

Estudio de la remoción de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de un filtro biológico a partir de lombrices californianas (*Eisenia Foétida*)

Nixon José Quiroz Fuentes, ✉ nxn.josqf@gmail.com

Monografía presentada para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor: Jacipt Alexander Ramón Valencia, Doctor (PhD) en Química



Universidad de Pamplona Colombia
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Ingeniería Ambiental
Pamplona Norte de Santander, Colombia
2019

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos.....	14
Capítulo I.....	15
1 Marco teórico	15
1.2 Recurso Agua	15
1.3 Agua residual.....	16
1.3.1 Propiedades del agua residual.....	17
1.3.2 (ST) Solidos totales.....	19
1.3.3 (OD) oxígeno disuelto.....	20
1.3.4 (DBO) demanda bioquímica de oxígeno	20
1.3.5 (DQO) demanda química de oxígeno	20
1.3.6 Coliformes totales	21
1.3.7 Coliformes fecales	21
1.3.8 Diferentes tipos de aguas residuales	22
1.3.8.1 Agua residual urbana.....	22
1.3.8.2 Aguas Residuales Domésticas (ARD):	22
1.3.8.3 Aguas Residuales no Domésticas (ARnD):	23
1.3.9 Tratamiento del agua residual urbana.....	23
1.3.9.1 Plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR):.....	23
1.3.9.1.1 Tratamiento preliminar.....	23

1.3.9.1.2 Tratamiento primario.....	24
1.3.9.1.3 Tratamiento secundario	26
1.3.9.1.4 Tratamiento terciario.....	27
1.3.10 Problemas en la salud.....	29
1.4 Norma legal para el vertimiento de las aguas residuales urbanas	31
Capítulo II	34
2 Lombriz californiana (Eisenia Foétida).....	34
2.1 Lombricultura.....	34
2.2 Clasificación Sistemática de la lombriz californiana	35
2.3 Características de la lombriz californiana	35
2.3.1 Principales cualidades.....	37
2.4 Parámetros ambientales para su producción y desarrollo	38
2.4.1 Aireación.....	38
2.4.2 Temperatura	38
2.4.3 Humedad.....	39
2.4.4 pH.....	39
2.4.5 Riego.....	39
2.4.6 Parámetros del alimento (lombriz Eisenia Fetida).....	40
2.4.7 Condiciones del sustrato (habitat).....	40
2.5 Depredadores de la Lombriz en su habitat.	41
2.6 Función de la lombriz californiana.....	41
2.6.1 La lombriz como aereadores	42
2.6.2 Lombriz como biodigestores.....	43
2.7 Humus	44
2.8 Humus de la lombriz californiana	44

2.8.1 Principales ventajas del humus:	44
Capitulo III	46
3. Filtro biológico (E. Fetida) para tratamiento de aguas residuales urbanas	46
3.1 Sistema Tohá	46
3.1.1 Historia.....	46
3.1.2 Características	47
3.1.3 Métodos de remoción.....	48
3.1.3.1 Físico	48
3.1.3.2 Químico.....	49
3.1.3.3 Biológico (Microbiológico).....	50
3.1.4 Descripción de materiales	51
3.1.5 Diseño de un filtro biológico (E. fetida)	53
3.1.6 Funcionamiento.....	54
3.1.7 Mantenimiento del filtro biológico	54
3.1.8 Eficiencia del sistema	55
3.1.9 Eficiencia de los organismos patógenos	55
3.1.10 Ejecución para diferentes poblaciones.....	56
3.1.11 Ventajas.....	57
3.1.12 Desventajas	57
Capitulo IV	59
4 Resultados de estudio	59
4.1 Antecedentes	59
Discusión.....	64
Conclusiones	65
Recomendaciones.....	66

Referencias68

Lista de tablas

Tabla 1. Historia del agua residual.....	16
Tabla 2. Propiedades físicas, químicas y biológicas de aguas residuales	18
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de (ARD) y (ARnD).....	32
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales mayores a 625,00	33
Tabla 5. Parámetros del alimento (E. Fetida).....	40
Tabla 6. Parámetros de eficiencia	55
Tabla 7. Eliminación de microorganismos en varios sistemas de empleo de aguas residuales	56

Lista de figuras

Figura 1. Eisenia Fetida (Salazar Miranda, 2005, p. 61	34
Figura 2. Lombrices Aereadores (Cardoso, Ramírez, & Garzón, 2011, p. 7).....	43
Figura 3.Lombriz Biodigestora (Cardoso, Ramírez, & Garzón, 2011, p. 8).....	43
Figura 4. Capas del lombrifiltro (Saboya, 2018).....	52
Figura 5. Aplicación de las tuberías para la aeración (Saboya, 2018).	53
Figura 6. formula de diseño.....	53

Resumen

En este estudio se presenta de como en los últimos años se ha venido desarrollando un lombrifiltro a medida que esta tecnología se investiga a nivel nacional e internacional. En la remoción de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales urbanas los parámetros efectuados (temperatura, pH, turbidez, color, DBO, DQO, solidos suspendidos, solidos suspendidos totales, solidos suspendidos volátiles, coliformes fecales, coliformes totales y entre otros), su depuración ha sido muy eficiente para el tratamiento de las misma.

Debido a diferentes estudios el filtro biológico a partir de E. Foétida es muy económico para poblaciones pequeñas en donde su presupuesto no es el esencial para construir una planta convencional. Debido a esto, un biofiltro es una alternativa sostenible para reducir la contaminación de las aguas superficiales y con ello garantizar la salud de la población y contribuir al medio ambiente.

Correspondiente a la investigación realizada, diferentes autores y aplicaciones de este sistema. Se obtuvo conceptos referentes al tratamiento de aguas residuales, el funcionamiento de la lombriz californiana y lo eficaz que es el sistema Tohá para remover materia orgánica así con un porcentaje de DBO del 95%, solidos totales 95%, 93% de los sólidos suspendidos volátiles, 80% aceites y grasas, (60-80) % de nitrógeno total, (60-70) % del fosforo total y coliformes fecales del 99%.

Palabras clave: agua residual, Filtro biológico, lombriz californiana, materia orgánica.

Abstract

This study presents how a worm has recently been presented in recent years as this technology is investigated nationally and internationally. In the removal of organic matter in the treatment of urban wastewater the parameters made (temperature, pH, turbidity, color, BOD, COD, suspended solids, total suspended solids, volatile suspended solids, fecal coliforms, total coliforms and among others), its purification has been very efficient for the treatment of them.

Due to different studies the biological filter from *E. Foétida* is very economical for small populations where its budget is not essential to build a conventional plant. Because of this, a biofilter is a sustainable alternative to reduce pollution of surface waters and thereby the health of the population and contribute to the environment.

Corresponding to the research carried out, different authors and applications of this system. Concepts related to wastewater treatment, the operation of the California earthworm and how effective the Tohá system for the removal of Asian organic matter with a BOD percentage of 95%, total solids 95%, 93% of suspended solids were obtained volatile, 80% oils and fats, (60-80) % of total nitrogen, (60-70) % of total phosphorus and fecal coliforms of 99%.

Keywords: wastewater, Biological filter, Californian earthworm, organic material.

Introducción

El agua es un recurso hídrico muy importante para la vida humana, que a su vez su uso inadecuado que en efecto al devolverse al ecosistema contamina todo ser viviente. La gran demanda que se tiene de este recurso por el consumo de los seres humanos, se ha desarrollado la implementación de plantas de tratamientos de aguas servidas para disminuir la materia orgánica y metales pesados.

De este modo surge el significado de depuración o tratamiento de aguas residuales, a fin de minimizar el impacto que puedan causar en nuestro medio ambiente las constantes emanaciones y descargas producidas en él. Actualmente existen sistemas de tratamiento que han sido manejados por mucho tiempo, denominados sistemas convencionales, donde sus características, ventajas y desventajas son distinguidas, resultado de años y años de estudio y seguimiento. Sin embargo, estas plantas de tratamiento son demasiado caras de construir, tienen altos precios de operación (primordialmente eléctrica) y mantenimiento, solicitan personal calificado y crean subproductos indeseables (lodos) (Salazar Miranda, 2005, p. 1). Debido a estos métodos convencionales las diferencias operacionales y su eficiencia son desiguales para las poblaciones pequeñas (municipios, comunidades, etc) que buscan un método que sea económicamente factible y seguro para cumplir con “los parámetros establecidos y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” en Colombia con la resolución 0631 del 2015 que protege el medio ambiente, la salud de las personas y disminuir la contaminación de fuentes hídricas.

“El sistema Tohá es una alternativa amigable con el medio ambiente” (Law, 2003 citado por Ramón , León, & Castillo, 2015, p. 47), que radica en una sucesión de procesos que tienen tal objetivo de eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos que conservan tanto las aguas usadas como los residuos industriales líquidos. Con el tratamiento se adquiere agua limpia (o efluente tratado) y un residuo sólido llamado lodo o biosólido, que se dispone para evitar contaminación y malos olores, contribuyendo a la recuperación del recurso y a reducir los impactos en la salud y el ambiente (Ramón , León, & Castillo, 2015).

“Eisenia foétida o llamada lombriz californiana es un recurso biotecnológico que es capaz de degradar materia orgánica, que en efecto se encuentra suspendida en el agua residual. Esta especie se le puede encontrar con disposición en la tierra o en lugares preparados para su crianza” (Caicedo Campoverde, 2017).

A continuación, se evalúa un filtro biológico a partir de lombrices californianas (*Eisenia foétida*) para el porcentaje de remoción de materia orgánica para el tratamiento de aguas residuales urbanas que son vertidas a los ríos, lagunas, quebradas, entre otros.

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar la remoción de materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de un filtro biológico a partir de lombrices californianas (*Eisenia foétida*).

Objetivos específicos

- Analizar el porcentaje de remoción de un filtro biológico a partir de lombrices californiana para degradar materia orgánica.
- Analizar la lombriz californiana en el filtro biológico para la degradación de los metales pesados
- Establecer un análisis de estudios y aplicaciones al sistema Tohá para saber sus diferencias a nivel nacional e internacional con respecto a los parámetros físicos, químicos y biológicos.

Capítulo I

1 Marco teórico

1.2 Recurso Agua

El agua es transcendental para la supervivencia humana y para la seguridad alimentaria. Se dispone como un recurso para la industrialización, el desarrollo económico, la seguridad energética o el transporte. Su disminución o pérdida podría formar graves problemas económicos, sociales, políticos, ambientales y de salud pública (Defensoría del Pueblo, 2009 citado por Barón Lopez , 2011, p. 4).

“La tendencia actual a nivel mundial, a raíz del incremento de la demanda del recurso y el deterioro de la calidad y disponibilidad del mismo, ha sido la fuerza impulsora para la investigación y el desarrollo tecnológico de alternativas para el tratamiento y recuperación de las fuentes de aguas residuales” (Arango Laws, 2003, p. 20).

Según Jessica E. Arango Laws (2003) en su investigación **“evaluación ambiental del sistema Tohá en la remoción de salmonella en aguas servidas domésticas”**. Chile, dice que los efectos de la contaminación en las aguas se pueden resumir en:

- Degradación de los recursos hídricos
- Disminución de la calidad de agua para abastecimiento de la población, o para riego o uso en la industria con limitaciones cualitativas.
- Afecta el proceso de auto purificación de los cauces de los ríos y a los ecosistemas.
- Afecta la salud, la economía y las actividades de recreación
- Exige control riguroso y tratamiento de las aguas para su adecuado uso dependiendo del grado de contaminación.

1.3 Agua residual

Puede definirse agua residual, como el agua proporcionada a una población que, habiéndose ejecutado para diversos usos, queda impurificada. La contaminación de las aguas es una expresión relacionada con el uso específico del agua y su origen puede ser totalmente natural o producto de descargas de tratamientos de alcantarillados domésticos o industriales. Hay diferentes fuentes de contaminación de las aguas, como la contaminación del aire (lluvia ácida), determinadas prácticas agrícolas, aguas lluvias, etc (Salazar Miranda, 2005, p. 4).

*Tabla 1.
Historia del agua residual*

Fecha	Desarrollo
A. C.	Irrigación con aguas residuales – Atenas
1550	Uso de aguas residuales en agricultura – Alemania
1700	Uso de aguas residuales en agricultura - Reino Unido
1762	Precipitación química de aguas residuales - Reino Unido
1860	Dispositivo de Mouras. Tratamiento anaerobio de sólidos de aguas residuales
1865	Experimentos sobre microbiología de digestión de lodos - Reino Unido
1868	Investigaciones sobre filtración intermitente de aguas residuales - Reino Unido
1870	Filtración en arena de aguas residuales - Reino Unido
1876	Primeras fosas sépticas – USA
1882	Experimentos sobre aeración de alcantarillas - Reino Unido
1884	Introducción de las rejillas de desbaste – USA
1887	Estación experimental de Lawrence para el estudio de agua y aguas residuales. Massachusetts – USA
1887	Primera planta de precipitación química – USA
1889	Filtración en lechos de contacto - Massachusetts, USA
1891	Digestión de lodos – Alemania
1895	Recolección de metano de fosas sépticas y su empleo en alumbrado – Reino

1898	Molinete hidráulico para filtros percoladores - Reino Unido
1904	Empleo de desarenadores – USA
1904	Fosa séptica Travis de dos pisos - Reino Unido
1904	Tanque Imhoff – Alemania
1906	Cloración de aguas residuales – USA
1908	Ley de Chick – USA
1911	Aplicación de tanques Imhoff – USA
1911	Digestión separada de lodos – USA
1914	Tratamiento de aguas residuales por lodos activados - Reino Unido
1916	Primera planta municipal de lodos activados – USA
1925	Aeración por contacto – USA

Fuente: (Rojas, 2002, p. 4).

