOM-001-SEMARNAT-2021. Sin embargo, la muestra del modelo 2 está más cerca del valor 7, lo que significa que está cerca de la neutralidad. Un pH cerca de la neutralidad indica condiciones más estables debido a que permite los procesos biológicos esperados en el biofiltro como la actividad de microorganismos.

Modelo	pH
1	8.22
2	7.81

Temperatura

Ambas temperaturas están dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021. La diferencia entre las cifras se debe a las diferentes condiciones de medición. La muestra del lixiviado del modelo 1 fue refrigerada y debido la temperatura ambiente de aquel día del análisis, no permitió que se templara. Las implicaciones de este parámetro se relacionan con la actividad biológica debido a que las temperaturas bajas ralentizan la actividad, mientras que las temperaturas más altas podrían acelerarlo y las reacciones químicas tienden a ser más rápidas.

Modelo	°C
1	14.7
2	19

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica está relacionada con la presencia y concentración de sales, el aumento nos puede indicar contaminación del agua. Es necesario mencionar que la medición en μS es comúnmente para soluciones con baja conductividad y la medición en mS es para aguas residuales o de mar debido a su mayor contenido de sales y otros componentes iónicos.

Modelo	Conductividad eléctrica
1	8.19 mS
2	500 µS

Los resultados sugieren que la filtración del modelo 1 (8.19 mS = 8,190 µS) presenta una alta concentración de sales, característica de aguas residuales o con un grado contaminación, mientras que el modelo 2 no rebasan los LMP. La significativa disminución de conductividad eléctrica en el modelo 2 indica que la calidad de la muestra mejoró. Esto sugiere que las mejoras del modelo 2 fueron acertadas y efectivas.

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

Donde:

CE inicial es la cifra del modelo 1;

CE final es la cifra del modelo 2

$$Eficiencia (\%) = \frac{8190 - 500}{8190} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = 93.89$$

La reducción en la conductividad demuestra la eficiencia del modelo 2 para remover sales y otros compuestos, contribuyendo a la eficacia general del modelo 2.

Demanda Química Oxígeno

La demanda de DQO es crucial para la investigación debido a que mide la cantidad de oxígeno requerido para oxidar químicamente la materia orgánica en el agua. Un alto valor indica una mayor concentración de materia orgánica y, por ende, un mayor grado de contaminación.

Modelo	DQO mg/L
1	1950.5
2	62.5

La disminución de DQO en el modelo 2 es notable y significativa, demuestra que el modelo 2 es capaz de eliminar y retener de manera eficiente la materia orgánica en la muestra.

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

Donde:

DQO inicial es la cifra del modelo 1;

DQO final es la cifra del modelo 2

$$Eficiencia (\%) = \frac{1950.5 - 62.5}{1950.5} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = 96.79$$

La eficiencia de remoción del 96.79% indica una mejora sustancial en la calidad de la muestra final. Este porcentaje sugiere que las modificaciones del modelo 2 son efectivas para la eliminación y retención de materia orgánica.

Sólidos Totales

Los Sólidos Totales son un parámetro importante que indica la cantidad total de materia sólida en el agua. La presencia de este parámetro en niveles adecuados indica un buen estado del agua, sin embargo, una concentración significativa de ST afecta la potabilidad e interfiere con la fotosíntesis y el hábitat acuática.

Modelo	ST mg/L
1	823.5
2	78

El modelo 1 presenta un valor que sobrepasa los LMP, lo que indica agua contaminada. Una descarga de agua con estos niveles tendría un impacto importante y el resultado del modelo 2 notamos indica que la mejoras fueron eficientes y significativas.

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

Donde:

ST inicial es la cifra del modelo 1

ST final es la cifra del modelo 2

$$Eficiencia (\%) = \frac{823.5 - 78}{823.5} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = 90.52$$

La eficiencia demuestra que el modelo 2 mejora la calidad de agua y reduce el riesgo de efectos negativos en el ambiente por la descarga de la muestra.

Sólidos Suspendidos Totales

Los Sólidos Suspendidos Disuelto son un indicador importante que mide las partículas no disueltas en una suspensión de agua, incluyendo sedimentos, materia orgánica y otros contaminantes. Una concentración elevada causa turbidez, obstrucción de filtros y efectos negativos en la vida acuática.

Modelo	STT mg/L
1	750
2	65.5

La muestra tratada en el modelo 1 presenta un valor alto de SST y coincide con la observación de la muestra está muy turbia, lo que significa un grado significativo de contaminación. El modelo 2 muestra una reducción importante en SST y del mismo modo,

coincide con la observación de una muestra clara como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Del lado derecho se muestra el lixiviado del modelo 1 en el estrato y en el lado izquierdo el lixiviado del modelo 2.

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

Donde:

SST inicial es la cifra del modelo 1

SST final es la cifra del modelo 2

$$Eficiencia (\%) = \frac{750 - 65.5}{750} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = 91.27$$

La eficiencia de remoción del 91.27% indica un resultado positivo, la calidad visual del agua es notable, una menor cantidad de partículas en la muestra reduce el riesgo de obstrucción en filtros y minimiza los efectos negativos en los cuerpos receptores de agua.

