

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“TRATAMIENTO DE LODOS EN EXCESO DE LA
PTAR SAN PEDRO DE ANCÓN MEDIANTE LA
LOMBRICULTURA UTILIZANDO EISENIA FOETIDA”**

PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO SANITARIO

ELABORADO POR:

IVAN ALEJANDRO CASQUINO TIPULA

ASESOR:

DRA. ROSA ELENA YAYA BEAS

LIMA - PERÚ

2022

DEDICATORIA

A mi familia, a quienes tengo en más alto aprecio, especialmente a mi madre por las enseñanzas que me dejó.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que me apoyaron en la realización de esta investigación de manera desinteresada y con una gran solidaridad, me brindaron la oportunidad, me mostraron alternativas, me prestaron su tiempo, ampliaron mi conocimiento y mi perspectiva. Manifiesto mi gratitud a Milagritos Reyes, Tomas Sosa, Manuel Ara, Jorge Quispe, Marcos Solano, Álvaro Manosalva, Paul Mejía, Juan Juscamayta y José Bobadilla que facilitaron en gran medida la preparación de mi investigación. Y, desde luego, a los profesores por su valiosa retroalimentación, en especial al Ing. Otto Rosasco por mostrarnos el camino de la ingeniería sanitaria.

RESUMEN

Se ha realizado esta tesis de investigación en la PTAR San Pedro de Ancón en el tratamiento de sus lodos en exceso, provenientes del purgado del tratamiento de lodos activados, mediante la lombricultura, utilizando la lombriz roja californiana *Eisenia foetida* como digestor y estabilizador. El objetivo de esta tesis es determinar la eficiencia de remoción del lodo residual midiendo la reducción de parámetros de sólidos volátiles, coliformes fecales, salmonella spp y huevos de helmintos; luego de 22 semanas de monitoreo; las primeras siete semanas correspondieron a una primera etapa de acondicionamiento y las restantes a una segunda etapa de tratamiento, se llega a la conclusión que la lombricultura con *Eisenia foetida* es un tratamiento eficiente en la remoción de estos parámetros, alcanzando reducciones del 9.49% en sólidos volátiles, 97.82% en coliformes fecales, 98.64% en salmonella spp y 96.12% en huevos de helmintos. La lombricultura es una opción viable si el lodo cumple con las características de desarrollo de la lombriz. Se informa acerca de sus posibles aplicaciones de acuerdo a la categoría según la normatividad peruana en el reúso de biosólidos. Finalmente se muestra una aplicación del humus producido en la transformación de lodo residual, como un mejorador de suelos, en las áreas verdes del cementerio Parque del Recuerdo ubicado frente a la PTAR en Ancón.

ABSTRACT

This research thesis has been carried out at the WWTP San Pedro de Ancon in the treatment of its excess sludge, coming from the activated sludge treatment purge, by means of vermiculture, using the Californian red worm *Eisenia foetida* as digester and stabilizer. The objective of this thesis is to determine the removal efficiency of the residual sludge by measuring the reduction of parameters of volatile solids, fecal coliforms, salmonella spp and helminth eggs; after 22 weeks of monitoring; the first seven weeks corresponded to a first conditioning stage and the remaining weeks to a second stage of treatment, it is concluded that vermiculture with *Eisenia foetida* is an efficient treatment in the removal of these parameters, reaching reductions of 9.49% in volatile solids, 97.82% in fecal coliforms, 98.64% in salmonella spp and 96.12% in helminth eggs. Vermiculture is a viable option if the sludge meets the characteristics of worm development. The possible applications are reported according to the category according to Peruvian regulations in the reuse of biosolids. Finally, an application of the humus produced in the transformation of sewage sludge is shown, as a soil improver, in the green areas of the Parque del Recuerdo cemetery located in front of the WWTP in Ancon.

PRÓLOGO

Cuando decidí iniciar con la tesis y encontrar un tema de mi interés, me enfoqué en una búsqueda de distintas áreas de la ingeniería sanitaria que me provocaban curiosidad y entusiasmo. Dentro de las líneas de investigación, llamó mi atención la reutilización o aprovechamiento de subproductos en el tratamiento de aguas residuales. Aun cuando se conoce que estos subproductos son potencialmente beneficiosos por contener un nivel de nutrientes considerables, el aprovechamiento de estos, generalmente, no es una práctica extensiva; a medida que iba recabando información, encontré que pueden ser reutilizados de maneras diferentes a las convencionales mediante distintos tratamientos, entre ellos la lombricultura. Encontrado el tema principal de mi investigación, solicité realizar mi tesis en una de las PTAR de Sedapal, la planta de Puente Piedra, y realizando las primeras pruebas —resultó que las características del lodo no eran óptimas para el desarrollo de la lombricultura— me contaron que una ingeniera estaba buscando una manera para tratar sus lodos, me contactaron con la Ing. Milagritos Reyes y luego de presentarle lo que iba a investigar me brindó la oportunidad de realizar mi tesis en su PTAR San Pedro de Ancón. Realicé una caracterización de sus lodos, el lodo cumplió con las condiciones de desarrollo de la lombriz y comencé con las pruebas de aceptación de lodo como nuevo sustrato. Mi investigación tuvo un lapso de veintidós semanas durante en el cual monitoreé las eficiencias de remoción de patógenos en el lodo y en paralelo diseñé un sistema de lechos de lombrices para tratar todo el lodo en exceso de la PTAR; se comenzó con la construcción de un lecho de lombrices en el cual están tratando una parte de sus lodos para luego ser usados como una primera capa sobre algunas zonas del cementerio Parque del Recuerdo, actualmente está en construcción un segundo lecho de lombrices. Es un logro personal ver como mi investigación sirvió para la aplicación del tratamiento de sus lodos usando la lombricultura.

Esta investigación podrá servir como guía metodológica del desarrollo de la lombriz *Eisenia foetida* en el lodo y como esta logra modificar sus características con el fin de aprovecharlo.

ÍNDICE

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis General	3
1.4.2 Hipótesis Específica.....	3
1.5 Antecedentes Del Estudio	3
CAPITULO II. MARCO TEORICO	6
2.1 Lodos Residuales.....	6
2.1.1 Tipos de Lodos Residuales.....	6
2.1.2 Tratamiento de Lodos Residuales.....	7
2.1.3 Manejo y Disposición final de Lodos	9
2.1.4 Reúso de Lodos.....	10
2.2 Lombricultura	11
2.2.1 Lombrices utilizadas en la Lombricultura	11
2.2.2 Lombriz Eisenia foetida.....	12
2.2.3 Condiciones de desarrollo de la lombriz Eisenia Foetida	12
2.3 Humus.....	14
2.4 Biosólidos.....	15
2.4.1 Clasificación de los Biosólidos	15
2.4.2 Clasificación peruana de Biosólidos.....	16
CAPITULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	17

3.1 Ubicación	17
3.2 Materiales	18
3.3 Equipos e Instrumentos.....	19
3.4 Características del lodo en exceso del sistema de lodos activados utilizados	20
3.4.1 Lodos de la PTAR San Pedro de Ancón	20
3.4.2 Lodos de la PTAR Puente Piedra	20
3.5 Métodos utilizados en la determinación de parámetros	20
3.5.1 Procedimiento.....	21
3.5.2 Preparación del reactor.....	24
3.6 Preparación de la Muestra de Lodo durante el monitoreo del reactor.....	25
3.7 Análisis Microbiológico	25
3.7.1 Coliformes Fecales	25
3.7.2 Salmonella spp	27
3.7.3 Huevos de helmintos	30
3.8 Análisis de Metales Pesados.....	32
CAPITULO IV. RESULTADOS	33
4.1 Resultados de la Prueba de Aceptación.....	33
4.2 Análisis Fisicoquímico	34
4.2.1 Temperatura del Lodo.....	35
4.2.2 PH	36
4.2.3 Humedad	36
4.2.4 Sólidos Totales, Fijos y Volátiles Totales	37
4.3 Análisis Microbiológico	40
4.3.1 Coliformes Fecales	40
4.3.2 Salmonella spp	41
4.3.3 Huevos de helmintos	43