1.3.1 Propiedades del agua residual

La expresión de las propiedades o características de un agua residual puede hacerse de muchas maneras, dependiendo de su propósito específico; sin embargo, vale la pena anotar que toda caracterización de aguas residuales implica un programa de muestreo apropiado para asegurar representatividad de la muestra y un análisis de laboratorio de conformidad con normas estándar que aseguren precisión y exactitud en los resultados (Romero Rojas, 2000, p. 19).

Tabla 2.

Propiedades físicas, químicas y biológicas de aguas residuales

Propiedades físicas	Origen
Sólidos	Suministro de agua, residuos industriales y domésticos
Temperatura	Residuos industriales y domésticos
Color	Residuos industriales y domésticos
Olor	Descomposición de residuos líquidos
Propiedades químicas	Origen
Orgánicos	
Proteínas	Residuos comerciales y domésticos
Carbohidratos	Residuos comerciales y domésticos
Aceites y grasas	Residuos comerciales, industriales y domésticos
Tensoactivos	Residuos industriales y domésticos
Fenoles	Residuos industriales
Pesticidas	Residuos agrícolas
Inorgánicos	
Ph	Residuos industriales
Cloruros	Suministro de agua, residuos industriales e infiltraciones
Nitrógeno	Residuos agrícolas y domésticos
Fósforo	Residuos agrícolas, industriales y domésticos
Azufre	Suministro de agua y residuos industriales
Tóxicos	Residuos industriales
Metales pesados	Residuos industriales
Gases	
Ph	Suministro de agua e infiltraciones
Cloruros	Residuos domésticos
Nitrógeno	Residuos domésticos
Propiedades biológicas	Origen

Virus	Residuos domésticos
Bacterias	Residuos domésticos
Protozoarios	Residuos domésticos
Nematodos	Residuos domésticos

Fuente: (Rojas, 2002, p. 7)

1.3.2 (ST) Solidos totales

“Es el remanente que queda después de exponer a evaporación una muestra de agua a temperatura que va de 103 a 105 °C. Algo significativo es que la fracción solida no es la materia que se desvanece durante el proceso de evaporación por la alta presión” (Caicedo Campoverde, 2017, p. 8).

De acuerdo a sus diferencias físicas estos se clasifican en:

- **Sedimentables**

De acuerdo a características químicas

- Fijos (inorgánicos)
- Volátiles (orgánicos).

- **Suspendidos**

De acuerdo a características químicas

- Fijos (inorgánicos)
- Volátiles (orgánicos).

- **Disueltos**

De acuerdo a características químicas

- Fijos (inorgánicos)
- Volátiles (orgánicos).

1.3.3 (OD) oxígeno disuelto

“es la cantidad de oxígeno que esta disuelta en el agua. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua. Generalmente, a mayor nivel de oxígeno disuelto indica mejor calidad de agua para la vida vegetal y animal. Si los niveles son demasiados bajos, algunos peces y otros organismos no sobreviven” (Huertas & Sanchez, 2009, p. 45).

1.3.4 (DBO) demanda bioquímica de oxígeno

Cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. La DBO5 es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido, para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras; el tiempo de incubación de la DBO generalmente es de 5 días (Acuña & Reyes , 2017, p. 28).

1.3.5 (DQO) demanda química de oxígeno

“Se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte. Una de las ventajas es que el tiempo es muy corto para su análisis y podemos conocer la toxicidad” (Caicedo Campoverde, 2017). En efecto la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de Dicromato de Potasio, en una solución de Ácido Sulfúrico y convertirla en dióxido de carbono y agua, en consecuencia, la DQO representaría la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar químicamente una muestra (Salazar Miranda, 2005).

1.3.6 Coliformes totales

Son bacterias de tipo bacilo, son Gram negativas, son capaces de proliferar en concentraciones altas de sales biliares, estas fermentan la lactosa produciendo gas, ácido o aldehído. Los Coliformes totales; *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*, viven como saprófitos independientes o como bacterias intestinales, la presencia de Coliformes en el agua constituye la contaminación bacteriana reciente y un indicador de los cuerpos de agua (Arcos, Ávila, Estupiñán, & Gómez, 2005).

1.3.7 Coliformes fecales

Los coliformes fecales se denominan termotolerantes por su capacidad de soportar temperaturas más elevadas. Esta denominación está ganando más adeptos actualmente, pues sería una forma más apropiada de definir este subgrupo que se diferencia de los coliformes totales por la característica de crecer a una temperatura superior. La capacidad de reproducción de los coliformes fecales fuera del intestino de los animales homeotérmicos (o que mantienen su temperatura corporal dentro de unos límites), es favorecida por la existencia de condiciones adecuadas de materia orgánica, pH, humedad, etc (Arcos, Ávila, Estupiñán, & Gómez, 2005, p. 72).

“El análisis de este parámetro se utiliza para determinar que hay presencia de agentes bacterianos que son patógenos” (Caicedo Campoverde, 2017, p. 12).

1.3.8 Diferentes tipos de aguas residuales

1.3.8.1 Agua residual urbana

Los efluentes urbanos son una mezcla de aguas residuales domésticas y de industrias situadas en zona urbana. Las aguas residuales domésticas proceden de las viviendas y las instalaciones comerciales e incluyen aguas fecales (aguas negras) y aguas de lavados, duchas, lavadoras, lavavajillas y cocinas fundamentalmente. Estos efluentes presentan cargas orgánicas variables, pero al mezclarse entre sí y con los demás efluentes urbanos, dan como resultado unas aguas de baja carga orgánica y complejas en cuanto a su composición (Ruiz, Álvarez, & Soto, 2014).

La clásica solución para el tratamiento de aguas residuales urbanas ha sido la utilización de métodos convencionales de saneamiento urbanos, donde se recolectan, concentran, almacenan y tratan las aguas residuales urbanas sobre la base de conocimientos de la ingeniería hidráulica y en obras que normalmente descargan las aguas tratadas en cursos permanentes de agua (Gil, Cisneros, Dante, Plevich, & Sanchez, 2013, p. 119).

1.3.8.2 Aguas Residuales Domésticas (ARD):

Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a:

1. Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
2. Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial) (Colombia. Congreso de la República, 2015).

1.3.8.3 Aguas Residuales no Domésticas (ARnD):

Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas, (ARD) (Colombia. Congreso de la República, 2015).

1.3.9 Tratamiento del agua residual urbana

1.3.9.1 Plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR):

son unidades de transformación de los efluentes industriales y domésticos, o sea unidades de transformación de la materia orgánica. El sistema parece ser unidades aisladas, cuyo objetivo es de preservar algún cauce de agua, por obligación legal y la presión de la Autoridad Ambiental Regional, pero vistas de manera global representan el principio y el fundamento del sistema digestivo del Mundo, de este gran hormiguero de los seres humanos (BACILIO MOROCHO, 2016, p. 16).

1.3.9.1.1 Tratamiento preliminar

“Este tratamiento es la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales con el objetivo de proteger, progresar con el funcionamiento de las obras de tratamiento y eliminar o reducir las condiciones indeseables relacionadas primordialmente con la apariencia estética de las plantas de tratamiento” (Rojas, 2002, p. 12).

Procesos preliminares.

- Rejas o tamices.
El objetivo es eliminar los sólidos gruesos.
- Trituradores.
Desmenuzamiento de sólidos.
- Desarenadores.

Eliminación de arenas y gravilla

- Desengrasadores.

Eliminación de aceites y grasas.

- Preaeración.

Control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico.

- Homogenización o tanque de igualación.

Tanques que sirven para disminuir o regular los efectos de la variación de flujo o la concentración de las aguas residuales (Lizarazo & Orjuela , 2013, p. 43).

1.3.9.1.2 Tratamiento primario

Después del tratamiento preliminar, los tratamientos primarios minimizan los sólidos en suspensión de las aguas residuales.

Procesos primarios.

- Coagulación.

proceso por el que los elementos de una suspensión o dilución estables son desestabilizados por suspensión de las fuerzas que mantienen su estabilidad (Lizarazo & Orjuela , 2013, p. 45).

- Sedimentación primaria.

Proceso físico que aprovecha la diferencia de densidades, peso entre líquido y las partículas suspendidas (Lizarazo & Orjuela , 2013, p. 44).

- Flotación.

utilizado para la separación de partículas sólidas o líquidas en un medio líquido (Lizarazo & Orjuela , 2013, p. 44).

- Precipitación química.

(Huang et. al. (1999) citado por (Soto, Miranda, Sosa, & Loredó, 2006, párr. 13)) muestra una metodología por precipitación química para remover cobre, níquel y zinc utilizando cal como agente floculante. (Guillard y Lewis, (2001) citado por (Soto, Miranda, Sosa, & Loredó, 2006, párr. 14)) desarrollaron un proceso de optimización para remover níquel en un proceso continuo de precipitación química, obteniendo hasta un 99.6% de remoción.

- Filtros gruesos.

“Este proceso primario ayuda esencialmente a la separación de sólidos finos no retenidos en la sedimentación, pero pueden optimizar la calidad microbiológica del agua servida, ya que los microorganismos se pueden comportar como sólidos o se adhieren a la superficie de otros sólidos suspendidos en el agua” (González, Martín, & Figueroa, 2006, p. 7).

- Oxidación avanzada.

En los contaminantes orgánicos refractarios, los procedimientos resultan inadecuados para lograr la calidad de pureza solicitada por ley o por el uso posterior del efluente tratado. Cada vez se está requiriendo en los países industrializados al uso de las llamadas Tecnologías o Procesos de Oxidación Avanzados (AOX), muy poco ejecutados y, peor aún, menos divulgados en los países de economías emergentes como los de América Latina. Son necesariamente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes invulnerables a la biodegradación para generar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores (Salas, 2010, p. 33).

- Floculación.

“Es el método mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y aglomerar posteriormente. En la primera etapa la coagulación elimina la doble capa eléctrica que caracteriza a los coloides y con la floculación se aglomeran los coloides mediante la atracción de partículas con el aglutinamiento de los floculantes” (Caviedes, Muñoz, Perdomo, Rodríguez, & Sandoval, 2015, p. 80).

1.3.9.1.3 Tratamiento secundario

Es la remoción de la DBO soluble y de sólidos suspendidos que no son destituidos en los procesos anteriores (Lizarazo & Orjuela , 2013, p. 45).

Algunos procesos secundarios.

- Biodiscos

Técnica tipo biológica, fácil de operar, requiere espacios reducidos y su consumo energético es bajo. Su estructura es de diseño horizontal donde se encuentra una película de microorganismos. Esta capa está en contacto con el agua. El espesor de la capa se regula con el rozamiento del agua (Caicedo Campoverde, 2017, p. 14).

- lodos activados

Los lodos activados mantienen la biomasa en agitación en el estanque de aireación desde donde pasa a la unidad de sedimentación. La biomasa sedimentada es devuelta parcialmente al tratamiento biológico, para mantener una población de microorganismos adecuada, y una parte se purga del sistema como lodo en exceso (Arango Laws, 2003, p. 29).

Diferentes tipos de lodos activados como el convencional, el de alta calidad, contacto de estabilización y aeración prolongada (Rojas, 2002).

- Lagunas de estabilización.

Las aguas son vertidas en estanques de tierra impermeabilizados, donde sus tratamientos son de largos tiempos de retención, y sus variaciones de carga no afecta al tratamiento, se requiere áreas extensas y agitación constante para oxigenar la zona (Caicedo Campoverde, 2017, p. 14).

Diferentes tipos: Aerobia, Facultativa y Maduración.

La laguna airada tiene varios tipos como mezcla completa, airada facultativa, facultativa con aeración mecánica y difusión de aire.

- **Biorreactor de membrana**
Conocido como (BRM) en este tratamiento se combinan dos procesos la degradación biológica y la separación, los sólidos suspendidos y los microorganismos se filtran por medio de una membrana. Este proceso se realiza controlando el tiempo en el que permanecen los microorganismos en el reactor (Caicedo Campoverde, 2017, p. 15).
- **Filtro biológico.**
Material biológico que en efecto hace pasar agua donde quedan retenida la materia orgánica que es degradada por los organismos encontrados en las capas filtrantes (Caicedo Campoverde, 2017).
- **Filtro con lombriz**
Llamado lombrifiltro, es un filtro percolador que se compone por diferentes capas que van en forma de gradillas donde se ubica el material biológico y material filtrante para el agua a tratar (Caicedo Campoverde, 2017).