Sólidos Disueltos Totales

Este parámetro indica la presencia de compuestos que no pueden ser retenidos por un filtro de 0.45 micrómetros, como son las

sales, lo minerales y materia orgánica, este parámetro va de la mano con la conductividad eléctrica.

Modelo	SDT mg/L
1	73.5
2	12.5

El modelo 1 muestra un valor alto de SDT, lo que indica una concentración alta de minerales y materia orgánica en la muestra tratada. El modelo 2, a comparación presenta una reducción de SDT, lo que sugiere una disminución considerable de los compuestos disueltos en el agua.

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

Donde:

SDT inicial es la cifra del modelo 1

SDT final es la cifra del modelo 2

$$Eficiencia (\%) = \frac{73.5 - 12.5}{73.5} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = 82.99$$

La eficiencia sugiere que el modelo 2 demuestra una mejora significativa en el tratamiento de agua y que esta eficiencia fue lograda gracias a las mejoras del modelo 2. La reducción de SDT mejora la calidad de agua y se relaciona con la disminución de la conductividad eléctrica.

Nitrógeno total

Este parámetro nos refleja la cantidad total de nitrógeno presente en la muestra de agua, es un indicador importante debido a su impacto en los procesos biológicos.

Modelo	NTK mg/L
1	26.88
2	6.7233

El modelo 1 excede el V.I. de riego en suelos, lo que sugiere una contaminación por materia orgánica. Sin embargo, el modelo 2 presenta una reducción importante en la concentración de este parámetro, donde el valor está por debajo de los LMP; esto indica una mejora en la calidad del agua.

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

Donde:

NTK inicial es la cifra del modelo 1

NTK final es la cifra del modelo 2

$$Eficiencia (\%) = \frac{26.88 - 6.7233}{26.88} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = 74.98$$

La eficiencia lograda en el modelo 2, indica una mejora significativa en el tratamiento gracias a la configuración del modelo 2. La reducción de nitrógeno total es un indicador de la mejora de la calidad de agua debido a que previene la eutrofización y cumple con los LMP de la normativa.

5.2.2 Análisis comparativo de las muestras sintéticas de colorante pre y post tratamiento en el modelo 2

pH

La eficiencia de la mejora del pH para ambas muestras de colorantes superó el 100%, lo que indica que no alcanzó el objetivo de neutralización.

$$Eficacia (\%) = \frac{|pH \text{ final} - pH \text{ inicial}|}{|pH \text{ objetivo} - pH \text{ inicial}|} * 100$$

Muestras:

1. Anaranjado de metilo:

$$Eficacia (\%) = \frac{|7.3 - 5.17|}{|7 - 5.17|} * 100$$

$$Eficacia (\%) = 116.39$$

2. Azul de metileno:

$$Eficacia (\%) = \frac{|7.15 - 5.11|}{|7 - 5.11|} * 100$$

$$Eficacia (\%) = 107.93$$

El que la eficiencia superara el 100% significa que las muestras tienen un pH superior a 7 aunque no superan los LMP establecidos por la normativa correspondiente. La pequeña diferencia entre las dos muestras (anaranjado de metilo y azul de metileno) sugiere que el sistema de tratamiento es estable para neutralizar el pH.

Conductividad eléctrica

Las muestras sintéticas pretratamiento son soluciones de colorantes en agua desionizadas, por lo que presentan conductividad eléctrica mínima o nula. Se observa un aumento de este parámetro en las muestras ya filtradas, esto no indica un mal funcionamiento del biofiltro debido a que no sobrepasan los LMP. El aumento se puede atribuir a la liberación de iones como nutrientes, minerales, compuestos del filtro, actividad de la *Eisenia foetida* y el compostaje; este aumento es esperado en un biofiltro porque es un sistema activo que libera compuestos.

Demanda Química de Oxígeno

En el caso de este parámetro, las muestras sintéticas con colorante a una concentración de 1 ppm y agua desionizada, se espera que la DQO sea baja debido a la ausencia de materia orgánica, sin embargo, es inevitable la liberación de materia orgánica de un biofiltro por los procesos de compostaje y procesos de biodegradación. Las muestras postratamiento muestran un incremento que no sobrepasa los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021 lo que significa que no hay un mal funcionamiento. El aumento refleja la actividad biológica esencial en el biofiltro.

Sólidos Totales

Como en otros parámetros no se demuestra una mejora como tal debido a la naturaleza de la muestra postratamiento. Después del proceso de filtración se observó un incremento en los ST, similar a los valores del lixiviado.

Este incremento no debe interpretarse como una deficiencia, sino como una consecuencia natural del proceso. Es importante destacar que aún se mantiene dentro de los límites.