4.4 Análisis de Metales Pesados.....	45
CAPITULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
5.1 PH y Temperatura.....	46
5.2 Humedad y Solidos Totales.....	46
5.3 Solidos Fijos y Volátiles Totales.....	46
5.4 Coliformes fecales.....	47
5.5 Salmonella spp.....	48
5.6 Huevos de helmintos.....	48
5.7 Metales Pesados.....	49
• EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LA HIPÓTESIS.....	50
1. Efecto de la adición del lodo en la segunda etapa.....	51
2. Clasificación del lodo tratado según la normativa nacional.....	52
3. Evaluación de la calidad del humus producido.....	52
4. Crecimiento de las lombrices.....	52
CONCLUSIONES.....	53
RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
ANEXOS.....	60
Anexo A. Tecnologías de estabilización para biosólidos. D.S. N°015-2017-VIVIENDA.....	60
Anexo B. Tecnologías para la higienización de Biosólidos D.S. N°015-2017-VIVIENDA.....	61
Anexo C. Parámetros de estabilización, higienización de lodos y toxicidad química D.S. N°15-2017-VIVIENDA.....	62
Anexo D. Pruebas de Laboratorio Fisicoquímicas.....	63
Anexo E. Pruebas de laboratorio de Coliformes fecales.....	64
Anexo F. Pruebas de laboratorio de Salmonella spp.....	65

Anexo G. Pruebas de laboratorio de Huevos de Helmintos.....	66
Anexo H. Análisis de metales pesados del humus, lodo residual digerido por las lombrices <i>Eisenia foetida</i>	68
Anexo I. Análisis de metales pesados de la lombriz <i>Eisenia foetida</i> utilizada en el tratamiento de lodos residuales	70
Anexo J. Lecho de Lombrices construido en la PTAR San Pedro de Ancón. .	72
Anexo K. Desarrollo de la Lombriz <i>Eisenia foetida</i> en la PTAR San Pedro de Ancón.....	73
Anexo L. Operación y Mantenimiento del lecho de lombrices en la PTAR San Pedro de Ancón.	74

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Los lodos residuales en exceso provenientes de las PTAR son subproductos poco aprovechados en nuestro país y para que puedan serlo requieren de un proceso sanitario adicional que permita estabilizarlos de tal forma que no pueda afectar negativamente en su aprovechamiento. Se busca, además, la reducción del volumen con el fin de que puedan ser transportados a un menor costo. Para dar cumplimiento a este proceso investigativo se realizó un tratamiento mediante lombricultura usando la lombriz roja californiana *Eisenia foetida* como digestor de los lodos residuales provenientes de la PTAR doméstica privada llamada San Pedro de Ancón que utiliza la tecnología de lodos activados con el proceso de aireación extendida. La *Eisenia foetida* es una de las especies más utilizadas en el cultivo intensivo, se puede cultivar a gran escala, a la intemperie, con distintos alimentos y en diversos climas (Tineo, 1994). Las galerías creadas por las excavaciones de las lombrices ayudan a transferir el oxígeno de la atmosfera a los lodos manteniendo un ambiente aeróbico en los estratos inferiores, a través de estos orificios macroscópicos por contacto directo del aire con el sustrato. (Schuldt, 2006; López et al, 2017). Además, dentro de la lombriz ocurre la trituración, mezcla y homogeneización de los sustratos además de adecuar la acidez sobre la materia orgánica ingerida para luego ser egestado, acelerando y promoviendo el proceso de descomposición por los microorganismos facilitando su estabilización (Schuldt, 2006; Marín y Osés, 2013).

1.2 Planteamiento del problema

El tratamiento de lodos residuales implica un costo adicional por el gran volumen de lodos que se genera, así como su composición, el problema generalizado es que muchas veces no son considerados su manejo ni disposición, por lo tanto, no se controlan ni tienen un tratamiento adecuado (Rojas y Mendoza, 2012). Su manejo y disposición final puede ser uno de los problemas más complejos al que enfrentan los ingenieros. El tratamiento de los lodos residuales se enfoca mayoritariamente en reducir su volumen y disponerlos, en el mejor de los casos, en un relleno sanitario, mientras que otras disposiciones finales son acumulación en el terreno; sea dentro o fuera de la PTAR; y entierros en botaderos donde el

aprovechamiento es casi nulo; además de ser malas prácticas, se perjudica las condiciones del suelo (Loose, 2016; Oropeza, 2006).

En el diagnóstico de plantas de tratamiento de aguas residuales realizado por Loose (2016) muestra que en el año 2016 solo existían 9 rellenos sanitarios en el Perú y que solamente Sedapal era la única EPS (operaba 22 PTAR) que disponía sus residuos sólidos y lodos residuales en un relleno sanitario de las 172 PTAR construidas hasta ese año. Actualmente en el Listado de rellenos sanitarios del Ministerio del Ambiente (2021) muestran que existen 63 rellenos sanitarios en el Perú, no hay información oficial de cuantas PTAR disponen sus lodos residuales o si realizan algún tipo de tratamiento a sus lodos, pero lo más seguro es que desde el 2016 hasta la actualidad, la cantidad de PTAR que realizaban esas acciones no hayan aumentado significativamente, es decir solo un poco más del 10% de PTAR manejan y disponen adecuadamente sus lodos residuales en el Perú.

Existen tecnologías que dan soluciones al aprovechamiento de biosólidos a bajo costo; solo falta validarlas, adaptarlas y promoverlas en nuestro contexto. Una de esas tecnologías es precisamente la lombricultura o vermicultura.

En nuestro territorio se han realizado pocas investigaciones en el uso de la lombriz de tierra como transformador de los residuos orgánicos y menos aún con lodos residuales exclusivamente, en su mayoría enfocados en conocer las propiedades agronómicas del humus producido y en menor medida algunos parámetros sanitarios, por lo que, poco se conoce de la eficiencia de la lombricultura en la reducción de patógenos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Estudiar el tratamiento de lodos en exceso provenientes de la PTAR de lodos activados San Pedro de Ancón mediante la lombricultura utilizando *Eisenia foetida*.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Conocer la calidad de los lodos crudos en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón.

- Verificar el desarrollo de la lombriz *Eisenia foetida* en los lodos en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón.
- Evaluar las características del humus producido mediante lombricultura de lodo residual.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis General

El tratamiento de los lodos en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón mediante la lombricultura utilizando *Eisenia foetida* reduce la concentración de Sólidos volátiles en 7.6-15%, coliformes fecales en 99-99.99%, *Salmonella* spp en 97-100% y huevos de helmintos en 98-99%.

1.4.2 Hipótesis Específica

- El lodo en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón tiene las características necesarias para el desarrollo de la lombricultura con *Eisenia foetida*.
- El humus producido, provenientes del tratamiento de los lodos en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón, por la lombriz *Eisenia foetida* cumple con las características necesarias para su reaprovechamiento.

1.5 Antecedentes Del Estudio

Hait y Tare (2011) encontraron un alto grado de estabilización con una reducción significativa de patógenos del lodo residual proveniente de un tratamiento con tecnología de lodos activados de mezcla completa utilizando el vermicompostaje (*Eisenia foetida*). Además, la relación temperatura y el porcentaje de humedad óptima fue cuando se trabajaba con una temperatura de 20°C y una humedad cercana al 90% en la etapa de vermicompostaje. Es en esas condiciones consiguió reducciones de 99.82% para coliformes fecales y 97.88% para salmonella.

Khwairakpam y Bhargava (2009) utilizaron distintas lombrices (*E. foetida*, *E. eugeniae* y *P. excavatus*) para tratar lodos residuales y no encontraron una gran diferencia entre sus eficiencias de remoción individuales o en combinaciones. La eficiencia de remoción de *E. foetida* fue del 99.9%, la concentración final de

coliformes fecales fue de 2.3×10^3 en 45 días, concluyó presumiblemente por la eliminación de los coliformes al ingresar a la cadena alimentaria de la lombriz.