1.3.9.1.4 Tratamiento terciario.

el objetivo es complementar los procesos anteriormente indicados para lograr efluentes más puros, que tengan menor carga contaminante y se pueda utilizar para diferentes usos (Rojas, 2002).

Algunos procesos terciarios.

- **Intercambio iónico**
Es un proceso de dispersión física en la que los iones intercambiados no se cambian químicamente. Las importantes ventajas de intercambio iónico es la reparación del valor del metal, la selectividad, ausencia de volumen de lodos causados y la reunión de las descripciones de descarga precisas (Zewail & Yousef, 2015 citado por Caviedes, Muñoz, Perdomo , Rodriguez , & Sandoval, 2015, p. 78).

- Adsorción

Este proceso presenta remoción de una extensa diversidad de contaminantes, alta capacidad, cinética rápida y posiblemente selectiva, por consiguiente, depende su rendimiento, básicamente por la estructura física del mismo (Liu & Lee, 2014 citado por Caviedes, Muñoz, Perdomo , Rodriguez , & Sandoval, 2015, p. 78). empleados para destituir colorantes iónicos, metales pesados, materiales radioactivos entre distintos contaminantes orgánicos e inorgánicos formados por diferentes industrias (Osei Boamah, et al; 2015 citado por Caviedes, Muñoz, Perdomo , Rodriguez , & Sandoval, 2015, p. 78).

- Osmosis inversa

“Es un proceso de permeación a través de membrana para la separación por difusión controlada o cribado. Tiene la capacidad de seleccionar elementos de tan solo 0.0001 mm, lo que le otorga un amplio abanico de capacidades de tratamiento” (Nemerow & Dasgupta, 1998 cita por Caviedes, Muñoz, Perdomo , Rodriguez , & Sandoval, 2015, pág. 75).

- Nitrificación- Desnitrificación.

El proceso de nitrificación es generalmente ejecutado por bacterias quimiolitotóxicas que utilizan el carbono inorgánico como fuente de carbono para la síntesis celular, y el nitrógeno inorgánico para obtener energía. Los microorganismos involucrados en este proceso se dividen en dos grupos peculiares, las bacterias amonioxidantes (AOB) y las bacterias nitritoxidantes (NOB). El proceso de desnitrificación consiste en la reducción del nitrato a nitrito y, posteriormente, a compuestos de nitrógeno gaseoso en presencia de una fuente de carbono orgánica. La desnitrificación se produce en ambientes carentes de oxígeno y con disponibilidad de nitrito y nitrato como aceptores de electrones (Claros Bedoya, 2012, p. 15)

- **Electrodiálisis**

Es una técnica de descontaminación que remueve elementos iónicos de medios acuosos utilizando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante (Guastalli, et al; 2004 citado por Caviedes, Muñoz, Perdomo , Rodriguez , & Sandoval, 2015, p. 75). Esta práctica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0,0001 μm , por medio de hojas o laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua (Taylor & Wiesner, 2002 citado por Caviedes, Muñoz, Perdomo , Rodriguez , & Sandoval, 2015, p. 75).

1.3.10 Problemas en la salud

Durante todo el ciclo del agua, las descargas aisladas o la contaminación generalizada, por el uso de agentes industriales, agrícolas, urbanos, pueden reducir la calidad de las aguas y alterarla de manera que sea no apta para su uso. En los países de América Latina y el Caribe, uno de los problemas sanitarios más críticos es la descarga incontrolada de aguas servidas sin tratamiento, las cuales contaminan los recursos hídricos superficiales y subterráneos. En algunos países las aguas servidas que son tratadas, generalmente no reciben el tratamiento adecuado. En muchos casos la inadecuada disposición de excretas y alcantarillados contamina el agua potable, y el consumo de productos regados con esta agua contaminada, da origen a numerosas enfermedades diarreicas y gastrointestinales. Su número las coloca dentro de las tres principales causas de muerte en América Latina, siendo las más comunes: amebiasis, cólera, hepatitis, shigelosis, tifoidea, fiebre paratífica, e infecciones por rotavirus (OMS, 1999) (Arango Laws, 2003, p. 22).

Según cifras de la Organización Mundial de la Salud [OMS], se estima que el 10 % de la población mundial consume alimentos regados con aguas residuales sin tratar, y que el 32 % de la población mundial no tiene acceso a servicios adecuados de saneamiento básico, generando 280000 muertes asociadas a enfermedades de carácter hídrico. Se estima que el 4 % del total de muertes en el mundo están

relacionadas con la calidad del agua, higiene y saneamiento. En América Latina y el Caribe, las enfermedades diarreicas agudas (EDA), son una de las diez causas principales de muertes por año, debido a problemas en la calidad del agua, principalmente por manejo inadecuado de aguas residuales (Rodríguez, García-Ubaque, & García-Ubaque, 2016, p. 739).

Tanto en el país, como a nivel latinoamericano se ha trabajado intensamente en el suministro de agua potable a las comunidades y los resultados obtenidos son mucho más sobresalientes que los de saneamiento básico; pero en esta óptica se deja de lado el hecho de que aunque la población acceda a agua potable para su consumo en cocina, baños, etc., las aguas residuales impactan los cuerpos de agua que son utilizados para riego de cultivos que son ingeridos directamente por el ser humano o indirectamente por animales que posteriormente son objeto de consumo humano, generando así riesgos para la salud (Rodríguez, García-Ubaque, & García-Ubaque, 2016, p. 739).

Según la **Revista de Salud Pública** (2016), en su publicación “**Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia**”. Colombia, la Organización Mundial de la Salud en su Informe del año 2015, del Programa de vigilancia conjunta del abastecimiento de agua y saneamiento reporta para Colombia los siguientes indicadores desde el año 1990 hasta el año 2015. En este informe, en el año 2015, se estima que la población urbana del país, pasó de un 68% en 1990 a un 76% en 2015. Se aprecia que la cobertura de saneamiento básico en zonas urbanas pasó de un 93% a 97% en el periodo 1990 a 2015 y que aún se reporta un 3% de la población con condiciones de saneamiento básico deficiente. En el área rural, la cobertura de saneamiento básico pasó de 45% a 74% en el mismo periodo; quedando en situación de deficiencia un 26% de la población. A nivel nacional la cobertura pasó de 78% a 91%. De acuerdo con la información reportada por la Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, el 17,3% de los sistemas de tratamiento de aguas residuales realizan tratamientos preliminar y primario (remoción parcial de sólidos suspendidos y materia orgánica). Estas plantas

procesan el 42,8 % de las aguas residuales del país. Por otra parte, el 82% de los sistemas realiza tratamiento secundario (remoción total de sólidos suspendidos y materia orgánica). El caudal promedio tratado por la totalidad de los sistemas de tratamiento aumentó de 22,4 m³ /seg en 2011 a 23,1 m³ /seg en 2012 (Rodríguez, García-Ubaque, & García-Ubaque, 2016).

1.4 Norma legal para el vertimiento de las aguas residuales urbanas

Unas de las normas establecidas en Colombia para los parámetros decretados y valores límites permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y al sistema de alcantarillado público regido por el **Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible** por el cual la **resolución 631 de 2015** aplica sus valores permisibles para las aguas residuales (Colombia. Congreso de la República, 2015).

En esta resolución los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, de las actividades, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales (Colombia. Congreso de la República, 2015).

Tabla 3.

Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de (ARD) y (ARnD).

Parámetros Generales	unidades	(ARD) DE LAS SOLUCIONES INDIVIDUALES DE SANEAMIENTO DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES O BIFAMILIARES	(ARD), Y DE LAS AGUAS RESIDUALES (ARD – ARnD) DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES, CON CARGA MENOR O IGUAL A 625,00 kg/DÍA DBO5
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
(DQO)	mg/L O2	200	180
(DBO5)	mg/L O2		90
(SST)	mg/L	100	90
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5	5
Grasas y Aceites	mg/L	20	20
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L		Análisis y Reporte

Fuente: (Colombia. Congreso de la República, 2015)

Para los hidrocarburos (Hidrocarburos Totales), los compuestos de fósforo (Ortofosfatos (P-PO43-), Fósforo Total (P)), y los compuestos de nitrógeno (Nitratos (N-NO3-), Nitritos (N-NO2-), Nitrógeno Amoniacal (N-NH3), Nitrógeno Total (N)) tienen unidades en mg/L en donde se hace un reporte y análisis para las aguas residuales domésticas (ARD), y de las aguas residuales (ARD – ARnD) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, con carga menor o igual a 625,00 kg/día DBO5.

Tabla 4.

Parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales mayores a 625,00

Parametros Generales	unidades	(ARD), Y AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS - ARnD DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO, CON UNA CARGA MAYOR A 625,00 kg/día Y MENOR O IGUAL A 3.000,00 kg/día DBO5	(ARD), Y AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS - ARnD DE LOS PRESTADORES DEL SERVICIO PÚBLICO DE ALCANTARILLADO, CON UNA CARGA MAYOR A 3.000,00 kg/día DBO5
		pH	Unidades de pH
(DQO)	mg/L O2	180	150
(DBO5)	mg/L O2	90	70
(SST)	mg/L	90	70
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5	5
Grasas y Aceites	mg/L	20	10
Iones			
Cianuro Total (CN-)	mg/L	0,5	0,5
Metales y Metaloides			
Aluminio (Al)	mg/L	análisis y reporte	análisis y reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,1	0,1
Cinc (Zn)	mg/L	3	3
Cobre (Cu)	mg/L	1	1
Cromo (Cr)	mg/L	0,5	0,5
Hierro (Fe)	mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,02	0,02
Níquel (Ni)	mg/L	0,5	0,5
Plata (Ag)	mg/L		Análisis y Reporte
Plomo (Pb)	mg/L	0,5	0,5

Fuente: (Colombia. Congreso de la República, 2015)

Los Compuestos semivolátiles fenólicos, los fenoles totales, sustancias activas, azul de metileno, hidrocarburos, compuestos de fosforo, compuestos de nitrógeno y iones tienen unidades en mg/L. en algunos casos se les hace análisis y reporte con cargas mayor a 625,00 kg/día y menor o igual a 3.000,00 kg/día DBO5, y cargas mayores de 3.000,00 kg/día DBO5 la mayor parte de los compuestos mencionados anteriormente se hace reporte y análisis (Colombia. Congreso de la República, 2015).

Capítulo II

2 Lombriz californiana (*Eisenia Foétida*)

Solano & Guzmán, (2014) señalan que la lombriz roja californiana de nombre científico *Eisenia foétida* (Figura 1) ha sido utilizada para la actividad de la mejora del suelo. Se le llama californiana porque fue en California donde se inició el estudio a gran profundidad sobre su efecto beneficioso sobre el mantillo orgánico y estiércol a nivel comercial (citado por Saboya, 2018, p. 82).



Figura 1. Eisenia Foétida (Salazar Miranda, 2005, p. 61)

2.1 Lombricultura

La lombricultura es una tecnología que manipula una especie de lombriz domesticada para transformar todo tipo de material orgánico en humus, carne y harina de lombriz, como productos finales. En general, se conocen aproximadamente de 8000 especies de lombrices. La lombriz roja californiana (*Eisenia foétida*) es de las más utilizada en la lombricultura debido a su rusticidad, tolerancia a los factores ambientales, alta tasa de crecimiento, alta eficiencia productiva y a su fácil manejo (Guadarrama y Taboada, 2004; Gheisari et al., 2010 citado por López, Ruelas, Sañudo, Armenta, & Félix, 2013, p. 82). En los últimos años, esta técnica ha tomado gran jerarquía como una solución más a los problemas de los residuos orgánicos, y en base a esto han germinado trabajos enfocados a estudiar el efecto de diferentes tipos de residuos orgánicos en el desarrollo de la

lombriz y en la producción de lombricompost. Algunos de los residuos que se encuentran son los desechos de animales como las excretas vacunas, gallinaza, porcínaza y equinaza (Morales Munguía, 2009 citado por López, Ruelas, Sañudo, Armenta, & Félix, 2013, p. 82); los sólidos municipales y residuos domésticos, los residuos agroforestales como la broza de café, residuos de banano, restos de follaje ornamentales, aserrín y residuos de pastos. Debido a esta gran diversidad de materia orgánica que se produce y que puede usar como sustrato, es de esperarse que haya diversificación en las propiedades del humus y en el desarrollo y reproducción de la lombriz (López, Ruelas, Sañudo, Armenta, & Félix, 2013, p. 82).

Actualmente los tipos más utilizados en la lombricultura son tres de ocho mil especies existentes: Eisenia Foétida, Lumbricus Rubellus y Rojo Híbrido.

2.2 Clasificación Sistemática de la lombriz californiana

- Reino: Animal
- filo: Anélida
- Clase: Oligoqueto
- Orden: Opisthoro
- Familia: Lombricidae
- Género: Eisenia
- Especie: E. foétida.

(Gardiner, 1978 citado por Juárez Uribe, 2010, p. 1).