Sólidos Suspendidos Totales

Al analizar los SST se observa que las muestras postratamiento mostraron valores similares a los del lixiviado del modelo 2, este incremento refleja la consistencia de los resultados del biofiltro. El biofiltro cumple con los estándares de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Sólidos Disueltos Totales

Las muestras sintéticas pretratamiento presentaron valores muy bajos, lo cual es esperado por su composición de agua desionizada.

El aumento de este parámetro no debe interpretarse como un deterioro de la calidad del agua, sino una consecuencia natural

de la interacción de la muestra filtrada con la composta y las lombrices; se debe destacar que, a pesar del incremento de los valores, se mantienen dentro de los límites máximos permisibles de la NOM-143-SEMARNAT-2023.

Nitrógeno total

Es uno de los parámetros más importantes en los sistemas de tratamiento biológico, por su relevancia en los procesos de nitrificación y su impacto en la calidad de agua. Las muestras sintéticas pretratamiento presentaron valores bajos por su naturaleza, mientras que las muestras postratamiento demuestran un incremento esperado, el cual sugiere presencia de material orgánico, sin embargo, mantuvo un balance ya que el valor final es aceptado por la normativa correspondiente.

Fosfatos

Es notable que las muestras sintéticas pretratamiento mostraron valores nulos, y las muestras postratamiento presentaron valores similares al lixiviado. Esto demuestra una consistencia del nivel de fosfatos en el biofiltro lo que sugiere un comportamiento estable en el proceso del tratamiento. A pesar del aumento cumple con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable de Costa Rica.

Nitratos

El aumento de este parámetro es mínimo y está muy por debajo del límite establecido por la EPA para agua de consumo humano, lo cual es un gran indicio. Los valores de las muestras sintéticas postratamiento son similares a los valores del lixiviado, eso indica que el biofiltro también tiene estabilidad en este parámetro.

Evaluación de la *Eisenia foetida*

El análisis del comportamiento y la supervivencia de las lombrices es fundamental para determinar si el biofiltro es factible, debido a que son responsables del primer proceso de adsorción y absorción de los contaminantes. Además de ser el organismo principal del biofiltro, también fungen como un importante bioindicador de la toxicidad de los contaminantes o del mal funcionamiento del biofiltro.

Estas capacidades de adaptación y supervivencia no sólo validarían la eficiencia del tratamiento, sino también la confirmación de la sostenibilidad de este biofiltro.

Población inicial

La población inicial del modelo 1 fue un aproximado de 100 lombrices por estrato, es decir, 200 en total. Se considera aproximado debido a que dentro de ese conteo de población había cocones y lombrices recién nacidas escondidas en el *humus*.

En la reestructuración del biofiltro se optó por aumentar la población de cada estrato, al inicio de las pruebas del modelo 2 fueron contabilizadas aproximadamente 200 lombrices por estrato, dando como un total de 400 lombrices.



Figura 20. *Eisenia foetida* en un estrato del biofiltro después del proceso de biofiltración.

Comportamiento y adaptación

El monitoreo se realizó durante las 2 semanas después de cada lote de muestra con contaminantes, observando lo siguiente:

Indicador	Parámetro	Anaranjado de metilo	Azul de metileno
Salud física	Coloración del cuerpo (rojiza púrpura)	Sí	Sí
	Tamaño corporal adecuado	Sí	Sí
	Ausencia de lesiones o desintegración	Sí	Sí
Reproducción	Producción de cocones	Sí	Sí
	Presencia de lombrices maduras con clitelio	Sí	Sí
	Crecimiento poblacional	Sí	Sí
Comportamiento	Actividad normal	Sí	Sí
	Capacidad de adaptación	Sí	Sí
	Respuesta a estímulos	Sí	Sí
Supervivencia	Tasa de mortalidad	Aún no por ser lombrices jóvenes	Aún no por ser lombrices jóvenes
	Desarrollo hasta la madurez	Sí	Sí
	Presencia en ambos estratos	Sí	Sí

Tabla 3. Evaluación de la *Eisenia foetida* después del tratamiento de las muestras sintéticas



Figura 21. Lombriz madura con Clitelio sana después del tratamiento de contaminantes.

Es importante resaltar que, aunque el colorante azul de metileno se impregnó ligeramente en la caja plástica y en las semillas de la comida de la *Eisenia foetida*, las lombrices no presentaron cambios en su coloración normal. Esto sugiere que el sistema fue capaz de absorber el colorante de manera efectiva. Además, se observó un fenómeno interesante después de la filtración: las semillas presentes en la comida de las lombrices germinaron como se observa en la Figura 22. Es particularmente importante e interesante debido a que nos indica que el humus mantiene sus características nutritivas y no contiene contaminantes tóxicos que inhiban el crecimiento de plantas. Demuestra que aparte de ser un sistema con la capacidad de tratar contaminantes, también tiene la capacidad de soportar el crecimiento de plantas.

Estas observaciones refuerzan la eficacia del modelo 2 y del biofiltro. Es capaz de tratar contaminantes y tiene potencial para mantener un ambiente apto para el crecimiento de plantas y de lombrices.



Figura 22. Semillas germinadas de melón después de la biofiltración del anaranjado de metilo.