Eastman et al (2001) trabajó con biosólidos clase B, según la clasificación de la EPA, proveniente de un proceso convencional de lodos activados donde inoculó cuatro patógenos y concluyó que la lombriz *Eisenia foetida* puede reducir significativamente estos cuatro indicadores de patógenos humanos eficientemente (coliformes fecales, *Salmonella* spp, virus entéricos y huevos de helmintos). Obtuvo una reducción de 99.99% en coliformes fecales en solo siete días, 100% en *salmonella* spp en seis días y 99.87% en la reducción de huevos de helmintos. Concluyó que la lombricultura puede usarse como tratamiento eficiente en la reducción de patógenos y potencialmente producir biosólidos clase A.

Pedersen y Hendriksen (1993), investigaron sobre las bacterias que pasaban el tracto digestivo de las lombrices de tierra y demostraron que las respuestas bacterianas pueden ser bastante complejas, con diferentes especies microbianas que muestran patrones muy diferentes de cambio durante el tránsito por el intestino de la lombriz. El número de *E. coli* y *Pseudomonas putida* se redujeron en el intestino de la lombriz en comparación con el material ingerido. Las concentraciones de *E. cloacae* disminuyeron al pasar por la faringe y/o el buche de la lombriz antes de aumentar a los niveles iniciales en el intestino posterior. Aguilera (2002) concluyó que la lombriz, en su caso trabajo con *Eisenia andrei*, disminuía concentraciones de *E. coli* y *salmonella* al pasar por su tracto digestivo. Hay evidencia que las bacterias, gusanos endoparásitos (helmintos) y virus se destruyen gracias a la actividad de las lombrices de tierra en los biosólidos y otros residuos orgánicos, también que la asimilación digestiva de algunos nematodos por las lombrices de tierra muestra un potencial de destrucción efectiva de helmintos y sus huevos (posiblemente incluso los óvulos resistentes de *Ascaris*) (Dash et al, 1980 y Hartenstein, 1978, como se citó en Edwards, 2011).

Castañeda (2018) trabajó con mezclas de lodo residuales, provenientes de un proceso de mezcla completa de lodos activados, con compost de residuos sólidos orgánicos domésticos mediante la lombricultura con *Eisenia foetida* y encontró que con un 100% de lodo residual, como sustrato, la lombriz roja no disminuyó su

contenido de coliformes fecales (1.1×10^2 NMP/g) en cuatro semanas, pero si lo hizo en sustratos mixtos.

Berrios (2019) trabajó en el vermicompostaje con *Eisenia foetida* con mezclas de lodo residual de lagunas aireadas con excretas de cuy y oveja, en su investigación mostro una reducción en coliformes fecales y obtuvo concentraciones finales de 2.1×10^6 NMP/g y una obtuvo eficiencias considerables en la reducción de solidos volátiles del 66.21%-66.73%.

Las investigaciones en nuestro país se han enfocado principalmente en conocer la calidad agronómica del humus de lombriz; entre ellos, Marquina y Martínez (2016) midieron los niveles de nitrógeno, fosforo, potasio, calcio, magnesio y sodio después del tratamiento y resultó un abono orgánico de buena calidad mediante la lombricultura; concluyeron que la lombricultura influyó significativamente en la calidad del abono orgánico a partir de los lodos residuales.

Las investigaciones sobre la lombricultura, como tratamiento de lodos en exceso, enfocadas en conocer la estabilización de los lodos y la reducción de parámetros microbiológicos que resulta aún son pocas en nuestro país, incluso cuando Berrios (2019) investigó bajo un planteamiento sanitario, trabajó con un lodo seco cuya humedad era del 16% y para el desarrollo de la lombricultura tuvo que humedecer el lodo hasta llegar a los rangos óptimos de desarrollo de la lombriz *Eisenia foetida*.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1 Lodos Residuales

Los procesos y operaciones de tratamiento de aguas residuales producen lodos. Mientras que el efluente de una PTAR es un producto terminado, los lodos, no lo son, requieren de un proceso para reducir su volumen y asegurar su estabilización biológica con el fin de manejarlos, transportarlos y evacuarlos apropiadamente (Fair et al, 2008; Metcalf & Eddy, 2014).

Aunque el lodo puede considerarse un concentrado de contaminación o un sedimento de DBO, está compuesto casi en su totalidad por agua y contiene un porcentaje muy bajo de materia sólida (1-6%), por lo que para eliminar una pequeña cantidad de sólidos es necesario procesar un gran volumen de lodo (Romero, 2013).

Los lodos que se sedimentan de las aguas residuales por sedimentación simple contienen alrededor del 95% de agua; los lodos activados, el 98% o más. Es decir, el volumen diario de lodo es significativo, esto los hace voluminosos y putrescibles. Para simplificar el manejo, disposición o la reutilización, los lodos se deshidratan y estabilizan en diversos grados (Shammas y Wang, 2011).

Aunque el lodo representa sólo del 1% al 2% del volumen de aguas residuales tratadas, su gestión es muy compleja y su costo suele oscilar entre el 20% y el 60% de los costos totales de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales (Andreoli et al, 2007).

2.1.1 Tipos de Lodos Residuales

Hay muchas maneras de clasificar a los lodos residuales, la línea de lodos está bien estudiada y se pueden distinguir según la estabilidad de la materia orgánica que contienen o según el proceso de tratamiento al que pertenecen.

Las características de los lodos varían mucho dependiendo de su origen, de su edad, del tipo de proceso del cual proviene y de la fuente original de los mismos (Metcalf y Eddy, 2014).

Tabla 1*Tipos de Lodo producido según el tratamiento de agua residual*

	Descripción del tratamiento	Tipo de solido o lodo residual
Pretratamiento	Remoción de los sólidos gruesos y de las arenas. Se separa los sólidos pesados, inorgánicos y similares a la arena que se asentarían en los canales e interferirían con los procesos de tratamiento.	Los sólidos gruesos y la arena se manejan como un residuo sólido y casi siempre se tiran a un relleno. Este material está excluido de la definición de lodos y del reglamento 40 CFR Parte 503 que rige el uso o la eliminación de biosólidos.
Tratamiento Primario	Normalmente implica la sedimentación por gravedad para eliminar los sólidos en suspensión antes del tratamiento secundario.	Los lodos producidos por el tratamiento primario suelen contener entre un 3-7% de sólidos; por lo general, su contenido de agua puede reducirse mediante el espesamiento o la deshidratación.
Tratamiento Secundario	Generalmente se basa en un proceso de tratamiento biológico, en el que se utilizan microorganismos para reducir la DBO y remover los sólidos suspendidos.	Los lodos producidos por el tratamiento secundario suelen tener un bajo contenido en sólidos (0,5 a 2%) y son más difíciles de espesar y deshidratar que los lodos primarios.
Tratamiento Terciario	Se utiliza cuando se requiere una calidad de efluente mayor que la del tratamiento secundario. Los tipos comunes de tratamiento terciario incluyen la precipitación biológica y química y los procesos para eliminar el nitrógeno y el fósforo.	La cal, los polímeros, el hierro o las sales de aluminio utilizados en el tratamiento terciario producen lodos con diversas características de absorción de agua. Además, las precipitaciones de cal de alto nivel producen biosólidos alcalinos.

Fuente: USEPA, 1999

2.1.2 Tratamiento de Lodos Residuales

El procedimiento de tratamiento de lodos difiere según la fuente y el tipo de agua residual de donde provienen, el proceso de tratamiento de las aguas residuales recibido y la disposición final que se dará al lodo tratado. El principal objetivo en

el tratamiento de los lodos es reducir el volumen de agua, reducir su contenido orgánico y concentrar los sólidos, presentes en pequeña concentración (1-6%), en los lodos crudos con el fin de obtener un material estabilizado y suficientemente inofensivo para la disposición final (Romero, 2013). Además, cuanto mayor sea la estabilidad de la materia orgánica en el lodo, mejores serán las condiciones del lodo como mejorador de suelos (Alcañiz et al, 2009).