2.3 Características de la lombriz californiana

- Es de color rojo oscuro. Respira por medio de su piel por lo que no tienen pulmones (Bacilio Morocho, 2016).
- Al nacer miden 1 mm y en estado adulto miden de 6-8 cm de largo, de 3-5 mm de diámetro y pesan entre 0,4 y 0,6 g, aunque ya adultas pesan hasta alrededor de 1,4 g (Bacilio Morocho, 2016).

- No soporta la luz solar por lo que unas células especiales colocadas a lo largo de su cuerpo le avisan de la presencia de la luz, una lombriz expuesta a los rayos del sol muere en unos pocos minutos (Bacilio Morocho, 2016).
- Puede llegar a producir, bajo ciertas condiciones, hasta 1.300 lombrices al año (Bacilio Morocho, 2016).
- Este animal tiene un cuerpo alargado cilíndrico, el cual se adelgaza en sus extremos, formado por 94 a 96 anillos donde cada uno tiene una función específica. Son invertebrados que se mueven por contracción de sus anillos y músculos (Salazar Miranda, 2005).
- Las lombrices recién nacidas, son de color blanco, cuyo número oscila entre 2 a 21 ejemplares, se vuelven rosadas a los 5 ó 6 días y se cambian definitivamente a rojo oscuro de los 15 a 20 días (Salazar Miranda, 2005).
- La *Eisenia Fetida*, tiene 182 aparatos excretores, 6 riñones y 5 corazones, y la cabeza carece de ojos o palpos, pero son muy sensibles a la luz (Salazar Miranda, 2005).
- No tiene dientes ni mandíbula por lo que no tiene capacidad de moler el alimento. Debido a un sistema bucal succiona su alimento por la boca, ubicada en el primer anillo o somito. Cuando ésta alcanza al estómago, unas glándulas especiales se encargan de segregar carbonato cálcico, cuyo objetivo es neutralizar los ácidos concurrentes en la comida ingerida, la que más tarde de atravesar todo el aparato digestivo es eliminada por el ano, que se halla en la parte terminal (Salazar Miranda, 2005).
- En cada metámero se ubica un corazón y un par de riñones, razón por la cual, sobrevive si se parte más que todo la que tiene la boca (Salazar Miranda, 2005).
- La lombriz también está dotada, entre otros, de sistema circulatorio, nervioso y muscular. Principalmente el sistema muscular que le permite efectuar cualquier tipo de movimiento (Salazar Miranda, 2005).
- La lombriz roja se hace adulta a los 3 meses, tiempo en la que se encuentra con capacidad de reproducción, visualizándose un anillo de mayor espesor o diámetro que el resto del cuerpo llamado clitelo (Salazar Miranda, 2005).

- La lombriz es hermafrodita insuficiente, es decir tiene ambos sexos, pero necesita aparearse para reproducirse. Cada lombriz está dotada de un aparato genital masculino y de un aparato genital femenino. El aparato genital masculino está integrado por los testículos que son glándulas secretoras de esperma. El aparato genital femenino recibe el esperma y lo retiene hasta el momento de la fecundación (Salazar Miranda, 2005).
- Dos lombrices en fase de acoplamiento giran en sentido opuesto la una de la otra, de esta manera entra en contacto el aparato genital masculino de una con el aparato genital femenino de la otra (Salazar Miranda, 2005).
- La fecundación se efectúa a través del Clitelo, cuyas glándulas producen el capullo o cápsula, desde donde emergen las lombrices después de 14 a 21 días de incubación, en un número que va de 2 a 21 ejemplares (Salazar Miranda, 2005).
- La lombriz se alimenta de desechos orgánicos, pero también siendo muy útil en la aireación, porosidad y movimiento del medio en un 50%. De esta forma se obtiene un sistema de degradación de materia orgánica y purificación de aguas residuales autosustentable, al no requerir la entrega de energía externa para su operación (Salazar Miranda, 2005).

2.3.1 Principales cualidades

- No todas las especies de lombrices son aptas para las condiciones de cría, Sin embargo, esta especie no sólo es la que mejor se ajusta al cautiverio, sino que tiene especialidades que la hacen muy útil. La longevidad de esta especie se estima en alrededor de 15 a 16 años y no contrae ni transmite enfermedades (Pastorelly citador por Salazar Miranda, 2005).
- Esta lombriz come una cantidad de comida equivalente a su propio peso y escupen el 60% convirtiéndolo en humus, siendo el 40% sobrantes en síntesis celular, respiración y otros procesos vitales (Agroflor citado por Salazar Miranda, 2005).
- La lombriz *Eisenia Foétida* es una especie Eurífoga, en efecto, se alimenta con los más diversos desechos, fundamentalmente, los de tipo orgánico, caracterizándose

por su gran voracidad. En periodos cuando reduce el aporte de nutrientes orgánicos, las lombrices pueden sobrevivir mejor en presencia de residuos carbónicos, independientemente de nutrientes orgánicos tales como nitrógeno, fósforo y potasio. Esto manifiesta la importancia de la celulosa en la dieta de la Eisenia Fetida (Salazar Miranda, 2005).

- Es una especie que tiene gran tolerancia a la aglomeración, pudiendo cohabitar entre 4.000 a 50.000 individuos por metro cuadrado (Salazar Miranda, 2005).
- La realización de la Eisenia Foétida, durante 24 horas tiene una zona o franja operativa de 25 cm. la que es parcialmente inferior a la de la lombriz común, que va de 2 a 6 m. Esto permite domesticar con habilidad y cultivar humus sin riesgo de evaporación y dilución de deposiciones (Salazar Miranda, 2005).

2.4 Parámetros ambientales para su producción y desarrollo

2.4.1 Aireación

Este parámetro es fundamental para la correcta respiración y el proceso de las lombrices. Si no es la apropiada, el consumo de alimentos se reduce, además de disminuir el apareamiento y la reproducción debido a la compactación. (Trejos Vélez, 2012 citado por Bacilio Morocho, 2016, p. 20).

2.4.2 Temperatura

La condición óptima de temperaturas para el crecimiento de las lombrices oscila entre los 12 y 25°C; para la formación de cocones. Si la temperatura es muy elevada durante el verano, debe apelarse a riesgos más frecuentes, conservar las camas libres de malas hierbas y tratar de evitar que las lombrices no emigren buscando ambientes más frescos. (Trejos Vélez, 2012 citado por Bacilio Morocho, 2016, p. 20).

2.4.3 Humedad

La humedad debe ser del 70-80% para facilitar la digestión de alimento y deslizamiento a través del material. Se establece que la humedad del medio es óptima cuando al apretar un puñado de material totalmente húmedo, si salen de 8 a 10 gotas está en el rango establecido aproximadamente. Una humedad superior al 85% es perjudicial ya que compactan las camas o lechos, disminuyendo la aireación y el alimento pierde parte de su valor nutricional.

La lombriz puede vivir con mucha humedad, pero disminuye su actividad. En cambio, si falta humedad, puede dar lugar a su muerte porque la lombriz ingiere el alimento succionándolo. (Trejos Vélez, 2012 citado por Bacilio Morocho, 2016, p. 20).

2.4.4 pH

El pH mide la propiedad alcalina o acida del sustrato. La lombriz acepta un pH de 5 (pH ácido) a 8,4 (pH alcalino). El pH óptimo es de 7. Fuera de esta escala, la lombriz entra en una etapa de latencia. Si el pH es menor al valor óptimo (pH ácido). (Trejos Vélez, 2012 citador por Bacilio Morocho, 2016, p. 20).

2.4.5 Riego

Conviene regar en forma natural con un aspersor en forma de ducha. La lluvia no conmueve a las lombrices, salvo que se causen inundaciones. La técnica manual de riego consta de una manguera de goma, de características variables como la función de los lechos. Por su sencillez es muy difundido, pero solicita un trabajador dedicado exclusivamente a esta labor. (Trejos Vélez, 2012 citado por Bacilio Morocho, 2016, p. 20).

2.4.6 Parámetros del alimento (lombriz *Eisenia Fetida*).

*Tabla 5.
Parámetros del alimento (E. Foétida)*

Parámetro	Nivel Adecuado	Peligro de Muerte
Temperatura	15° - 24°C	<5°C >37°C
Humedad	70 – 80 %	<70% >80%
pH	6.0 – 8.0	<4.5 >8.5
Conductividad eléctrica	3.0 mmhos/cm	>8.0 mmhos/cm
Proteínas	7,5% - 13%	<7.5% >18%

Fuente: (Hernández, 2005 citado por Manrique & Piñeros, 2016).

2.4.7 Condiciones del sustrato (habitat).

Aserrín

El aserrín es un residuo de madera, posee muchas cualidades por lo que *E. Foétida* tiene preferencia, en todos los tamaños de partícula el aserrín tiene por característica que posee una fácil descomposición en relación con la viruta y cuando el aserrín es mezclado con otros residuos de origen orgánico posee ventajas en cuanto a densidad, porosidad y aireación. El polvo de aserrín es un subproducto que se obtiene de muchas industrias como del talado de árboles, de aserraderos, de la fabricación de muebles y de la industria del papel entre otras y suele ser utilizado en la cría de algunas especies, su bajo costo y la disponibilidad hacen un recurso beneficioso para la práctica de lombricultura con ciertas excepciones ya que el aserrín que posee una coloración rojiza no suele ser utilizado por la presencia de taninos que resultan tóxicos para las lombrices (Acuña & Reyes , 2017, p. 16).

La utilización del aserrín en polvo para la producción de humus resulta eficientemente cuando este se combina el 50 % de aserrín con el 50% de estiércol cuando es mayor la cantidad de aserrín existe una considerable disminución en el proceso reproductivo de *E. Foétida* y se obtiene una deficiencia para la obtención

del humus incrementando el tiempo para transformar el aserrín en humus lo que económicamente no resulta viable para este proceso (Cajas, 2009; Coronel, 2015 citado por Acuña & Reyes , 2017, p. 16).

2.5 Depredadores de la Lombriz en su habitat.

Según Basaure manifiesta lo siguiente sobre los depredadores de la Lombriz (Hernández, 2005, p. 39 citado por Lima Coronel, 2016, p. 30).

Existen animales asociados a la lombriz y que predan sobre ella; entre ellos está el ciempiés el cual ataca directamente a las cápsulas o cocones, deteniendo de esta manera la reproducción de la lombriz. Las hormigas atacan directamente a la lombriz en cualquier edad. Cuando no se da un manejo adecuado a los desechos se presentan ratas, las cuales son atraídas por los desechos e indirectamente se comen a las lombrices. Actualmente, un enemigo económicamente importante de la lombriz es la planaria, gusano plano con necesidades alimenticias similares a las de la lombriz; convive con ella, pero también se enrosca sobre su cuerpo y la estrangula. Entre otros enemigos naturales se mencionan a los pájaros, los ratones, los topos, los sapos, las serpientes y animales pequeños como los gorgojos. Por lo anterior, se recomienda proteger los lombricomposteros y revisarlos constantemente.

2.6 Función de la lombriz californiana

La lombriz en el tratamiento tiene dos funciones una como aireadores y mezcladores y la otra como biodigestores. (Sinha, Bharambe, & Chaudhari, 2008), mencionan que los cuerpos de las lombrices trabajan como biofiltros que son capaces de remover la DBO5 en más de un 90%, la DQO entre 80-90%, los STD entre 90-92% y los SST entre 90-95%, por medio de mecanismos de ingestión, biodegradación y absorción a través de las paredes de su cuerpo. Además, hacen mención que las lombrices incrementan la conductividad hidráulica y la aeración natural granulando

las partículas de arcilla. Las lombrices llevan a cabo una transformación física y funcionan como aireadores y mezcladores al movilizar partículas, triturar, mezclar y propiciar condiciones aerobias. En el aparato digestivo de la lombriz se lleva a cabo una transformación biológica a través del fraccionamiento, desdoblamiento, síntesis y enriquecimiento enzimático y microbiano. En la figura 2 se observa la función de las lombrices como aireadores del sistema. Al excavar galerías las lombrices permiten la aeración y que el agua, los nutrientes y el oxígeno se filtren (Cardoso, Ramírez, & Garzón, 2011).

2.6.1 La lombriz como aireadores

De acuerdo a Rodale, 1971, el alimento es absorbido por la boca de la lombriz gracias a la bomba succionadora que se encuentra situada en la faringe. Desde el ingreso del alimento a la boca se le proveen enzimas como la amilasa. En el esófago están las glándulas de Morren que secretan carbonato de calcio lo que ayuda a neutralizar la acidez del alimento. En la molleja el material es finamente molido antes de ser digerido, aquí se consiguen enzimas como la mucina. En el estómago se lleva a cabo una acción enzimática exógena producto de la actividad bacteriana y una acción endógena fruto de los jugos digestivos que son ricos en hormonas, enzimas y otras sustancias fermentativas que ayudan al proceso de quebrantamiento de las partículas. Al intestino llega el alimento totalmente molido y químicamente modificado, estructurándose las micelas que son las moléculas base del humus. Las excretas o turrículos se forman como pellets cubiertos de una mucoproteína, que es una membrana peritrófica, que proporciona cohesión y soporte a la materia orgánica que ayuda al crecimiento microbiano. Es un material fino con un gran contenido de bacterias, material orgánico y nitrógeno disponible, calcio, magnesio, fósforo y potasio (Cardoso, Ramírez, & Garzón, 2011, p. 7).