Capítulo VI

6. Conclusiones

La implementación y evaluación del biofiltro con *Eisenia foetida* para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio, específicamente muestras sintéticas de anaranjado de metilo y azul de metileno, ha demostrado ser una alternativa innovadora, eficiente, de bajo impacto ambiental y económica.

- a) El modelo 2 demostró mejoras significativas a comparación con el modelo 1, logrando eficiencias superiores al 90% en parámetros como la DQO, SST, ST, SDT, nitrógeno total y conductividad eléctrica. Esta mejora evidente se debe a la optimización del modelo 2, es decir, a la solución de los problemas que presentó el modelo 1, como la composición, el orden y cantidades de los materiales filtrantes y la distribución del flujo del contaminante. El modelo 2 permitió tratar de manera eficiente 2200 mL por muestra de residuos con un flujo controlado de 200 mL/h, esto no sólo previno la saturación del biofiltro, sino que demostró la capacidad del biofiltro para tratar volúmenes más grandes de manera sostenible.
- b) La población de la *Eisenia foetida*, siendo el bioindicador, sobrevivió y creció exponencialmente, mostrando patrones normales de alimentación, crecimiento y reproducción durante y después del tratamiento de las muestras sintéticas. Esta adaptación se evidenció al tener contacto con contaminantes acuosos que son peligrosos para los microorganismos como el anaranjado de metilo y azul de metileno. Además, las semillas que tuvieron una exposición ante los contaminantes antes y después del proceso germinaron exitosamente, esto sugiere que la calidad del humus es óptima para ser reutilizado.

c) La remoción de ambos contaminantes es notoria a simple vista como lo muestra la Figura 23. Esta capacidad de procesar eficientemente los compuestos complejos en los contaminantes acuosos resalta la versatilidad e importancia del biofiltro.

Aunque la información respecto a la escalabilidad es limitada, los resultados sugieren un potencial prometedor a los tratamientos alternativos de residuos acuosos de laboratorio a grande escala.

d) Esta tesis estableció una base sólida para futuras investigaciones en el campo de la biorremediación de residuos acuosos de laboratorio.

e) Los resultados de los parámetros y las pequeñas diferencias entre estos demostraron la estabilización de parámetros críticos, que dan un margen de seguridad, es decir, si se vuelven a filtrar muestras, los parámetros no aumentarían sobrepasando los LMP. Lo anterior combinado con su bajo impacto ambiental y generación del subproducto beneficioso, se posiciona como una tecnología prometedora. En conclusión, este biofiltro sí representa una solución innovadora, sostenible y económicamente viable para el tratamiento de residuos acuosos de laboratorio.

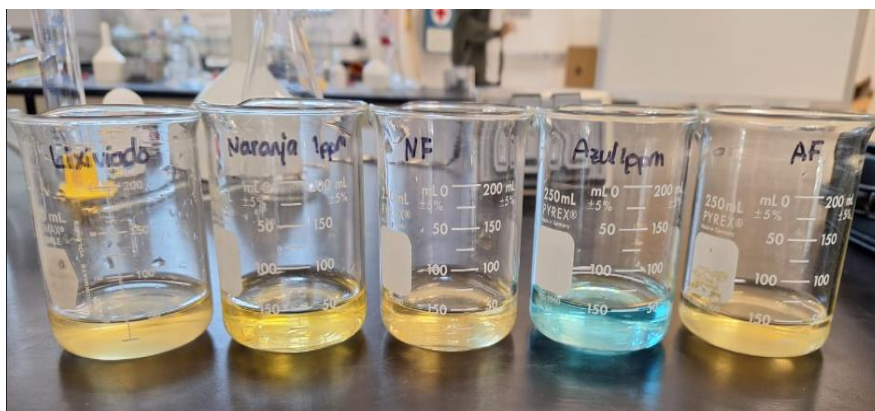


Figura 23. Comparación, de izquierda a derecha, del lixiviado, colorante anaranjado de metilo a 1 ppm, colorante anaranjado de metilo filtrado, colorante azul de metileno a 1 ppm, colorante azul de metileno filtrado.

7. Referencias

- A. V. F. Ingeniería Ambiental. (2003). *Programa de Descontaminación de Aguas, Biofiltro*. Universidad de Chile. Chile: Fundación para la Transferencia Tecnológica.
- Apatsidou M., K. I. (2018). Predicting azo dye toxicity. *Spandidos publications*, 160-165. doi:10.3892/br.2018.1037
- Arana, P. (2010). Biofiltro edificio de tamices de la E. D. A. R. de Arazuri: Estudio. *Universidad Pública de Navarra*(1), 1-139.
- Arango, A. R. (2004). *La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua*. Artículo científico. doi:1794-4449
- Arquitectura Sostenible. (2022). *5 usos del serrín en la construcción sostenible*. Obtenido de <https://arquitectura-sostenible.es/5-usos-serrin-construccion-sostenible/>
- Banquero Guayacán, J. O. (2014). *Oxidación con peróxido de hidrógeno como pulimiento del efluente de la PTAR Pinares Castilla la Nueva Meta*. Tesis, Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/0222990b-227e-4d84-ae53-9c8b8d3d308e/content>
- Barrera Ochoa, A. (2016). *El aserrín como material expresivo en el diseño interior*. Tesis de licenciatura, Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/5922/1/12241.pdf>
- Bastida, A. (1999). El medio cultivo de las plantas. Sustratos para hidroponía y producción de plantas ornamentales. *AGRIBOT*(4), 72.
- Bernal, L. A., Hernández, M. K., Berber, M. S., Martínez, M. E., & Delgado. (2017). Remoción del colorante compuesto naranja remazolde aguas residuales generadas en la