Para el tratamiento de los lodos hay que definir dos términos: estabilización y digestión. La estabilización busca reducir o inactivar los patógenos en los lodos, controlar olores desagradables y reducir el potencial de atracción de vectores (USEPA, 1999). En cambio, la digestión destruye o mineraliza la materia orgánica, reduciendo la masa de lodos (no necesariamente el volumen), sin garantizar el control de patógenos. Ninguno de los dos términos implica la eliminación de metales o toxinas. Con la idea de promover la reutilización de los lodos, la USEPA ha creado el término "biosólidos" para referirse a aquellos lodos que han sido estabilizados y que pueden ser reutilizados sin causar ningún perjuicio a los suelos, rellenos sanitarios o cualquier otro medio (Ujang and Henze, 2006).

Tabla 2

Procesos del Tratamiento de Lodos Residuales

Espesamiento	Estabilización	Acondicionamiento	Deshidratación
Incrementar la concentración de sólidos	Reducir la fracción biodegradable de lodos	Mejorar las características de lodos para facilitar su deshidratación	Reducir el contenido de agua.
-Por gravedad	-Aerobia	-Adición de	-Secado Mecánico
-Por flotación	-Anaerobia	floculantes	-Secado Térmico
-Centrifugación	-Química		-Lechos de secado
Procesos físicos	Procesos físicos, químicos y biológicos	Procesos químicos	Procesos físicos

Alianza por el agua, 2008

2.1.2.1 Estabilización del lodo

La estabilización del lodo se centra en tres acciones (1) reducir la presencia de patógenos; (2) eliminar los olores desagradables, y (3) reducir, inhibir o eliminar su potencial de putrefacción. Además, la presencia de patógenos, la proliferación de olores y la putrefacción, se producen cuando se permite que los

microorganismos se desarrollen sobre la fracción volátil del lodo. Para evitar este desarrollo, los efectos del proceso u operación de estabilización sobre la fracción volátil del lodo se utilizan los siguientes medios: (1) reducción biológica del contenido de la materia volátil; (2) oxidación química de la materia volátil; (3) adición de agentes químicos para hacer el lodo inadecuado para la supervivencia de los microorganismos, y (4) aplicación de calor con el objeto de desinfectar o esterilizar el lodo (Metcalf y Eddy, 2014).

Los métodos más comunes para la estabilización del lodo son: (1) estabilización alcalina; (2) tratamiento térmico; (3) digestión anaerobia; (4) digestión aerobia, y (5) compostaje (Metcalf y Eddy, 2014).

2.1.3 Manejo y Disposición final de Lodos

Respecto a la disposición final existen varias alternativas, aplicación en terrenos, rellenos, suelos agrícolas y en este sentido, Guzmán & Campos (2001), manifiestan que el uso de este material en campos como la agricultura, recuperación de canteras, reforestación y producción de materiales de construcción, entre otros, son alternativas para su disposición final. Como estrategia para conseguir estos propósitos, se deberá aplicar un concepto de gestión basado principalmente en la separación de los diferentes tipos de lodos y control de las actividades de la disposición tales como: (1) calidad de lodos aceptados que cumplan totalmente con los requisitos exigidos en el lugar de la disposición. (2) disponer en forma separada los lodos incompatibles o de diferente calidad, para evitar la mezcla de los diferentes contaminantes, (3) tener un sistema especial en las áreas de disposición para lograr drenar, coleccionar y tratar los lixiviados generados.

Se debe seleccionar cuidadosamente los sitios para disposición final de lodos, diseñados técnicamente, tomando en cuenta criterios geológicos satisfactorios, hidrología, uso actual y futuro del agua subterránea, geotecnia, estabilidad de pendientes, protección de la erosión, provisión de servicios, factores socioeconómicos, etc. (Oropeza, 2006).

Es práctica común que en el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales se omita el manejo adecuado de los lodos, lo que hace que esta compleja actividad se lleve a cabo sin planificación previa por parte de los

operadores de las plantas, y frecuentemente en condiciones de emergencia y de manera deficiente. Debido a esta omisión, se han adoptado alternativas inadecuadas de disposición final, que reducen en gran medida los beneficios logrados en la recolección de aguas residuales por el sistema de alcantarillado. La disposición final adecuada de los lodos es un factor fundamental para el éxito de un sistema de saneamiento, sin embargo, esta actividad ha sido descuidada en muchos países en desarrollo (Andreoli et al, 2007).

2.1.4 Reúso de Lodos

Los lodos producidos en procesos de tratamiento residual representan una enorme cantidad de biomasa potencialmente valiosa, por ello se realizan esfuerzos continuos para un aprovechamiento óptimo. La composición de abonos con lodos crudos filtrados proporciona un material orgánico estable, semejante al humus, que se puede utilizar como acondicionador de terreno y como una fuente de nutrientes para las plantas (Garrido y Rojas, 2008).

Se sabe que el lodo proveniente de las plantas de tratamiento de aguas residuales, encierra en su composición constituyentes de varias fuentes, con propiedades y naturaleza diferentes que producen efectos aún poco estudiados en el ambiente donde están siendo dispuestos, principalmente cuando la opción de su destino final se da en el suelo para uso agrícola, campo en el cual posee restricciones debido a que las concentraciones de organismos patógenos presentes en el lodo que pueden afectar la salud humana (Grajales et al, 2006). En tal sentido, su aplicación puede implicar riesgos debido a la presencia de organismos patógenos, sustancias químicas orgánicas y metales pesados (Romero, 2013).

Martínez de la Cerda (2003), considera que los biosólidos son utilizados ampliamente por sus bondades, lo que hace que su efecto benéfico como fertilizante orgánico se prolongue por varios ciclos de siembra con aplicación única, igualando o incrementado el rendimiento de los cultivos comparado con fertilizantes inorgánicos, también considera el mejoramiento del suelo mediante el incremento de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, retención de humedad y población de microorganismos.

Rojas y Mendoza (2012), indican que el lodo se puede aprovechar como fertilizante agrícola, restaurador de suelos (puede contrarrestar los problemas

actuales de desertificación), elaboración de compost, aditamento para materiales de la construcción y como materia prima para la producción de energía.

2.2 Lombricultura

Es el cultivo intensivo de lombrices con el fin de descomponer una amplia gama de residuos orgánicos biodegradables produciendo abono y lombrices. A través de la lombricultura se puede realizar diversas actividades como producir fertilizantes; alimentación animal; tratamiento de residuos orgánicos, industriales, agrícolas y urbanos; biorremediación de suelos y últimamente en la industria farmacéutica (Schuldt, 2006).

2.2.1 Lombrices utilizadas en la Lombricultura

Edwards et al (2011) indican que solo cinco lombrices presentan las características adecuadas para aplicarlas extensivamente en el vermicompostaje y se basó principalmente en que tengan altas tasas de consumo de materia orgánica, tolerancia a diversos factores ambientales, ciclos de vida cortos, altas tasas de reproducción y resistencia a la manipulación; estas fueron *Eisenia andrei*, *Eisenia foetida*, *Dendrobaena veneta*, *Perionyx excavatus* y *Eudrilus eugeniae*, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3

Características de diferentes especies de lombrices usados en lombricultura

	<i>Eisenia Foetida</i>	<i>Eisenia andrei</i>	<i>Dendrobaena veneta</i>	<i>Eudrilus eugeniae</i>	<i>Perionyx excavatus</i>
Color	Rojo oscuro	Rojo	Franjas rojas y moradas	Marrón rojizo	Marrón rojizo
Tiempo de maduración (días)	28-30	21-28	65	40-49	28-42
Tiempo de incubación (días)	18-26	18-26	42	12-16	18
Probabilidad de éxito de eclosión (%)	73-80	72	20	75-84	85-90
Número de cocones/lombriz	2.5-3.8	2.5-3.8	1.1	2-2.7	1-1.1
Rango de temperatura	0-35	0-35	15-25	16-30	25-37

Rango de humedad	70-90	70-90	65-85	70-85	76-83
------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Fuente: Edwards et al, 2011; Kiyasudeen et al, 2016.