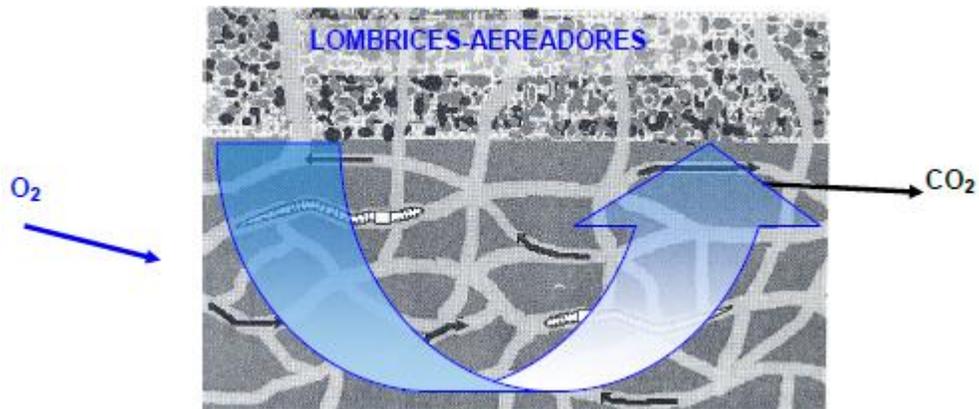


Figura 2. Lombrices Aereadoras (Cardoso, Ramírez, & Garzón, 2011, p. 7).

2.6.2 Lombriz como biodigestores.

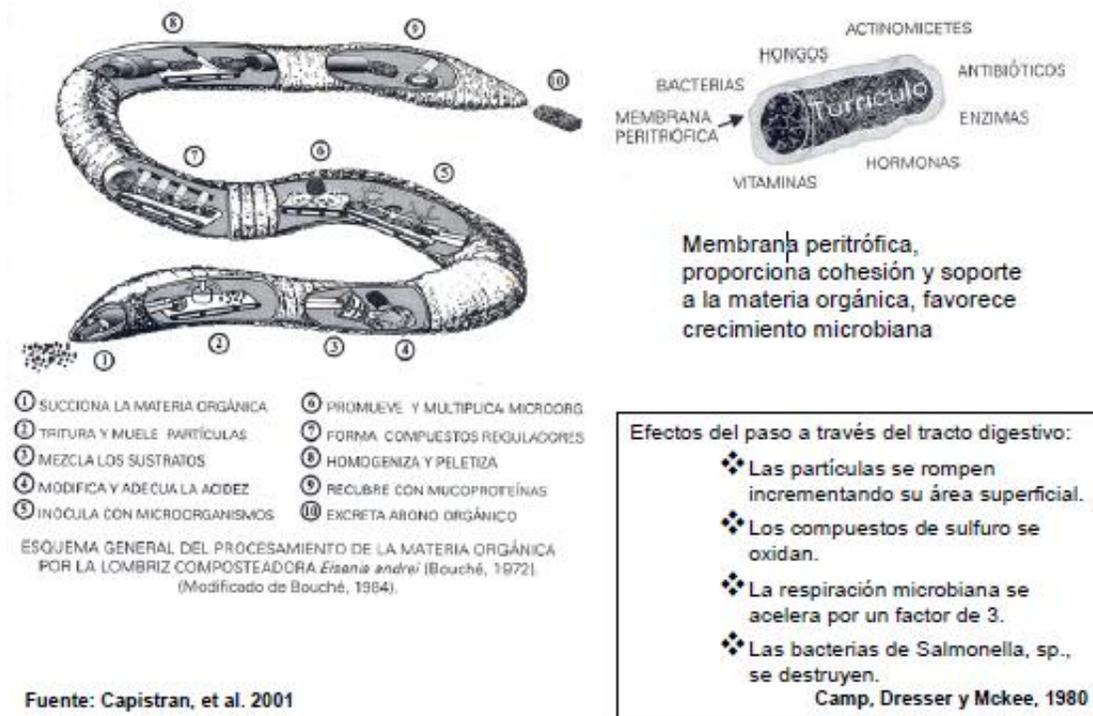


Figura 3. Lombriz Biodigestora (Cardoso, Ramírez, & Garzón, 2011, p. 8).

2.7 Humus

Es una materia orgánica en descomposición que se halla en el suelo y procede de restos vegetales y animales muertos. Al inicio de la descomposición, parte del carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno se disipan rápidamente en forma de agua, dióxido de carbono, metano y amoníaco, pero los demás componentes se descomponen lentamente y permanecen en forma de humus. El humus es una materia homogénea, amorfa, de color oscuro e inodora. Los productos finales de la descomposición del humus son sales minerales, dióxido de carbono y amoníaco. (Ávila, 2014 citado por Bacilio Morocho, 2016, p. 23).

2.8 Humus de la lombriz californiana

El humus de lombriz es el producto resultante de la transformación digestiva en forma de excretas que ejerce este pequeño anélido sobre la materia orgánica que consume. Aunque como abono orgánico puede decirse que tiene un excelente valor en macro nutrientes, también habría que mencionar la gama de compuestos orgánicos presentes en él, su disponibilidad en el consumo por las plantas, su resistencia a la fijación y al lavado. (Ávila, 2014 citado por Bacilio Morocho, 2016, p. 24).

2.8.1 Principales ventajas del humus:

Reemplazo exitoso de fertilizantes químicos:

El humus aumenta la productividad respecto a los fertilizantes químicos al ser aplicado en plantaciones, y es aproximadamente 75% más barato que estos. Además, el uso de humus mejora el tamaño, color, olor, sabor, aroma de flores, frutas, verduras y granos alimenticios (Reyes Marambio, 2016, p. 15).

Restauración de Suelos:

El humus mejora física, química y biológicamente el suelo en el cual es aplicado, ya que aumenta la porosidad de este, incrementa la disponibilidad de nutrientes y

Suma a la matriz de suelo microbios beneficiosos que restauran el equilibrio natural del sustrato (Reyes Marambio, 2016, p. 16).

Reduce la necesidad de riego:

Debido a la alta porosidad, aireación, drenaje y capacidad de retención de agua, el humus reduce en un 30 a 40% las necesidades de riego del suelo en el cual es aplicado (Reyes Marambio, 2016, p. 16).

Elimina pestes de cultivos:

El humus aumenta la resistencia biológica de los cultivos a plagas y enfermedades; diversas pruebas de campo sobre distintas especies muestran disminución de artrópodos (pulgones, cochinillas y arañas rojas), hongos y actinomicetos, reduciendo significativamente las necesidades de usar pesticidas químicos en los cultivos en los cuales es aplicado. Finalmente, una vez cosechado puede almacenarse durante un tiempo prolongado, manteniendo una humedad óptima de un 40 a 60% (Reyes Marambio, 2016, p. 16).

Capítulo III

3. Filtro biológico (E. Foétida) para tratamiento de aguas residuales urbanas

3.1 Sistema Tohá

También conocido como lombrifiltro o biofiltro dinámico aerobio. Es un biofiltro que contiene lombrices, a través del cual se hace pasar el agua residual. El lombrifiltro abarca cuatro capas de varios materiales. La capa superior reside el material orgánico con un gran número de microorganismos y lombrices (Eisenia Foétida) especialmente, las cuales absorben y digieren la materia orgánica dejando el agua sin su principal contaminante (Arango Laws, 2003, p. 38).

3.1.1 Historia

En la historia de esta tecnología se basa en la permanente necesidad de hallar tecnologías de tratamiento no convencional, que efectúen con las normativas de descarga con mínimos costos de operación que hagan factible su ejecución, razón por la cual muchos investigadores han dedicado gran esfuerzo y dedicación con este fin. Que en efecto de los trabajos ejecutados en EE.UU. a fines de la década de los 70, se manifestó la conveniencia de utilizar a las lombrices en el proceso de depuración y estabilización de las aguas residuales domésticas e industriales. Las preliminares investigaciones se limitaron a utilizar las lombrices, no en el tratamiento de aguas, sino que en el tratamiento de lodos que resultaban de la depuración de las aguas (Salazar Miranda, 2005, p. 68).

De este modo, el investigador chileno, el Dr. José Tohá Castellá, recoge experiencias realizadas en la planta de Lufkin, Texas (1981) sobre el tratamiento de aguas residuales mediante lombricultura y emprende a experimentar con este sistema a partir del año 1986, naciendo de esta forma el Sistema Tohá (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003 citado por Salazar Miranda, 2005, p. 68).

En 1994, gracias al apoyo de FONDEF se edificó una planta experimental de tratamiento de aguas residuales en CEXAS Melipilla (perteneciente a EMOS), utilizando este ejemplo de tecnología desarrollada en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, para una población de 1000 personas (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003 citado por Salazar Miranda, 2005, p. 69).

3.1.2 Características

- La materia orgánica que queda retenida en el medio filtrante es removida por una población de microorganismos y las lombrices adheridas al medio, los que se encargan de degradar la materia orgánica que utilizan como fuente de alimento, energía para sus procesos metabólicos y una fracción que pasa a formar parte de su masa corporal (Salazar Miranda, 2005, p. 71).
- Las lombrices producen después digerir la materia orgánica el denominado humus de lombriz, que cada cierto tiempo puede extraerse y ser utilizado como abono orgánico para el suelo (Salazar Miranda, 2005, p. 71).
- No produce lodos inestables al degradarse la totalidad de sólidos orgánicos del agua residual, en su lugar se obtiene humus (Salazar Miranda, 2005, p. 71).
- El tratamiento biológico que se ejecuta en el lombrifiltro posee el carácter de tratamiento de tipo aeróbico, dado que la acción de la Eisenia Foétida ayuda a conservar la permeabilidad del lecho impidiendo la colmatación del mismo, debido a que las lombrices consumen el material orgánico retenido en el filtro integrándolo al suelo en forma de humus, cuya estructura granular de éste (humus) al ir produciéndose aumenta en forma gradual la porosidad del medio filtrante y facilitando la oxigenación, producto de las constantes excavaciones que realiza en el terreno, en forma de túneles y canales, a través de los movimientos migratorios de la lombriz (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003 citado por Salazar Miranda, 2005, p. 71).
- El alto índice de absorción del lombrifiltro, corresponde a los movimientos migratorios de la lombriz por lo que conlleva a la no producción de olores

desagradables y constantemente imposibilitando la proliferación de vectores como moscas y otros (Salazar Miranda, 2005, p. 71).

- Durante los periodos en que el sistema puede estar en descanso (por ejemplo, en conjuntos residenciales de ocupación estacional) la capacidad del mismo se conserva vigente ya que las lombrices cuentan con la reserva alimenticia del aserrín constituyente del filtro. Esto explica la capacidad del sistema de ser puesto en marcha en forma rápida y con los grados de eficiencia (Salazar Miranda, 2005, p. 72).
- Se necesita poco espacio, el agua residual de 5 personas requiere solo 1 mt.2 de biofiltro para su tratamiento. Posee bajos costos de inversión en obras civiles (Salazar Miranda, 2005, p. 72).
- Bajos costos operacionales, al poseer bajos requerimientos energéticos, ya que básicamente requiere energía eléctrica para activar las bombas de la planta elevadora y los equipos de desinfección (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003 citado por Salazar Miranda, 2005, p. 72).

3.1.3 Métodos de remoción

3.1.3.1 Físico

Según (Garkal et al. 2015 citado por Saboya, 2018, pág. 65), indican que el proceso de degradación de la materia orgánica o de los contaminantes sólidos, inicia cuando el agua residual es impulsado y rociada en la superficie del lombrifiltro, compuesto por las diferentes capas, sin embargo, el trabajo de depurar se halla en la parte superior del biofiltro donde se encuentra un alto número de lombrices y microorganismos. El agua residual escurre por el medio filtrante permaneciendo retenida la materia orgánica, todo esto para que las lombrices hagan un buen trabajo en la degradación de los contaminantes del agua residual, es primordial que el estrato esté con los parámetros adecuados resistibles para las lombrices, como son el pH, temperatura y humedad a las que están expuestas si estos parámetros tienen valores muy bajos o extremos pueden causar la muerte de las lombrices.

Asimismo, el medio filtrante efectúa una labor muy importante al igual que las lombrices, desde la antracita que puede ser una opción valiosa en el tratamiento hasta las piedras grandes sirven como filtradores, estos medios por naturaleza forman una especie biopelícula adherida al medio estas entran en contacto con las cargas orgánicas para el inicio del proceso de purificación. La comunidad biológica que se encuentra dentro del filtro, pertenece principalmente al reino protista, donde se encuentran: bacterias aeróbicas, anaeróbicas y facultativas, hongos, algas y protozoarios. Los microorganismos que predominan son las bacterias facultativas que son de gran ayuda para la degradación y remoción de la turbidez al igual que las lombrices (Oliveira, Alves, Campos, Ferreira, & Soares Costa, 2013 citado por Saboya, 2018, p. 66).