- industria textil. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 8(3), 51 - 57. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323652916006>
- Bouché, M. (1972). Lombriciens de France, ecologie et systématique. *Recherche Agronomique, Annales de Zoologie-Ecologie Animale*, 72(2), 671. doi:10.1016/0006-3207(73)90037-2
- Britannica. (s. f.). *Science & Tech*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/zeolite>
- Bulgariu, L. E. (2019). The utilization of leaf-based adsorbents for dyes removal: A review. *Journal of Molecular Liquids*(276), 728-747.
- Cementos Torices. (2022). *¿Qué es es la grava y la arena?* Obtenido de <https://cementostorices.com/blog/construccion/grava-y-arena-descubre-sus-diferencias-y-para-que-se-utilizan/>
- Cementos Torices. (2022). *¿Qué es la grava de construcción y cómo se utiliza?* Obtenido de <https://cementostorices.com/blog/construccion/grava-en-construccion-aprende-a-utilizarla-con-cemento-y-arena/>
- cemix. (s. f.). *¿Qué es y para qué sirve la arena de construcción?* Obtenido de <https://www.cemix.com/arena-para-construccion-que-es/>
- CHIWATEC. (s. f.). *Definición y propiedades físicas de carbón activado*. Obtenido de <https://cnchiwatec.com/es/definition-and-physical-properties-of-activated-carbon.html>
- CIECO UNAM . (s. f.). *ECOTEC*. Obtenido de <https://ecotec.unam.mx/ecoteca/biofiltro>
- Condorchem Enviro Solutions . (s. f.). *La electrocoagulación, un tratamiento económico y eficaz para las aguas residuales*. Obtenido de <https://condorchem.com/es/blog/electrocoagulacion-aguas-residuales/>

- Condorchem Enviro Solutions. (s. f.). Obtenido de <https://condorchem.com/es/biofiltros/>
- Condorchem Envitech. (s. f.). *Tratamiento de aguas residuales y emisiones.* Obtenido de <https://condorchem.com/es/biofiltros/>
- CONICYT. (s. f.). *Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica.* Obtenido de <http://www.conicyt.cl/dossier/cd/docs>
- Coronel Pazmiño, N. P. (2015). *Diseño e implementación a escala de un biofiltro Tohá es la epoch para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad Langos La Nube.* Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/234574519.pdf>
- Coulson, J. M. (2003). *Ingeniería Química* (Vol. 2). Editorial Reverté.
- Cristales, O. (1997). Sistema de crianza de lombriz de tierra, alternativas de su uso para el manejo de los desechos sólidos. El Salvador.
- Cristales, O. (2000). *Módulo de capacitación de la lombricultura.* Fundación ABA.
- DOF. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.
- Domínguez, M. A. (2010). Las lombrices de tierra y los microorganismos: desentrañando la caja negra del vermicompostaje. *Acta Zoológica Mexicana*(2), págs. 385-395. doi:0065-1737
- ECHO community. (2001). *Filtro de agua bioarena.* Obtenido de <https://www.echocommunity.org/es/resources/917a9497-5cb6-4465-a656-d12c86f35d4d>
- ECOTEC. (s. f.). *Unidad de Ecotecnologías UNAM.* Obtenido de <https://ecotec.unam.mx/ecoteca/biofiltro>

- Edwards, C. A. (1996). *Biología y Ecología de lombriz*. Chapman and Hall.
- Enciclopedia Humanidades. (s. f.). *Algodón*. Obtenido de <https://humanidades.com/algodon/>
- Environmental Protection Agency. (s. f.). *Agua potable*. Obtenido de <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/estandares.html>
- Equipos y laboratorio. (s. f.). *Carbón activado*. Obtenido de <https://www.equiposylaboratorio.com/portal/articulo-ampliado/carbon-activado>
- Ferruzzi, C. (1986). *Manual de lombricultura*. Ediciones mundiprensa.
- Fleming, Z. (2014). SISTEMA TOHÁ: Un éxito de innovación eficiente y ecológica atrae al mundo. *Beauchef MAGAZINE*(07), págs. 96-100. Obtenido de <https://ingenieria.uchile.cl/dam/jcr:59d0cf81-50fd-4a87-9bd7-dc8fcd6ca85a/revistabm>
- Flores Morales C. R., H. H. (2022). *Reoción del azl de metileno de agua residual industrial textil mediante oxidación a nivel de laboratorio*. Tesis , Universidad Continental. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11353/1/IV_FIN_107_TE_Flores_Huari_Perez_2021.pdf
- Forero, D. F. (2018). Biofiltration of acetic acid vapours using filtering bed compost from poultry manure - pruning residues - rice husks. *Chemical Engineering Transactions*(64), 511-516. doi:<https://doi.org/10.3303/CET1864086>
- Fossen, H. (2020). *Store Norse Leksikon*. Obtenido de <https://snl.no/antrasitt>
- Garces Giraldo L., P. M. (2007). Tratamiento de aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar. *Revista Lasallista de Investigación*, 4(2), 24-31.

- Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&id=S1794-44492007000200004&lng=en&tlng=es.
- García, M. D., Oruña, L., Domínguez, H., & Martínez, V. (2005). Evaluación de la calidad proteica de harina de lombriz (*Eisenia foetida*) en ratas en crecimiento. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 39(3), 333-338. doi:0034-7485
- Garzón-Zúñiga, M. A.-C. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(3), 153-161. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&id=S2007-24222012000300011&lng=es&nrm=iso
- Gastón, J., Martínez, M., & Cerdón, E. (s. f.). Evaluación de la eficacia de cuatro dietas alimenticias sobre el crecimiento, desarrollo y producción de abono de la lombriz californiana (*Eisenia foetida*). Obtenido de <https://camjol.info/index.php/RCI/article/download/573/7320?inline=1>
- Gates, G. E. (1950). Regeneración en la lombriz de tierra, *Eisenia foetida*, Savigny. doi:10.2307/1538597.
- Geocontacto. (2023). *GEOCONTACTO SOLUCIONES AMBIENTALES GEOLÓGICAS Y MINERAS*. Obtenido de <https://geocontacto.com/2023/03/06/antracita/#page-content>
- Grace Enriching Lives, Everywhere. (s. f.). Obtenido de <https://web.archive.org/web/20090215184310/http://www.grace.com/EngineeredMaterials/MaterialSciences/Zeolites/ZeoliteStructure.aspx>
- Greentology. (s. f.). *Greentology The green side of business*. Obtenido de <https://greentology.life/2023/10/16/conoce-4-tipos-de-biodegradacion-en-las-bolsas-de-plastico/>

- Guanche García, A. (2015). Las lombrices y la agricultura. Obtenido de https://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/agec_562_lombrices%20y%20la%20agricultura2.pdf
- Guzmán, M. G. (2004). *Estudio de factibilidad de la aplicación del Sistema Tohá en la planta de tratamiento de aguas hervidas de Valdivia*. Tesis de licenciatura, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- HOMEGOLDEN. (s. f.). *Arena gruesa*. Obtenido de <https://homegolden.com/producto/arena-gruesa/>
- Huerta E., F. C. (2005). Enhancement of growth and reproduction of the tropical earthworm *Polypheretima elongata* (Megascolecidae) by addition of *Zea mays* and *Mucana pruriens* var. *European Journal of Soil Biology*, 41, 45-53. doi:1164-5563
- Huerta, L. (2018). *Gaceta UNAM*. Obtenido de <https://www.gaceta.unam.mx/efectos-negativos-del-dioxido-de-titanio-en-la-salud-humana/>
- INCAP. (s. f.). *Lombricultura*. Obtenido de <https://www.incap.int/index.php/es/lombricultura>
- Iturralde, X. (2022). Biofiltración de aguas residuales de industrias arroceras de San Jacinto de Yaguachi, Ecuador mediante cascarilla de arroz. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 5. doi:<https://doi.org/10.46380/rias.v5.e271>
- Jiménez, E. &. (2005). Diseño de un sistema de biofiltración para la remoción de estireno. *Revista EIA(3)*, 9-20. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&id=S1794-12372005000100002&lng=en&tlng=es.
- Jing Tao, Q. H. (Julio de 2019). Transcriptomic responses of regenerating earthworms (*Eisenia foetida*) to retinoic acid reveals the role of pluripotency genes. *Chemosphere*, 226, 47-59. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.111>