2.2.2 Lombriz *Eisenia foetida*

Entre las pocas especies de lombrices que pueden explotarse en cautividad está la *Eisenia foetida* más conocida como lombriz roja californiana. La lombriz roja es una de las especies más utilizadas en el cultivo intensivo, se puede cultivar bajo techo o a la intemperie con distintos tipos de alimento. Cuando es adulta, mide de cinco a seis centímetros, su diámetro oscila entre tres y cinco milímetros, es de color rojo oscuro y pesa aproximadamente un gramo. Cuando las condiciones del medio son favorables para su desarrollo, esta lombriz ingiere diariamente una cantidad de comida equivalente a su propio peso, del cual asimila un 40% y el resto lo excreta en forma de humus, se aparean cada siete días y pueden vivir hasta cuatro años (Schuldt, 2006).

2.2.3 Condiciones de desarrollo de la lombriz *Eisenia Foetida*

2.2.3.1 Humedad

Los niveles de humedad menores a 55% son letales para las lombrices pues les dificulta la digestión, por otro lado, humedades mayores a 95% es muy dañina causando que disminuya su reproducción, no obstante, vive temporalmente pero no trabaja. El rango óptimo de humedad es del 70-80%. (Tineo,1994). Sin embargo, Schuldt (2006) indica que la humedad debe oscilar entre 85-95% y Edwards et al (2011), entre 80-90%.

2.2.3.2 Temperatura

Según distintos autores la temperatura optima de desarrollo varía entre 14 y 27 °C. (Schuldt, 2006), 12-28°C. (Tineo, 1994); mientras que Edwards et al (2011) indica que soportaban hasta 35°C y que a temperaturas menores a 7°C las lombrices dejan de reproducirse y alimentarse.

2.2.3.3 PH

Las lombrices pueden tolerar un pH comprendido entre 5-9 (Edwards et al, 2011); Schuldt (2006) indica que el rango deseable de pH es de 6-8 aunque la lombriz puede penetrar en lechos de ph de 5-9.

2.2.3.4 Aireación

Las lombrices de tierra carecen de órganos respiratorios especializados, y el oxígeno y el dióxido de carbono se difunden a través de su epidermis. Por tanto, son muy sensibles a las condiciones anaeróbicas, además se ha informado de que la *E. foetida* migra en gran número desde un sustrato en el que se ha agotado el oxígeno, o en el que se ha acumulado dióxido de carbono o sulfuro de hidrógeno (Edwards et al, 2011).

Tabla 4

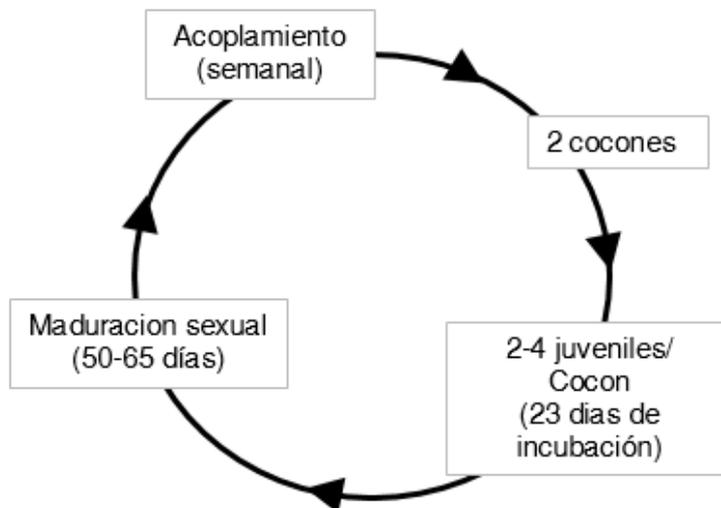
Condiciones Óptimas para el desarrollo de la Lombriz Eisenia Foetida

Variable	Intervalo óptimo	Limites
Humedad	80-90%	55-95%
Temperatura	14-27°C	0-35°C
pH	6-8	5-9
Ambiente	Aeróbico	-

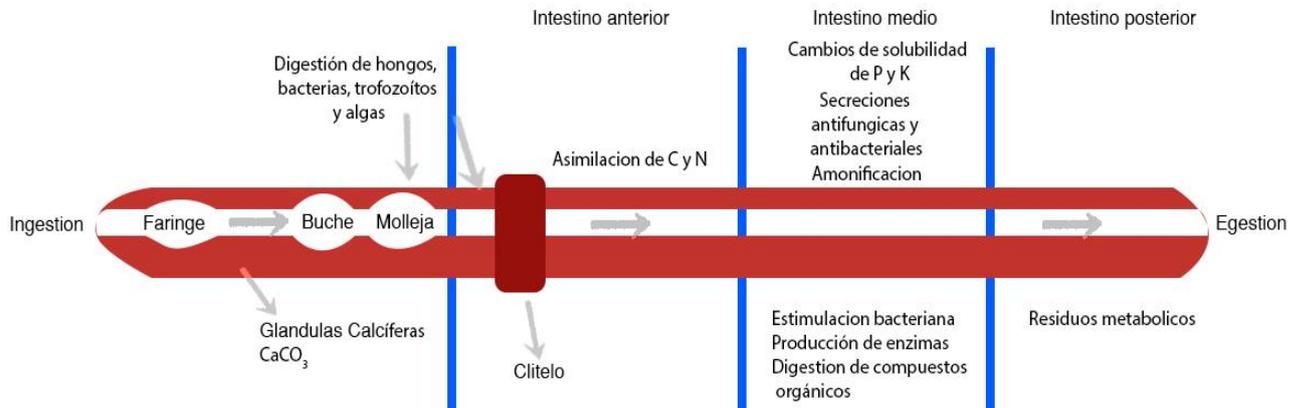
Fuente: Edwards et al (2011), Schuldt (2006) y Tineo (1994)

Figura 1

Ciclo Biológico de la Eisenia foetida



Fuente: Schuldt, 2006

Figura 2*Esquema del cuerpo de la lombriz*

Fuente: Brown et al, 2000

2.3 Humus

La lombriz digiere una cantidad equivalente a su propio peso y aproximadamente el 60% los expulsa en forma de humus. Una característica principal del humus es la de poder combinar, gracias a las enzimas producidas por su dotación bacteriana, sus propios elementos especiales con los presentes en el terreno en función de las necesidades específicas de cada tipo de planta y en función del tipo de terreno en que esta se halla ubicada (Ferruzi, 2007).

La fertilidad que aporta el humus de lombriz al ser aplicado en el terreno es cinco a seis veces mayor al de los estiércoles, mejora la textura y estructura del suelo, lo cual se causa una mejor aireación y movilización del agua, incrementando el intercambio de nutrientes (Schuldt, 2006).

En resumen, el humus de lombriz más que un abono o fertilizante, es un biocorrector con alta carga de nutrientes y alta carga de bacterias, que ayudan a liberar compuestos en el suelo (Ferruzi, 2007; Schuldt, 2006).