Además, las lombrices se encargan de los sólidos suspendidos siendo consumida, creando un proceso de oxidación y transformándolas en anhídrido carbónico y agua, y la otra parte se constituye en masa corporal de las lombrices y la otra es eliminada por las deyecciones; estas últimas constituyen el llamado humus de lombriz (Quinchel, 2015 citado por Saboya, 2018, p. 66).

3.1.3.2 Químico

El material filtrante de las capas de lombrifiltro juega un papel muy importante en el proceso de la nitrificación este proceso, normalmente, se llevan a cabo en un ambiente aerobio mediado por dos grupos de bacterias autótrofas quimiosintetizadoras. Las bacterias oxidantes del nitrógeno incluyen géneros como Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrosolobus y Nitrosovibrio. Aquellas oxidantes de nitritos comprenden géneros como Nitrobacter, Nitrococcus y Nitrospina. Estos organismos se fijan a medios filtrantes formando una biopelícula encargadas de la remoción del nitrógeno en el agua residual (Iván & Daury, 2017 citado por Saboya, 2018, p. 67).

Además, uno de los factores importantes en la nitrificación es la cantidad de materia orgánica, representada por la DQO y DBO, teniendo que ser baja, en este caso las lombrices cumplen una labor significativa debido a que influencia en la desnitrificación a través de su actividad de alimentación por la ingestión de materia orgánica disponible en el agua residual, así como indirectamente a través de la producción del derivado de cal para ser precisos (Wang & Luo, 2016 citado por Saboya, 2018, p. 67).

Wang, Luo, Zhang, & Zhen, 2011 citado por Saboya, (2018, p. 68) mencionan que la alcalinidad es un parámetro determinante para que el proceso de desnitrificación, se lleve a cabo en condiciones adecuadas. Los carbonatos representados por la alcalinidad son colaboradores para la producción de biomasa de bacterias nitrificantes para ello es muy importante que este se encuentre en valores de pH de 6.5 a 7.5, frente a ello las lombrices al ingerir la materia orgánica y excretar estas producen diminutas cantidades de cal, regulando el pH de manera significativa en el agua residual.

De esta forma, el aserrín también es útil para minimizar el nitrógeno en todas sus variedades en las aguas residuales, ya que actúa como un bioadsorbente; es importante indicar que las lombrices al interactuar con el aserrín ambos terminan interviniendo en la reducción del nitrógeno ya que principalmente el aserrín es la nutrición directa de las lombrices y estas acaban reduciendo en cantidades relevante al nitrógeno orgánico, siendo como un soporte en el tratamiento de aguas residuales mediante lombrifiltros u otros tratamientos (Zhao, y otros, 2012).

3.1.3.3 Biológico (Microbiológico)

Una de las capas filtrantes está constituida por aserrín que directamente es su alimento de la lombrices sin embargo, indirectamente cumple una función en la degradación de la materia orgánica, esto debido a la presencia de bacterias filamentosas como *Sphaerotilus Natans* y *Beggiatao* entre otras, que terminan

siendo un soporte para las bacterias nitrificantes y desnitrificantes estos microorganismos cumplen con la función principal de ejercer un control sobre las bacterias, también existe la presencia de bacterias las cuales estabilizan el agua residual siempre y cuando el pH sea entre 6. y 7.5 (Coronel, 2015 citado por Saboya, 2018, p. 68).

Asimismo, el material filtrante, crean una biopelícula adherida al medio estas entran en contacto con las aguas residuales para dar el inicio del proceso de purificación. La comunidad biológica que se encuentra dentro del filtro, pertenece principalmente al reino protista, donde se encuentran: bacterias aeróbicas y facultativas para el caso del lombrifiltro. Los microorganismos que predominan son las bacterias facultativas que son de gran ayuda para la degradación y remoción de la turbidez al igual que las lombrices. (Oliveira et al., 2013 citado por Saboya, 2018, pág. 69).

3.1.4 Descripción de materiales

Según Jiménez, (2016) citado por (Saboya, 2018, p. 64), el sistema está compuesto por 3 capas, así mismo recomienda que para el diseño del método de lombrifiltro se tienen que tener en cuenta los siguientes parámetros: caudal, velocidad del caudal, tiempo de retención hidráulico (TRH), profundidad, ancho, largo y altura del sistema; estos son parámetros que entran en el proceso de tratamiento y así reducir el grado de contaminación de las aguas residuales urbanas o rurales.

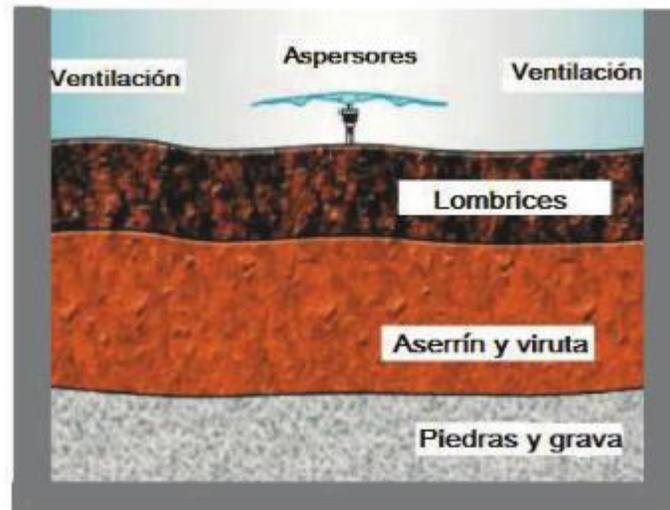


Figura 4. Capas del lombrifiltro (Saboya, 2018).

La primera capa está compuesta de aserrín o viruta (residuos de madera) en mezcla con las lombrices, cuyo espesor recomendable para un eficiente resultado es de 25 cm de altura según sea el caudal y cantidad de agua a tratar. Además, el aserrín tiene como fin fundamental servir de alimento a las lombrices en el eventual caso que la carga contaminante del afluente no sea suficiente. La segunda capa está constituida por ripio o grava de distintas granulometrías, es aconsejable utilizar piedras trituradas del tipo antracita ya que esta facilita la creación rápida de biopelícula (ecosistema microbiano organizado, conformado por uno o varios microorganismos) que se responsabiliza mediante su consumo a la materia orgánica del agua que no fue tratada en primera estancia. Finalmente, la tercera capa está compuesta de piedras enteras cumple la función de soporte y también de filtro, al ser de tamaño enteros es recomendable una altura de 10 centímetros como máximo, las piedras de mayor tamaño van en la parte inferior esto por el peso y las de menor en la parte superior (Ramón , León, & Castillo, 2015).

En la parte inferior del sistema, mayormente consiste en una losa de concreto con cierta pendiente (aproximadamente de un 1%) o el uso de otro tipo de materia, esto para que fluya el agua hacia un estanque o vertida directamente a un cuerpo de agua.

En el área interna del lombrifiltro se instalan tubos de PVC, los cuales van en forma vertical, sujetadas al concreto y la parte superior sobresale (Figura 5) del lecho filtrante para la correcta aireación del tratamiento (Tapia & Baraña, 2004 citado por Saboya, 2018, pág. 65).



Figura 5. Aplicación de las tuberías para la aeración (Saboya, 2018).

3.1.5 Diseño de un filtro biológico (E. foétida)

Este parámetro para el diseño del lombrifiltro se basa en la realización de un balance de masas que considera: el número de lombrices que puede cohabitar por unidad de área, cantidad de materia orgánica que éstas son capaces de digerir y la tasa máxima de riego que puede soportar el lecho para evitar la muerte de lombrices por falta de oxígeno, que corresponde a $1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003 citado por Salazar Miranda, 2005, p. 73).

De esta manera se considera para el diseño:

$$T_{\text{Riego}} = \frac{Q}{A} \leq 1 \text{ m}^3 / \text{m}^2 / \text{día}$$

Figura 6. formula de diseño

Conocido el caudal de diseño, y asumiendo una tasa de riego se puede determinar el área requerida para el tratamiento (Salazar Miranda, 2005, p. 73).

3.1.6 Funcionamiento

El efluente, a través de un sistema de regadío, atraviesa por los lechos filtrantes quedando retenida la materia orgánica en estos. La materia orgánica es consumida por las lombrices convirtiéndose esta en humus y materia corporal de las mismas. Conjuntamente con las lombrices, se genera una rica flora bacteriana, que también consume materia orgánica (Huiza & Ordoñez , 2018, p. 28).

3.1.7 Mantenimiento del filtro biológico

Según la A.V.F. Ingeniería Ambiental para gestionar el correcto funcionamiento del sistema del sistema Tohá, se pretende ejecutar las siguientes labores de mantención:

- Extracción de sólidos retenidos en el canastillo, se recomienda al menos una o 2 veces a la semana, pero en caso de ser necesario debe aumentarse la frecuencia.
- Se debe realizar el horqueteo de la viruta superficial del lecho, para mejorar la permeabilidad de éste evitando aposamiento de aguas, se recomienda realizarlo al menos una vez por semana, pero en caso de ser necesario debe incrementarse la frecuencia.
- Para el correcto funcionamiento del lombrifiltro, el sustrato debe estar en un estado de saturación, sin llegar a tener aposamientos superficiales, los cuales no son recomendados debido a que la lombriz se aleja de estas zonas, haciendo perder la homogeneidad del sistema. Este estado de saturación permanente es logrado a través de la descarga, a tasas controladas, de aguas residuales.
- Desmalezar el lecho al detectarse el crecimiento de algún tipo de plantas
- Con una frecuencia de 4 meses debe realizarse la adición de viruta al lecho, ante la disminución de este estrato debido al fraccionamiento alcanzado.

- Limpieza periódica de regadores para garantizar en todo momento una uniformidad de riego en la superficie (Salazar Miranda, 2005, p. 78-79).

3.1.8 Eficiencia del sistema

“Según estudios anteriores el sistema presenta una alta eficiencia en la eliminación de los parámetros contaminantes del agua, el efluente resultante cuenta con una disminución en los coliformes totales, la DBO5, en los sólidos totales, los sólidos suspendidos volátiles, del nitrógeno y del fósforo (tabla 6)” (Manrique & Piñeros, 2016, p. 20).

*Tabla
6. Parámetros de eficiencia*

Parámetros	Eficiencia
Coliformes fecales	99%
DBO5	95%
Sólidos totales	95%
Sólidos suspendidos	93%
Nitrógeno total	60% a 80%
Aceites y grasas	80%
Fósforo total	60 % a 70%

Fuente: (Manrique & Piñeros, 2016).

3.1.9 Eficiencia de los organismos patógenos

Estudios realizados en el Centro de Estudios Peruanos de Ingeniería Sanitaria (CEPIS) mencionan que las eficiencias de remoción de patógenos a través de diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales son: los biofiltros o lombrifiltro ocupan una eficiencia de 0-2 para bacterias y helmintos; y de 0-1 para virus y quistes, en una escala logarítmica de 0-4 como se muestra en la Tabla (Sáenz, 2012 citado por Saboya, 2018, p. 74).

Tabla 7.
Eliminación de microorganismos en varios sistemas de empleo de aguas residuales

Proceso de Tratamiento	Eliminación (unidades logarítmicas 10)			
	Bacterias	Helmintos	Virus	Quistes
Lodo activado	0-2	0-2	0-1	0-1
Lombrifiltro o Biofiltración	0-2	0-2	0-1	0-1
Laguna ventilada	1_2	1	1_2	0-1
Zanja de oxidación	1_2	0-2	1_2	0-1
Lagunas facultativas	1_6	1_3	1_4	1_4

Fuentes: (Pérez, 2010 citado por Saboya, 2018).

3.1.10 Ejecución para diferentes poblaciones

El Sistema Tohá, es un método de tratamiento de aguas residuales que se está usando en sectores rurales chilenos, cuya aplicación a sido de un 90% en reemplazo de los sistemas sépticos (Fuente: A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003 citado por Salazar Miranda, 2005).

- Se ha implementado en el tratamiento de aguas residuales de:
- Residencias privadas.
- Escuelas.
- Comunidades rurales.
- Balnearios, condominios, campamentos, etc.

Cabe destacar, que también ha sido aplicado en el tratamiento de riles provenientes de:

- Mataderos.
- Empresas frutícolas.
- Empresa vinícola.
- En general toda empresa del área agro-alimenticia.
- Poblaciones menores a 30.000 habitantes

3.1.11 Ventajas

Diferentes ventajas:

- No produce lodos.
- El lecho filtrante no se impermeabiliza. Cuya característica se debe principalmente a la acción de las lombrices que, con su movimiento, crean túneles que aseguran en todo momento la alta permeabilidad del filtro.
- Los materiales sólidos orgánicos presentes en el agua residual, que colmatan o tapan otros filtros, en este caso son digeridos por las lombrices.
- Diseño modular, esto es debido a su facilidad de ser dimensionado a cualquier escala mediante módulos.
- El sistema es ecológico, ya que en el proceso no se usan aditivos químicos ni se producen residuos contaminantes (lodos), lo que redonda en muy poco consumo de energía.
- La operación del sistema es simple y semejante a prácticas agrícolas.
- No genera olores.
- Produce un excelente abono agrícola, cuyo uso incluso en forma excesiva no daña ni quema las plantas como es el caso de los fertilizantes químicos (Quinchel 2015 citado por (Huiza & Ordoñez , 2018, p. 30)).