- Kelley, C. B.-S. (2000). Incorporation of phytoremediation strategies into the introductory chemistry laboratory. *Semantic scholar*. doi:10.1007/S00897000383A
- kompost. (s. f.). *kompost*. Obtenido de <https://www.kompost.com.ar/mini-guia-de-compostaje-con-lombrices/>
- La casa del constructor. (s. f.). *Tipos de grava para la construcción*. Obtenido de <https://lacasadelconstructor.mx/tipos-de-grava-para-la-construccion/>
- LENNTECH. (s. f.). *LENNTECH*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ti.htm>
- Liebmann, E. (1942). The coelomocytes of Lumbricidae. *Journal of Morphology*(2), 221-245.
- López, H. G. (s. f.). *Crema corporal regeneradora de tejidos a base de lombriz roja californiana (Eisenia foetida)*. Proyecto, Centro Educativo Cruz Azul, A.C. Bachillerato Cruz Azul Campus Lagunas. Obtenido de <https://vinculacion.dgire.unam.mx/vinculacion-1/Memoria-Congreso-2017/trabajos-ciencias-biologicas/ciencias-de-la-salud/19.pdf>
- Maldonado, Y. (2021). *Geologiaweb*. Obtenido de <https://geologiaweb.com/rocas/carbon-mineral/>
- Manahan, S. E. (s. f.). *LibreTexts*. Obtenido de [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Ambiental/La_qu%C3%ADmica_verde_y_los_diez_mandamientos_de_la_sustentabilidad_\(Manahan\)/12%3A_La_biosfera_y_el_papel_de_la_qu%C3%ADmica_verde_en_la_alimentaci%C3%B3n_de_un_mundo_hambriento/12.10%3A_Biode](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Ambiental/La_qu%C3%ADmica_verde_y_los_diez_mandamientos_de_la_sustentabilidad_(Manahan)/12%3A_La_biosfera_y_el_papel_de_la_qu%C3%ADmica_verde_en_la_alimentaci%C3%B3n_de_un_mundo_hambriento/12.10%3A_Biode)
- Mármoles Puente. (2020). *La piedra bola de río*. Obtenido de <https://marmoles.mx/blog/la-piedra-bola-de-rio.html>
- Marnetti, J. (2012). *Implementación de la producción de lombricultura*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cuyo , Facultad de Ciencias Económicas,

- Argentina. Obtenido de https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/5236/marn_ettiproseso-productivo-de-abonos-organicos-lombricultura.pdf
- Martínez, C. (2012). *Calidad de agua*.
- Mechan, Y. G. (2018). *Aplicación del Sistema Tohá para el tratamiento de riles generados en la planta agromar industrial S.A. Sullana 2012*. Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán. Obtenido de <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/5770/Tiquillahuanca%20Mechan%20%26%20Arias%20Fernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morales A. J., J. A. (2016). Remoción de los colorantes textiles en agua mediante columnas empacadas con asbosrbentesmhíbridos. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 359 - 363. Obtenido de jovenesenlaciencia.ugto
- Morganico . (2014). *Morganico*. Obtenido de <https://morganico.tumblr.com/post/101706177049/que-es-el-aceite-de-lombriz-roja-californiana>
- Naciones Unidas. (s.f.). *OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- National Institute for Occupational Safety and Health (US). (2016). *US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention*. Obtenido de <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-160/pdfs/2011-160.pdf>
- Nayak, A. K. (2017). Green and efficient biosorptive removal of methylene blue by *Abelmoschus esculentus* seed: process optimization and multi-variate modeling. *Journal of Environmental Management*, 200, 145-159.
- Nelly B. Morales P., J. Z. (2020). Implementación de un proceso biotecnológico: lombricultura, como tratamiento de

- residuos sólidos orgánicos. (E. Neogranadina, Ed.) *Academia y Virtualidad*, 137-147. doi:<https://doi.org/10.18359/issn.2011-0731>
- Nengwen Xiao, F. G. (2011). The regeneration capacity of an earthworm, *Eisenia fetida*, in relation to the site of amputation along the body. *Acta Ecologica Sinica*, 31(4), 197-204. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2011.04.004>.
- Nevárez Martínez M. C., E. M. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO₂. *Avances de química*, 12(2 - 3), 45 - 59. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/933/93357608005/html/>
- Odour Observatory. (s. f.). Obtenido de <https://odourobbservatory.org/es/biofiltration-2/>
- Pacheco, M. P. (2017). valuación de la eficiencia de remoción de ácido acético y pentano en un sistema de biofiltración con compost de pollinaza , residuos de poda y cascarilla de arroz.
- PAOT. (s. f.). Tratamiento de aguas residuales. Obtenido de https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.7_Servicios/data_servicios/tratamientos.htm
- Pérez, F. J. (2011). *Abastecimiento de aguas*. Trabajo académico, Universidad Politécnica de Cartagena. Obtenido de https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6023/mod_resource/content/1/Tema_08_FILTRACION.pdf
- PGCCRD/MARENA. (S. f.).
- Portillo, F. S. (2013). *Mecanismos de degradación de polímeros oxodegradables*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de General San Martín Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Revah, S. M.-S. (2005).