A continuación, se muestra la composición típica del humus de lombriz:

Tabla 5*Composición del humus producido con residuos orgánicos*

Parámetro	Rango
pH	6.5-8.0
Humedad (%)	45-80

Nitrógeno (%)	1.4-2.9
Fosforo (%)	0.8-5.1
Potasio (%)	1.1-2.4
Calcio (%)	4.6-11.9
Magnesio (%)	0.6-2.6
Hierro (%)	0.6-3
Carga bacteriana (colonia/gramo)	$1.3 \times 10^7 - 2 \times 10^{12}$

Fuente: Ferruzi, 2007; Edwards et al 2011

2.4 Biosólidos

Biosólidos, se refiere específicamente a lodos de aguas residuales que se han sometido a un tratamiento y que cumplen con ciertos estándares para darle un uso beneficioso (EPA, 2003). El término "biosólido" es una forma de resaltar sus aspectos beneficiosos, dando más valor a los usos productivos que la simple disposición final, no productiva, en rellenos sanitarios, la utilización de este término requiere todavía que las características químicas y biológicas del lodo sean compatibles con el uso productivo, por ejemplo, en la agricultura (Andreoli et al, 2007).

Los lodos estabilizados o biosólidos, aunque son considerados residuos no peligrosos ni tóxicos, poseen contaminantes que obligan a su tratamiento (Vélez, 2007). EPA (1993), define el termino contaminante como una sustancia orgánica, una sustancia inorgánica, una combinación de sustancias orgánicas e inorgánicas, o un organismo patógeno que, tras su emisión y exposición, ingestión, inhalación o asimilación en un organismo, ya sea directamente del medio ambiente o indirectamente por ingestión a través de la cadena alimentaria, podría causar la muerte, enfermedades, anomalías de comportamiento, cáncer, mutaciones genéticas, disfunciones fisiológicas (incluida la disfunción en la reproducción) o deformaciones físicas en los organismos o en la descendencia de los organismos.

2.4.1 Clasificación de los Biosólidos

Por su parte, la norma EPA clasifica los biosólidos en:

Biosólido Clase A. Suelen llamarse de calidad excepcional. Presentan una densidad de coliformes fecales inferior a 1000 NMP por gramo de sólidos totales

o la densidad de *Salmonella* sp. es inferior a 3 NMP por 4 gramos de sólidos totales.

La densidad de virus entéricos debe ser menor o igual a 1 UFC por 4 gramos de sólidos totales y los huevos viables de helmintos inferiores a 1 por 4 gramos de sólidos totales.

Un biosólido con estos niveles que además tenga tratamiento para reducir vectores, no tendrá restricciones en su aplicación agraria y sólo será necesario solicitar permisos para garantizar que estas normas hayan sido cumplidas.

Biosólido Clase B. Con una densidad de coliformes fecales inferior a 2×10^6 NMP por gramo de sólidos totales o 2×10^6 UFC por gramo de sólidos totales. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola.

2.4.2 Clasificación peruana de Biosólidos

La siguiente clasificación se indica en el Decreto Supremo N° 015-2017 por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento:

Biosólido clase A: Sin restricciones sanitarias para la aplicación al suelo. Con concentraciones de *Escherichia coli* menor a 1000 NMP/gST, *Salmonella* sp menor a 1 NMP/10gST, huevos viables de helmintos menor a 1/ 4gST.

Biosólido clase B: Biosólido con restricciones sanitarias de aplicación según localización y tipo de los suelos o cultivos que hayan llevado un proceso de estabilización conforme al anexo N°1 del reglamento D.S. 015-2017-VIVIENDA.

CAPITULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología de esta investigación tiene un enfoque cuantitativo de alcance exploratorio, debido a que, no hay mucha investigación en la zona local.

3.1 Ubicación

La investigación se llevó a cabo en la PTAR privada San Pedro de Ancón con coordenadas 18 L 268600.45 m E 8694032.08 m S, localizado en la av. Panamericana km 39 del distrito de Ancón, Lima. La PTAR se encuentra adyacente al parque zonal San Pedro de Ancón frente al cementerio Parque del Recuerdo a pocos metros del penal de máxima seguridad denominado comúnmente “Piedras Gordas”.

Figura 3

Ubicación de la PTAR San Pedro de Ancón

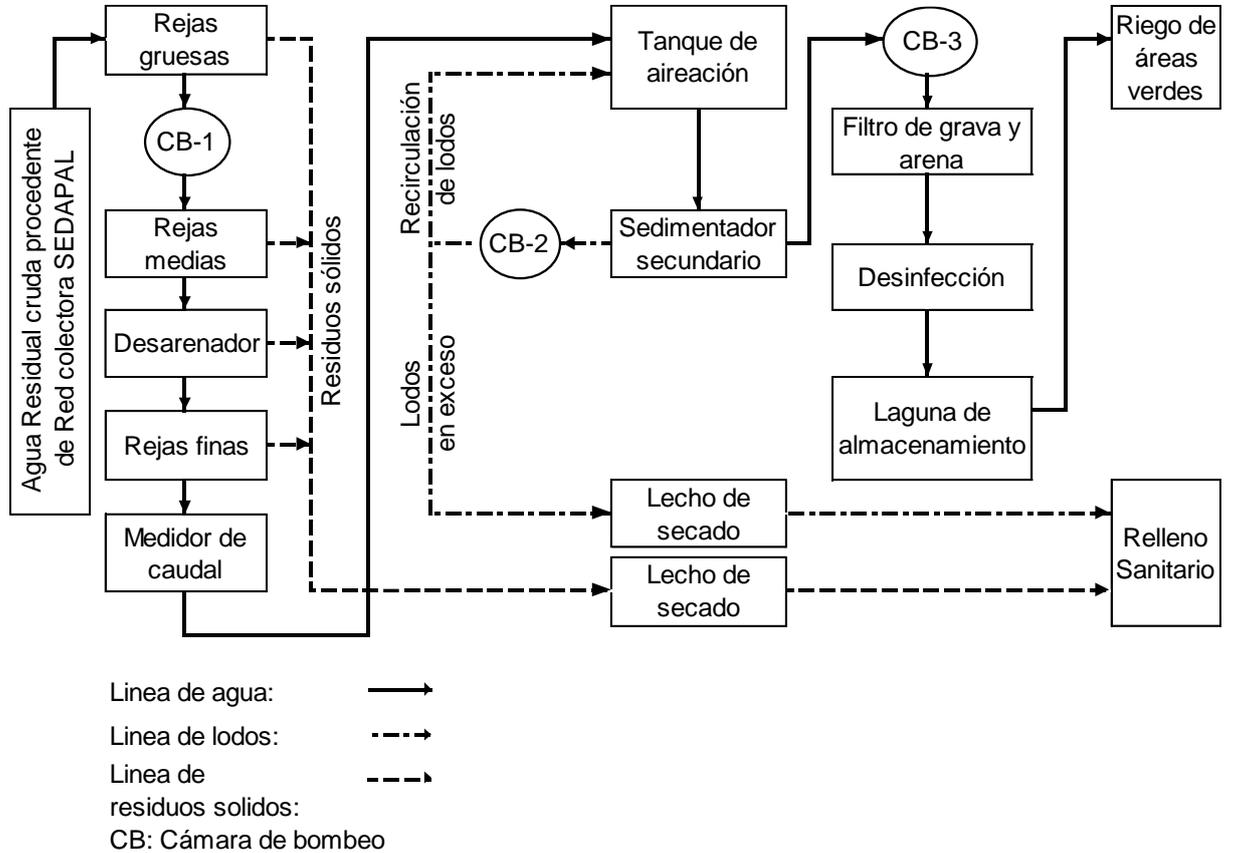


Fuente: Google Earth

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la PTAR San Pedro de Ancón:

Figura 4

Diagrama de flujo de la PTAR San Pedro de Ancón



Fuente: Elaboración propia

3.2 Materiales

Se utilizó lo siguientes materiales:

- 500 gramos de lombriz roja californiana
- 5kg de lodo en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón
- Bolsas de plástico con cierre hermético
- Agua peptonada
- Medio de cultivo A1
- Caldo selenito cistina
- Caldo tetrionato
- Solución verde brillante
- Solución yodo yoduro