3.1.12 Desventajas

Según (Salazar Miranda, 2005):

- Requiere de grandes volúmenes de reactor para su implementación.
- No resiste periodos sin alimentación- Necesidad de suministrar nutrientes.
- Requiere de un proceso de adaptación -Arranque complejo.
- No soporta variaciones grandes de carga ni caudal.
- No es recomendable para tratar grandes volúmenes de efluente.
- En climas extremadamente fríos puede afectar en la proliferación de las lombrices en el lecho.

- Necesidad de horqueteo que complica su aplicación en grandes instalaciones.
- Necesidad de incorporar viruta de madera cada 4 meses para no alterar las bondades de su tratamiento.

Capítulo IV

4 Resultados de estudio

4.1 Antecedentes

En el 2015 según (**Ramón, León, & Castillo, 2015**), en su investigación sobre **“Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie Eisenia foétida”**. Pamplona, Colombia. Que utilizaron como base teórica el sistema Tohá en donde tuvieron una remoción de materia orgánica del 92.1% a partir de la DQO y relación a los coliformes totales y fecales con una eficiencia del 92%. La remoción de todo el sistema fue de un 89.5% por consiguiente concluye que las aguas residuales utilizando el lombrifiltro es una alternativa viable y estable lo que facilita su manejo con fines de reusó.

GALICIA, Alejandro (2016) en su publicación **“Method and system for the treatment of waste effluents contaminated by metals”**. México. Creó un sistema de tratamiento incluyendo la biotecnología para poder remover níquel de las aguas residuales contaminadas. Esta biotecnología incluye usar recursos naturales, como es la lombriz *Eisenia foétida*, esta especie puede añadir a su dieta metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni y Zn) por dicha característica se utilizó a estas lombrices en esta biotecnología. Para poder realizar este sistema se ejecutó un pequeño experimento previo con el propósito de obtener los índices de mortandad de esta especie, previo al experimento se alimentó a las lombrices con materia orgánica, luego se determinó la dosis adecuada que se le debe dar a esta especie para no producir su muerte, obteniendo como resultado que 5 gotas/min estas pueden remover 199 ppm de níquel y que 20 gotas/min solo 176 ppm. Con los resultados obtenidos se inicia el sistema tratando aguas contaminadas con 837 ppm de Níquel. El proceso empieza filtrando los sólidos de mayor tamaño, luego se deja reposar por 24 horas en un decantador, la parte decantada fue recuperada en un tanque. Y la fase

líquida se traslada a un evaporador/condensador con una temperatura de 98°C, la parte evaporada se desplaza en forma de zigzag a unas celdas rectangulares, donde se encuentran 20 lombrices. El tratamiento del agua mediante esta especie se realiza reteniéndola 48 horas, reduciendo el mayor porcentaje de la concentración de níquel. Llegando a la conclusión de que la especie *Eisenia foétida* puede ser utilizada para remover el níquel de las aguas contaminadas (Mitma , 2017, pág. 13).

(Acuña & Reyes , 2017) en su investigación, “**Eficiencia de lumbricus terrestris y eisenia foetida en el tratamiento de las aguas residuales en la ciudad de bagua-amazonas, 2015. Bagua** , se concluye que los parámetros físicos-químicos y microbiológicos que removieron los 2 tratamientos (lumbricus terrestris y eisenia foetida) son: CE: conductividad eléctrica 47,23%, temperatura 4,99%, sulfatos 78,33%, fosforo total 51,93%, nitratos 67,52%, nitrógeno total 68,04%, aceite y grasas 29,98%, solidos suspendidos totales 31,36%, DBO5 94,51%, DQO 94,96%, coliformes totales 90,18%, coliformes fecales 91,36%, E. Coli 98,80% y el pH 2,52%, sólidos disueltos totales 22,76% aumentaron. Teniendo en la eficiencia de remoción de contaminantes de las aguas residuales de esta ciudad (Bagua) al compararse con las dos especies la **E. Foétida** obtuvo una remoción promedio del 73%, mientras que la **L. Terrestris** lo hizo en un 63%, lo que se demuestra en esta investigación que la especie **E. Foétida** es más eficiente para la remoción de contaminantes.

En el **Instituto de Investigaciones Hidráulicas** ubicado en la ciudad de **Nanjing, China, (2016)**, ejecutaron un estudio que tuvo como objetivo “**Evaluar la eficiencia de la lombriz Eisenia foétida en un humedal para la purificación de las aguas residuales**”, el trabajo consistió en la construcción del humedal con lechos filtrantes con plantaciones de caña, otro con lombriz y una muestra en blanco para la comparación de los resultados. Después del tratamiento los resultados del estudio fueron: para el nitrógeno total 73%, DQO 88% y fosforo total fue de 93%. Concluyeron que la calidad de sus aguas después del tratamiento es eficaz, encontrándose dentro de sus normas respectivas, demostrando una vez más que las

lombrices cumplen una función muy importante en el tratamiento de las aguas residuales (Jin, Li, & Li, 2016 citado por Saboya, 2018, pág. 33).

En Bogotá, Colombia, en el año (2016) se ejecutó un trabajo cuyo objetivo fue evaluar el tratamiento de depuración biológica con lombrices de tierra en aguas residuales procedentes de industrias lácteas a nivel laboratorio, el estudio se fundamentó principalmente en el uso de un lombrifiltro en comparación con un geofiltro (sin lombrices), apoyado mediante lechos filtrantes. De este modo tras el tratamiento los resultados obtenidos: DQO 80%, de reducción en el lombrifiltro y de 55.18% en el geofiltro, el DBO no tuvo reducción respecto a la muestra sin tratar, el pH alcanzo un valor de 4.56. Concluyendo que el sistema de lombrifiltro es eficaz para tratamiento de aguas residuales domésticas (**Manrique & Piñeros, 2016**).

Manyuchi, Kadzungura, & Boka (2017) en la ciudad de Zimbabue, realizaron una investigación con lombrices de la especie *Eisenia foétida*, con el objetivo de tratar las aguas residuales para su viable uso en el riego de vegetales, utilizaron 500 lombrices durante un periodo de 5 días, con el apoyo de un filtro biológico para disminuir los contaminantes del agua residual. Los resultados de remoción fueron: 98% en la DBO5, 70% en la DQO, 95% sólidos disueltos totales y solubles y turbidez en un 98%. Llegando a la conclusión que el agua tratada es adecuada para el uso en el riego según su normativa del lugar (Saboya, 2018, pág. 33).

Según (**Caicedo Campoverde, 2017**) en la ciudad de Riobamba, Ecuador, se experimento un “**Diseño, construcción y evaluación de un prototipo biológico compuesto de eisenia fetida y agave filifera, para el tratamiento de aguas residuales en la granja del ministerio de agricultura, ganaderia, acuacultura y pesca, riobamba 2015**”, en donde su objetivo fue reutilizar el agua residual para actividades agricolas o afines. Se diseño un prototipo biologico compuesto por *E. foetida* y *agave filifera* que determino una degradacion de coliformes fecales 94,4%, DBO 87,7% y una DQO 92,2% en donde nos indica que el prototipo es muy eficiente.

En la **“Eficiencia del tratamiento de aguas residuales utilizando lombrices californianas (*Eisenia foétida*) y el jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*), Chachapoyas, 2018”**. Según **(Reyes Farje & Morales Rojas, 2019)** en el cual presentan un estudio experimental acerca de la capacidad depuradora de nutrientes presentes en las aguas residuales por medio de las lombrices californianas y jacinto acuático en donde se concluye que las lombrices californianas son más eficientes que el Jacinto acuático en remoción de la materia orgánica al reducir el DBO5 en un intervalo de 15 días de 12.8 mg/L de O2 a los 15 días bajo 4.62 mg/L de O2 **(63,9 %)** y en DQO 46.23 bajo a 0.07 mg/L de O2 **(99,8 %)** por otro lado el oxígeno disuelto también sube considerablemente de 1.54 a 3. Mientras tanto el jancito acuático disminuyo de 12.8 mg/L DBO5 en condiciones normales bajo a 11.10 mg/L de O2 **(13,28 %)** y el DQO de 46.23 mg/L de O2 bajo 0.07 mg/L de O2 **(99,8 5)**.

(Mitma , 2017) en ese año hizo un estudio sobre el **“Efecto Del Sistema De Lombrifiltro En La Depuración De DBO5 Y DQO De Las Aguas Residuales Domésticas Del Distrito De Moche”**. Trujillo, donde su objetivo general fue evaluar el efecto del caudal en el sistema de Lombrifiltro para la depuración de DBO5 y DQO de las aguas residuales domésticas del Distrito de Moche en que el sistema de Lombrifiltro logro un efecto de remoción de 83,87% en DBO5 y 72,43% en DQO. A su vez concluye que cada lombriz californiana puede consumir 0.17% de DBO y 0.15% de DQO en un día.

“Eficiencia De Lombrifiltro Implementando La Técnica De Pared Caliente En El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas Del Centro Poblado De Huaylacucho Del Distrito De Huancavelica-2018”, en donde sus autores **(Huiza & Ordoñez , 2018)**, implementaron la tecnica de pared caliente en la remocion de coliformes termotolerantes y el lombrifiltro. Se obtuvo un promedio del 58% para DBO5, un 50% para coliformes termotolerantes y un pH entre (6.5-8.5), que su fin concluye que la remocion para es poblado es alto.

(Vizcaíno Mendoza & Fuentes Molina, 2016) en la Universidad de la Guajira, Riohacha, en su investigación “Efectos de *E. Foétida* y *E. Crassipes* en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes domésticos”, a una concentración inicial de oxígeno disuelto fue 0,98 mg O₂/l. y *E. Foétida* aumentó esta concentración a 3,17 mg O₂/l. quedando comprobado al igual que en otras investigaciones, el oxígeno disuelto inicial aumentó con la *E. Foétida*.

En el 2012 (Domínguez, y otros, 2012) en su publicación sobre “Effect of the Heavy Metals Cu, Ni, Cd and Zn on the Growth and Reproduction of Epigeic Earthworms (*E. fetida*) during the Vermistabilization of Municipal Sewage Sludge”. Altamira, Tamaulipas, Mexico. Con el objetivo de obtener un sistema de compostaje eficiente en el uso de la lombriz *Eisenia fetida*, Para eliminar los metales pesados (Cu, Cd, Ni y Zn) contenida en los lodos no estabilizada de aguas residuales de una planta de aguas residuales en donde concluyen que este trabajo muestra que una relación de estiércol de vaca / lodos de depuradora adecuada (3: 1), el cual se puede utilizar como un compostaje eficiente para eliminar los metales pesados contenidos en los lodos de la planta de aguas residuales que no son estabiizados. Algunos impactos significativos de la cantidad de metales pesados presentes en el sustrato en un sistema vermicompostaje, incluyendo la acumulación en los gusanos, se observaron reducciones en la actividad microbiana así como en el número de capullos y juveniles.

Discusión

En estos últimos 5 años los estudios hechos para los filtros biológicos a partir de la lombriz californiana *E. Foétida* ha sido muy eficiente para la remoción de materia orgánica para aguas residuales urbanas, en donde se hace un promedio con 8 investigaciones entre ellas hay tesis, artículos de revistas, etc. En donde los parámetros como la DQO tiene un porcentaje de remoción entre el 85-95 %, DBO5 85-95 %, coliformes fecales y totales del 90-99 %, esto con respecto a los parámetros físico que a nivel nacional e internacional varían. Con respecto a (Salazar Miranda, 2005) dice que la eficiencia del sistema tohá o un lombrifiltro en DBO es del 95 %, DQO del 95 %, solidos suspendidos volatiles 93%, 80 % para grasas y aceites, 60-80 % nitrogeno total asi mismo para fosforo total y coliformes fecales del 99 %. Tambien la diferencia con los metales pesados es que las lombrices californianas lo pueden añadir a su dieta para asi ser removidos.

Según la discusión que obtuvo (Mitma , 2017) nos da a conocer que (Salazar Miranda, 2005) nos menciona que el humus es una fuente de bacterias y en conjunto con las lombrices logran remover la materia orgánica presente en el agua residual, a diferencia del sustrato que aumenta el DBO5, además el humus se debe aplicar de acuerdo al tipo de agua y la cantidad de materia orgánica que contiene. Ya que (Mitma, 2017) en el proyecto aplicó 1 cm de humus y 9 cm de aserrín, ya que el agua domestica a diferencia del agua industrial presenta menos concentración de materia orgánica.

A diferencia de las poblaciones rurales, escuelas, poblaciones agropecuarias o crianza de animales para su consumo, es donde se utiliza más este sistema ya que a mayor población mayor ser a el área para su tratamiento.

Conclusiones

Al analizar las diferentes investigaciones para la remoción de materia orgánica es muy eficiente para degradar DBO, DQO, coliformes fecales, coliformes totales, sólidos suspendidos totales y volátiles, entre otros lo que conlleva a que este tratamiento es muy útil al volver a descargar el agua ya tratada a las fuentes hídricas.