- Rey C., H. V. (2018). *Implementación de biofiltro como agente depurador de aguas residuales del conjunto Aranjuez II, en el municipio de Villavicencio Meta*. Tesis de licenciatura, Universidad Cooperativa de Colombia. Obtenido de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/5cd7c91c-034a-4bea-9a7a-b67b806a508f/content>
- Reyes Mejía, J. (2013). *Reacción asistida por microondas para la obtención de hidrocarburos aromáticos a partir de aserrín de madera*. Tesis para la obtención del título de Químico. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/822ccb44-be3f-45f5-8241-047321903981>
- Rivas, W. A., & Bravo, G. L. (2015). *Potabilización del agua*. Universidad Piloto de Colombia.
- RIVEMAT. (s. f.). *Arena gruesa construcción*. Obtenido de <https://www.rivemat.cl/product/arena-gruesa-construccion>
- Rojas, I. P. (Diciembre de 2013). Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Gestión y Ambiente*, 16(3), 39-51. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169429726004.pdf>
- Romero, A. (s. f.). *ESGRAF*. Obtenido de <https://esgraf.com.mx/blog/antracita-todo-lo-que-debes-saber/>
- Ruíz Arango, A. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *SciELO*. doi:1794-4449
- Sagastume, J. M. (2000). *Gaceta eletrónica*.
- Salazar, P. (2005). *Sistema Tohá: Una Alternativa para Tratamiento de Aguas Residuales en Sectores Rurales*. Tesis, Universidad Austral de Chile, Constructor Civil, Chile.

- Salvador, L. (2014). *Modelo matemático para la descripción de la evolución de la población de la lombriz roja (Eisenia foetida) en condiciones de producción de compost*. Tesis. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/43651/Memoria.pdf>
- Santos, M. (1997). *Lombricomposta*. El Salvador.
- SCIJ. (s. f.). *Sistema Costarricense de Información Jurídica*. Obtenido de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC
- SEMARNAT. (2005). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/DO561.pdf>
- SEMARNAT. (2008). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Obtenido de <http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/residuos/bibliovirtual/PNPGIR.pdf>
- SEMARNAT. (2020). *La gestión para el manejo de residuos peligrosos*. Compendio, SEMARNAT. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2020/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletb424.html
- SEMARNAT. (s.f.). *Guía para la elaboración de la Cédula de Operación Anual de Tratamiento de Residuos Peligrosos*. Obtenido de [g_trat.pdf \(semarnat.gob.mx\)](#)
- Sercu, B. N. (2005). Inoculation and start-up of a biotricking filter . *Chemical Engineering Journal*, 113(2-3), 127-134.
- Serebrinsky, M. (2004). Comportamiento reproductivo de la *Eisenia foetida* según estación del año y tipo de alimentación. Colombia.
- Serret Guasch, N. G. (2016). Caracterización de aserrín de diferentes maderas. *Tecnología Química*, 36(3), 395-405. Obtenido de

- http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&tlng=es.
- Soriano, L. G. (2020). *Compostaje y vermicompostaje de residuos agrícolas. Su papel en la eliminación de fármacos en el sistema suelo-planta y sobre el desarrollo vegetal*. Tesis doctoral, Universitat de Valencia. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/344698113.pdf>
- STI. (s. f.). *Dióxido de Titanio*. Obtenido de <https://www.stigroup.mx/quimicos/dioxido-de-titanio-tio2/>
- Sung-Jin Cho, K. S. (2009). Differential expression of three labial genes during earthworm head regeneration. doi:73, 2609e261
- Tchobanoglous, R. C. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. (E. A. H., Ed.) McGrawHill.
- Thalasso, F., & Pineda Olmedo, R. (2002). *Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228594656_Biofiltracion_tratamiento_biologico_de_aire_contaminado
- Tineo, B. (1994). *Crianza y manejo de la lombriz con fines agrícolas*. Turrialba.
- Trejo, L. I. (2013). Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4, 863 - 876. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342013000900001&lng=es&nrm=iso
- Uddin, M. K. (2020). Decolorization of basic dyes solution by utilizing fruit seed powder. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(2), 345-355.
- Varnero, M. C. (2012). Tecnologías disponibles para la purificación de biogás usado en la generación eléctrica. *Información Tecnológica*, 23(2), 31-40. doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>

- Velázquez, J. C. (2015). *Propuesta de un sistema de biofiltración de cromo hexavalente en agua, utilizando olote de maíz*. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Del Estado de México. Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/oca/view/20.500.11799/23558/1/UAEM-FAPUR-TESIS-CORTES>
- WISE. (s. f.). *Características de la grava y otras particulares que debes conocer de*. Obtenido de <https://blog.wise.com.mx/caracteristicas-de-la-grava-y-otras-particulares-de-este-agregado>
- Water and sanitation program. (2006). Obtenido de <https://documents1.worldbank.org/curated/es/943351468247792589/pdf/360810WSP0rev0biofiltro01PUBLIC1.pdf>
- Yagub M. T., S. T. (2014). Tinte y su eliminación de la solución acuosa por adsorción: una revisión. *Adv Colloid Interface Sci*, 172 - 184. doi:10.1016/j.cis.2014.04.002.
- Zaborski, E. M. (2022). Preparación y uso de compost para la agricultura orgánica . *eOrganic*. Obtenido de <https://eorganic.org/node/35223>
- zuez. (2022). *zuez en España*. Obtenido de <https://www.suez.com/es/aire-espana/noticias/biofiltro-avanzado-mejor-tecnologia-eliminacion-olores>
- Zuñiga, M. A., Buelna, G., & Chávez, G. E. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(3), 153-161. doi:2007-2422