- Sulfato de Zinc
- Solución Tween 80 al 0.1%
- Mallas de 150 μm y 20 μm
- Vasos precipitados de 50ml, 100ml y 500 ml
- Matraz Erlenmeyer de 100ml y 250ml
- Gradillas y canastillas
- Tubos de ensayo y tubos durham
- Pipeta graduada de 1ml, 5ml y 10 ml
- Pipetas Pasteur
- Portaobjetos y crubreobjetos
- Varillas de plástico
- Embudo de plástico

3.3 Equipos e Instrumentos

Se emplearon los siguientes:

- pH-metro digital Oakton PCSTestr 35
- Medidor multiparámetro Hach HQ40D
- Balanza electrónica Shimadzu modelo AY120
- Agitador Magnético Fisatom 722
- Densímetro
- Mufla Thermo Scientific FB1410M
- Estufa analógica Húngaro
- Estufa analógica Precision Scientific 31260
- Plancha de calefacción Barnstead thermolyne
- Autoclave Hirayama HI-92-AE
- Centrífuga IEC Model C50
- Microscopio binocular Carl Zeiss Primo Star iLed 415500-0051-000
- Incubadora Precision scientific IFA-170-8
- Baño maría digital Lab Companion BW-20G

Parámetros evaluados

- Temperatura
- PH

- Humedad
- Sólidos Totales
- Sólidos Volátiles totales
- Sólidos Fijos totales
- Coliformes fecales
- Salmonella spp
- Huevos de helmintos
- Metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn)

3.4 Características del lodo en exceso del sistema de lodos activados utilizados

3.4.1 Lodos de la PTAR San Pedro de Ancón

Proviene de un sistema de tratamiento de lodos activados de aireación extendida con un tiempo de retención hidráulico de 30 horas y una edad del lodo de 20 días. Los lodos en exceso son purgados hacia un lecho de secado donde luego de 30 días aproximadamente son dispuestos a un relleno sanitario.

3.4.2 Lodos de la PTAR Puente Piedra

Proviene de un sistema de tratamiento CSBR cuyo ciclo tiene una duración aproximadamente de tres horas. Los lodos purgados son espesados por la acción de polímeros y luego son centrifugados, son almacenados en dos contenedores de diez toneladas cada uno para luego disponerlos a un relleno sanitario.

3.5 Métodos utilizados en la determinación de parámetros

La Tabla 6 muestra los métodos utilizados para la determinación de los parámetros medidos en la presente tesis realizados en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental (FIA), los procedimientos de estos métodos sirvieron como guía de laboratorio convenientemente de acuerdo a los materiales y equipos disponibles en él.

El análisis de metales pesados no fue realizado por el tesista sino se contrató al laboratorio Baltic Control CMA para analizar en los lodos tratados y en la lombriz (ver Anexo H e I).

Tabla 6

Normas o Métodos utilizados en la medición de parámetros de lodos en exceso

Métodos utilizados en la determinación de parámetros	
Parámetro	Norma o Método utilizado
pH	Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos (Zagal y Sadzawka, 2007)
Humedad	Standard Methods - parte 2540 G (APHA-AWWA-WEF, 2017)
Sólidos Totales	Standard Methods - parte 2540 G (APHA-AWWA-WEF, 2017)
Sólidos Fijos totales	Standard Methods - parte 2540 G (APHA-AWWA-WEF, 2017)
Sólidos Volátiles totales	Standard Methods - parte 2540 G (APHA-AWWA-WEF, 2017)
Coliformes fecales	Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT Anexo III-2002
Salmonella spp	Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT Anexo IV-2002
Huevos de Helmintos	Standard Methods for the recovery and enumeration of Helminth Ova in Wastewater, Sludge, Compost and Urine–Diversion Waste in South Africa (Moodley et al, 2008)

Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Procedimiento

3.5.1.1 Obtención de la lombriz *Eisenia foetida*

Se adquirió la lombriz *Eisenia foetida* en la Universidad Nacional Agraria La Molina, donde se le alimenta con pre compost de residuos orgánicos, provenientes de las excretas de sus los animales en la zootecnia que realizan (Figura 5 y Figura 6), con el fin de asegurar la autenticidad de la misma.

3.5.1.2 Extracción de lodos residuales

Se tomó una muestra de los lodos residuales de la PTAR privada San Pedro de Ancón, que llevaban dos semanas de ser purgados en el lecho de secado, y se llevó a analizar al laboratorio en bolsas herméticas de aproximadamente 100g, en el sitio se analizó el pH y temperatura, en el laboratorio se realizó la determinación de la humedad para conocer si cumple con las condiciones de desarrollo de la lombriz *Eisenia foetida*. De manera similar, se procedió con el lodo de la PTAR

Puente Piedra, este lodo ya se encontraba deshidratado por la acción de su equipo centrífuga de lodos.

3.5.1.3 Prueba de aceptación del lodo

Se realizó la prueba de aceptación de un sustrato nuevo propuesta por Schuldt (2006) para verificar si el lodo en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón y la PTAR Puente Piedra son adecuados para el tratamiento de sus lodos mediante el desarrollo de la lombricultura utilizando la lombriz *Eisenia foetida*.

La prueba consiste en colocar cinco o diez lombrices adultas en el nuevo sustrato. Se utilizaron recipientes con dimensiones pequeñas donde iba contenido el sustrato nuevo, debajo de este recipiente se utilizó uno de mayor tamaño que contenga agua y haga la función de trampa de agua. Las lombrices si llegan a rechazar el sustrato se fugarán hacia la trampa. Las lombrices se depositan en la superficie del sustrato observándose si ingresan o si se desplazan sobre la superficie (el desplazamiento superficial sin ingreso al sustrato transcurridos cinco minutos es un comportamiento que indica falta de aceptación del sustrato). Al cabo de 24 horas, se consigna cuantas lombrices hay en la trampa y en el medio. Si más del 50% de las lombrices se hallan en el agua o se constata mortalidad en el sustrato, se reinicia el test al cabo de nueve días, con criterios similares para la valoración de la prueba. Si menos del 50% de las lombrices van a la trampa y no hay mortalidad mayor a 10%, el test se extiende a 48 horas. Se considera un sustrato adecuado aquel que no genere mortalidad o inferior al 10%, con un nivel de fugas que no supere el 30% y donde las lombrices se reproduzcan (Schuldt, 2006).

Para este caso, tomamos dos repeticiones con cinco lombrices tanto para la PTAR San Pedro de Ancón (Figura 7) como para la PTAR Puente Piedra (Figura 8).

Figura 5

Precompost de estiércol de la Universidad Agraria La Molina



Fuente: Elaboración propia

Figura 6

Lombricario en la Universidad Agraria La Molina



Fuente: Elaboración propia

Figura 7

Prueba de Aceptación de la PTAR San Pedro de Ancón



Fuente: Elaboración propia

Figura 8

Prueba de Aceptación de la PTAR Puente Piedra



Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Preparación del reactor

3.5.2.1 Primera etapa

Se preparó un reactor para la aplicación de la lombricultura con el lodo en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón, se armó un pequeño lecho de lombrices de dimensiones 21x21x10cm y se les realizó perforaciones tanto en la parte superior (cuarenta de 2mm de diámetro) para su oxigenación como en la parte inferior (ochenta de 1mm de diámetro) para los lixiviados (Figura 9).

Figura 9

Lombricario de laboratorio



Fuente: Elaboración propia

Luego se tomó la muestra de lodos del lecho de secado de la PTAR San Pedro de Ancón que tenía tres semanas de ser secado, se agregó treinta lombrices adultas (con presencia del clitelo). En el laboratorio de la PTAR se midió la temperatura y pH, luego se llevó las muestras de aproximadamente 100g en bolsas de plástico hacia el laboratorio de Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería y se midió durante la semana los sólidos totales, sólidos fijos totales, sólidos volátiles totales, humedad y los parámetros microbiológicos.

3.5.2.2 Segunda etapa

Durante el monitoreo se agregó en la séptima semana cinco centímetros de lodo crudo (aproximadamente 3kg) al lombricario debido a que casi el 100% del lodo había sido convertido en humus y las tomas de muestra continuas habían dejado casi sin lodo tratado para los monitoreos futuros.