El porcentaje de degradación del lombrifiltro se basa en los últimos 5 años en la revisión de varias investigaciones en donde su DBO 85-95, DQO 85-95 %, coliformes fecales 90-99 %, coliformes totales 90-99 %, sólidos suspendidos totales y volátiles 93 %.

A diferencia de los metales pesados las lombrices pueden degradar cierta cantidad debido a que si hay un exceso de metales pesados en el caudal de las aguas residuales la población de las lombrices puede disminuir al alto contenido del mismo. Según (Domínguez, y otros, 2012) Algunos impactos significativos de la cantidad de metales pesados presentes en el sustrato en un sistema vermicompostaje, incluyendo la acumulación en los gusanos, se observaron reducciones en la actividad microbiana así como en el número de capullos y juveniles.

El sistema Tohá es una biotecnología aplicada para el tratamiento de aguas residuales, desde los inicios de este proyecto hasta hoy en día la remoción ha sido muy aceptable para las leyes ambientales con respecto a aguas residuales y vertimientos puntuales a cuerpos de aguas en la resolución 0631 de 2015 de Colombia. A diferencia de otros países donde se desarrolla esta tecnología es sostenible utilizarla para pequeñas poblaciones o empresas agropecuarias, agro-alimenticias, industriales entre otras.

La lombriz californiana *E. foétida* es la mejor al momento de trabajar con la depuración de aguas residuales es así que la utilizan para su consumo al transformar todo tipo de material orgánico en humus aun así en cerne y harina de lombriz. A su vez se adapta a su manipulación como una lombriz doméstica debido a su rusticidad, tolerancia a los factores ambientales, alta tasa de crecimiento, alta eficiencia productiva y a su fácil manejo.

Recomendaciones

Al mirar los diferentes tratamientos de aguas residuales se puede decir que cada vez que la tecnología avanza hay nuevas investigaciones para resolver, así mismo que pasa el tiempo la contaminación aumenta que para los próximos años los estudios se tendrán que actualizar y diseñar para el cambio que se está teniendo a nivel mundial.

La aplicación del lombrifiltro en aguas residuales permite caudales de 4000 m³/día, lo que equivale a poblaciones de 20.000 a 30.000 habitantes aproximadamente. Para caudales mayores a 4000 m³/día demandarían extensas superficies de tierra por lo que no sería muy recomendable. Para 30.000 personas se tendría que considerar un módulo de 9.600 m² (terreno de 2 Hectáreas para implementar el sistema de tratamiento). No hay limitaciones por condiciones climáticas como precipitaciones. En los casos en que las precipitaciones sean considerables se instala un techo sobre el sistema de lombrifiltro todo esto según la comisión nacional del medio ambiente de Chile [CONAMA].

Las recomendaciones son necesarias para mejoras del estudio así tienen en cuenta algunos autores:

En estudios futuros se sugiere que el caudal tenga un sistema de control adecuado para que este no varíe con la altura del tanque de alimentación y que garantice la constancia del mismo pues la humedad depende del caudal y un aumento de este no es beneficioso para el crecimiento de la lombriz (Manrique & Piñeros, 2016).

El pH es un parámetro que debe ser controlado con un pretratamiento para así asegurar las condiciones necesarias de supervivencia de las lombrices y un mejor rendimiento de la población microbiana (Manrique & Piñeros, 2016).

Hay que tener en cuenta un tratamiento donde debe contarse con un sistema de rejillas y una trampa de grasas y aceites antes de que el afluente pase por el lombrifiltro para así disminuir algunos sólidos de mayor tamaño y también disminuir los aceites y grasas (Manrique & Piñeros, 2016).

Es recomendable que se evalúe el efecto de la inclusión de aireación en el tratamiento para la mejora del proceso teniendo en cuenta que los microorganismos son seres aeróbicos que necesitan

del aire y a la ausencia del aire tiene como consecuencia la muerte de ellos (Manrique & Piñeros, 2016).

Mejorar el diseño del biofiltro para que se facilite el proceso de desinfección se sugiere hacer una cámara de desinfección con rayos UV para la reducción de microorganismos (Acuña & Reyes , 2017).

Se recomienda usar aserrín de diferentes granulometrías para una mejor retención de materia orgánica (Mitma , 2017).

Que las lombrices a utilizar sean de igual tamaño y que su tiempo de vida sea adulta para que puedan consumir mejor la materia orgánica retenida en el filtro (Mitma , 2017).

Las tuberías de ventilación, todas deberían ser hacia afuera para obtener una mejor aireación en el lombrifiltro (Huiza & Ordoñez , 2018).

Es muy importante la consideración de la temperatura ambiente, debido a que este afecta directamente a las lombrices, es recomendable una temperatura de entre 20 y 25°C”, para que no altere en la remoción de contaminantes del agua residual (Saboya, 2018).

efectuar lavados periódicos al lecho filtrante del lombrifiltro para evitar la colmatación, y la aportación de sales a los procesos. Además de la constante limpieza de las excretas de las lombrices para impedir el aumento de la turbidez del agua (Saboya, 2018).

Referencias

- Arango Laws, J. E. (2003). *Evaluación ambiental del sistema Tohá en la remoción de salmonella en aguas servidas domésticas*. (Tesis Maestría en Gestión y Planificación Ambiental). Universidad de Chile, Departamento de Postgrado y Postítulo, Santiago.
- Zhao, Y. J., Yan, C., Li, Y. L., Li, J. H., Yang, M., Nie, E., . . . Luo, X. Z. (2012). Effect of C/N ratios on the performance of earthworm eco-filter for treatment of synthetic domestic sewage. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(9), 4049–4059.
- Acuña, J. E., & Reyes, J. J. (2017). *Eficiencia de lumbricus terrestris y eisenia foetida en el tratamiento de las aguas residuales en la ciudad de bagua-amazonas, 2015*. (Tesis Pregrado en ingeniería Ambiental). Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Bagua.
- Arcos, M. P., Ávila, S. L., Estupiñán, S. M., & Gómez, A. C. (2005). Indicadores microbiológicos de contaminación de las fuentes de agua. *NOVA*, 3(4), 69-79.
- Bacilio Morocho, L. V. (2016). *Influencia del lodo seco PTAR Covicorti-Trujillo en estiércol bovino para la obtención de humus orgánico, usando lombriz Roja Californiana*. (Tesis Pregrado en Ingeniería Ambiental). Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Trujillo.
- Barón Lopez, S. G. (2011). *Política Distrital de Salud Ambiental para Bogotá D.C. (2011-2023), Documento Técnico Línea de Intervención Calidad de Agua y Saneamiento Básico*. Bogotá D.C.: Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Secretaría Distrital de Salud, Secretaría Distrital de Ambiente.
- Caicedo Campoverde, J. A. (2017). *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo biológico compuesto de eisenia fetida y agave filifera, para el tratamiento de aguas residuales en la granja del ministerio de agricultura, ganadería, acuacultura y pesca, riobamba 2015*. (Tesis Pregrado en ingeniería en Biotecnología Ambiental). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba.
- Cardoso, L., Ramírez, E., & Garzón, M. (2011). *Vermifiltración Para Tratamiento De Aguas Residuales Industriales Y Municipales*. (Proyecto). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Mexico.

- Caviedes, D. I., Muñoz, R. A., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. *Revistas Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90.
- Claros Bedoya, J. A. (2012). *Estudio del Proceso de Nitrificación y Desnitrificación vía Nitrito para el Tratamiento Biológico de Corrientes de Agua Residual con Alta Carga de Nitrógeno Amoniacal*. (tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente,.
- Colombia. Congreso de la República. (2015). *Resolución 631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. Bogotá: Diario Oficial.
- Domínguez, M. A., Sánchez, Z. E., Torres, A. M., Negrete, M. L., Conde, E., & Flores, A. (2012). Effect of the Heavy Metals Cu, Ni, Cd and Zn on the Growth and Reproduction of Epigeic Earthworms (*E. fetida*) during the Vermistabilization of Municipal Sewage Sludge. *Water Air Soil Pollut*, 223(2), 915-931.
- Gil, H. A., Cisneros, J. M., Dante, J., Plevich, J. O., & Sanchez, A. R. (2013). Tecnologías verdes para el aprovechamiento de aguas residuales urbanas: análisis económico. *Ambiente & Água -An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(3), 119-128.
- González, A., Martín, A., & Figueroa, R. (2006). Tecnologías de Tratamiento y Desinfección de Agua para uso y Consumo Humano. *Researchgate*, 1-17.
- Huertas, F. N., & Sanchez, C. A. (2009). *Seguimineto de las Descargas de Aguas Residuales del Sistema de Alcantarillado sobre Canales y Quebradas en Bogotá: Caso Río Arzobispo*. (Tesis Pregrado en ingeniería Civil). Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería, Bogotá.
- Huiza, J. K., & Ordoñez, N. G. (2018). *Eficiencia De Lombrifiltro Implementando La Técnica De Pared Caliente En El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas Del Centro Poblado De Huaylacucho Del Distrito De Huancavelica-2018*. (Tesis Pregrago en Ingeniería Ambiental y sanitaria). Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de ciencias de ingeniería, Huancavelica.
- Juárez Uribe, R. A. (2010). *Reciclaje de Lodos Residuales de la Industria del Papel Mediante Lombricultura Utilizando la Especie "Lombriz Roja Californiana" Eisenia Foétida*. (Tesis

Magister en Scientiae). Universidad Nacional Agraria la Molina, Escuela de Postgrado Maestría en Ciencias Ambientales, Lima-Peru.

Lima Coronel, J. D. (2016). *Diseño, Implementación y Evaluación de un Sistema de Biofiltración con Lombrices (Eisenia FOETIDA) para el Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de la Cría de Cerdos en la Propiedad de la Familia Lima Ubicada en el Barrio Playas la Florida*. (Tesis Pregrado en Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente). Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Zamora.

Lizarazo, J. M., & Orjuela, M. I. (2013). *Sistemas de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia*. (Monografía Especialización en Administración en Salud Pública), Universidad Nacional de Colombia, Facultad de medicina, Bogotá.

López, C., Ruelas, R. D., Sañudo, R. R., Armenta, C., & Félix, J. A. (2013). Influencia de diferentes sustratos orgánicos en la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*). *TECNOCIENCIAS Chihuahua*, 7(2), 81-87.

Manrique, E. P., & Piñeros, J. (2016). *Evaluación del Sistema de Depuración Biológica a partir de Lombrices de Tierra (Eisenia Foetida) en Aguas Residuales Procedentes de Industrias Lácteas a nivel Laboratorio*. (Tesis Pregrado en Ingeniería química). Fundación Universidad de América, Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C.

Mitma, Y. I. (2017). *Efecto Del Sistema De Lombrifiltro En La Depuración De DBO5 Y DQO De Las Aguas Residuales Domésticas Del Distrito De Moche*. (Tesis Pregrado en Ingeniería Ambiental). Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Trujillo.

Ramón, J. A., León, J. A., & Castillo, N. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *MUTIS*, 5(1), 46-54.

Reyes Farje, J. F., & Morales Rojas, E. (2019). Eficiencia del tratamiento de aguas residuales utilizando lombrices californianas (*Eisenia foetida*) y el jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*), Chachapoyas, 2018. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2(1), 33-36.

Reyes Marambio, M. C. (2016). *Valorización Económica de Humus Generado en el Proceso de Tratamiento de RILES de la Empresa Agrofoods Central Valley Chile S.A.* (Tesis Pregrado

- en Ingeniería Civil Industrial). Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Industrias, Santiago de Chile.
- Rodríguez, J. P., García-Ubaque, C. A., & García-Ubaque, J. C. (2016). Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia. *Revista Salud Pública*, 18(5), 738-345.
- Rojas, R. (2002). *Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud.
- Romero Rojas, J. A. (2000). *Tratamientos de Aguas Residuales, Teoría y Principios de Diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ruiz, I., Álvarez, J. A., & Soto, M. (2014). El Potencial de la Digestión Anaerobia en el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas y Efluentes de Baja Carga Orgánica. *ResearchGate*.
- Saboya, X. (2018). *Eficiencia del método de lombrifiltro en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas en el Distrito de Chachapoyas-Amazonas*. (Tesis Inédita de Licenciatura). Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Lima.
- Salas, C. G. (2010). Tratamiento por Oxidación Avanzada (Reacción Fenton) de Aguas Residuales de la Industria Textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 13(1), 30-38.
- Salazar Miranda, P. I. (2005). *Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales*. (Tesis Pregrado en Constructor Civil). Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Chile.
- Sinha, R. K., Bharambe, G., & Chaudhari, U. (2008). Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *The Environmentalist*, 28(4), 409–420.
- Soto, E., Miranda, R. C., Sosa, C. A., & Loredó, J. A. (2006). *Optimización del Proceso de Remoción de Metales Pesados de Agua Residual de la Industria Galvánica por Precipitación Química*. *Información tecnológica*, 17(2), 33-42. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000200006>
- Vizcaíno Mendoza, L., & Fuentes Molina, N. (2016). Efectos de *E. Foetida* y *E. Crassipes* en la remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes en efluentes domésticos. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(1), 189-198.