Aunque no fue parte de esta investigación darle seguimiento al crecimiento de la población de lombrices, se verificó dos veces la reproducción de las lombrices mediante la presencia de cocones y juveniles (lombrices sin presencia de clitelo), mayor prueba que el lodo en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón era apto para el desarrollo de la lombriz *Eisenia foetida*.

3.6 Preparación de la Muestra de Lodo durante el monitoreo del reactor

Se retiraba aproximadamente 100g de lodo con una pala manual de plástico en una bolsa de plástico con cierre hermético, para conservar la muestra se procedió a transportarlo en un cooler con refrigerantes hacia el laboratorio de la FIA donde se realizaba los análisis respectivos, el tiempo de transporte era aproximadamente 2 horas (ver Anexo D).

3.7 Análisis Microbiológico

Considerando que un ingeniero sanitario no es un especialista en la medición de parámetros microbiológicos, a continuación, se detalla la forma de cómo fueron realizados tomando como guía las normativas y métodos citados.

3.7.1 Coliformes Fecales

Se tomó como guía la Normativa Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, en su anexo III muestra la determinación para coliformes fecales.

A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales (ST) en por ciento en peso y posteriormente se obtendrá el peso en fresco que corresponda a 1 g de ST. Se utilizó la prueba directa, mediante el medio A-1. La prueba directa del medio líquido A-1 es un método de un solo paso que no requiere confirmación (ver Anexo E).

3.7.1.1 Preparación de medio A-1

Distribuir volúmenes de 10 ml en tubos de ensayo con campana de Durham, taponear. Esterilizar en autoclave a 121°C durante 10 minutos. Este medio se debe conservar en oscuridad a temperatura ambiente durante no más de 7 días.

3.7.1.2 Preparación de la muestra

- a) Suspender X g de materia fresca que correspondan a 1 g de sólidos totales en 9 ml de agua de dilución y así obtener una dilución de 10^{-1} . Mezclar durante 2 o 3 minutos, con ayuda de un agitador magnético, a velocidad baja (800 rpm), hasta la completa disolución.
- b) Luego se preparan diluciones decimales seriadas a partir del homogeneizado resultante (10^{-1}) lo antes posible, reduciendo al mínimo la sedimentación. Transferir 1 ml en 9 ml de agua de dilución (10^{-2}) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada. Cada dilución debe ser homogeneizada perfectamente agitando 25 veces en 7 segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba abajo o con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables. Se debe utilizar una pipeta estéril diferente, para cada una de las diluciones decimales subsecuentes. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical inclinando el tubo. Nunca se debe introducir, a la muestra, más de la tercera parte de la pipeta.
- c) Si una muestra o un lote de muestras va a ser analizado por primera vez, utilizar al menos cuatro series de tres (o cinco) tubos cada una, posteriormente tres series de tres tubos serán suficientes.
- d) Adicionar por triplicado 1 ml de cada una de las diluciones preparadas del lodo en tubos que contienen medio A-1 correctamente etiquetados. Incubar durante 3 horas a $35 \pm 0,5^\circ \text{C}$.

- e) Una vez transcurrido el tiempo los tubos se transfieren a un baño de agua a una temperatura de $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ y se incuban durante otras 21 ± 2 horas.
- f) La presencia de gas en cualquier cultivo en medio A-1 a las 24 horas o menos de incubación es una reacción positiva que indica la existencia de coliformes de origen fecal.

3.7.1.3 Cálculos

El NMP de coliformes fecales se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio en A-1. Si se inoculan tres series de tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en la Tabla, se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la siguiente fórmula:

$$\text{NMP} = (\text{NMP de Tablas}) \times (10/\text{mayor volumen inoculado})$$

Por ejemplo: se obtuvo el código 3/3 para la serie de la dilución 0,01; 2/3 para la serie de la dilución 0,001 y 1/3 para la serie de la dilución 0,0001. El código es de 3, 2, 1; el índice de coliformes en Tabla es de 150, por lo que el resultado es:

$$\text{NMP/g ST} = (150) \times (10/0,01) = 150000$$

$$\text{NMP/g ST} = 1,5 \times 10^5 \text{ coliformes fecales}$$

Cuando se inoculan más de tres volúmenes decimales, para la composición del código se utilizan los resultados positivos correspondientes a tres series consecutivas inoculadas.

El análisis realizado en esta tesis no tuvo ninguna complicación para la ejecución de la misma, todos los reactivos utilizados son fácilmente accesibles y el laboratorio de la FIA cuenta con los equipos necesarios para su medición.

3.7.2 Salmonella spp

Se usó como guía de laboratorio la Normativa Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, en su anexo IV muestra la determinación de salmonella spp. La técnica para llevar a cabo la cuantificación de Salmonella spp. Es la de tubos múltiples o número más probable (NMP) en lodos y biosólidos, con el fin de evaluar su calidad y la eficiencia de los tratamientos de los mismos. La muestra, antes de

ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales (ST) en por ciento en peso y posteriormente se obtendrá el peso en fresco que corresponda a 4 g de ST (ver Anexo F).

3.7.2.1 Preparación de soluciones

- a) Preparación de caldo tetrionato, disolver los ingredientes o 16 g del medio, que se encuentra en forma deshidratada en el mercado, en agua destilada y calentar hasta ebullición, posteriormente distribuir en volúmenes de 100 ml en recipientes estériles y conservar entre 5 y 8°C. Antes de usar el medio, agregar 2 ml de solución de yodo yoduro y 1 ml de solución de verde brillante 1:1 000 por cada 100 ml de caldo, a cada recipiente. Una vez que la solución de yodo yoduro ha sido adicionada al medio, éste deberá ser utilizado de forma inmediata. Nunca se debe volver a calentar.
- b) Preparación del caldo selenito cistina, Disolver los ingredientes o 23 g del medio, que se encuentra en forma deshidratada en el mercado, en agua destilada. Calentar hasta ebullición durante 10 minutos en un baño de agua y distribuir en volúmenes de 10 ml en tubos de ensayo, para esterilizar 10 minutos por arrastre de vapor. Verificar que el pH sea de $7,0 \pm 0,2$, en caso contrario ajustar con una solución de hidróxido de sodio 0,1 N. El medio se debe utilizar el mismo día de su preparación.

3.7.2.2 Preparación de la muestra

- a) Suspender X gramos de materia fresca que correspondan a 4 gramos de sólidos totales en 36 ml de agua de dilución y así obtener una dilución de 10^{-1} . Mezclar durante 2 o 3 minutos, con ayuda de una parrilla de agitación, a velocidad baja (800 rpm), hasta la completa disolución.
- b) Suspender X g de materia fresca que correspondan a 4 g de sólidos totales en 36 ml de caldo de tetrionato, obteniendo una dilución de 10^{-1} . Mezclar durante 2 o 3 minutos, con la ayuda de una parrilla de agitación, a baja velocidad (800 rpm) hasta la completa disolución. Incubar durante 22 ± 2 horas a $37^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$.
- c) Una vez transcurrido el tiempo de incubación, preparar las diluciones decimales seriadas transfiriendo 1 ml de caldo de tetrionato en 9 ml de agua de dilución (10^{-2}) y así sucesivamente hasta obtener la dilución deseada. En cada dilución se debe homogeneizar perfectamente agitando 25 veces en 7

segundos, haciendo un arco con la muñeca de 30 cm de arriba a abajo o con un sistema de agitación que proporcione resultados equivalentes. Es importante efectuar la agitación siempre de la misma manera, para obtener resultados comparables y utilizar una pipeta estéril diferente, para cada una de las diluciones decimales subsecuentes.

- d) Adicionar por triplicado 1 ml de cada una de las diluciones preparadas en tubos conteniendo caldo selenito cistina correctamente etiquetados. Para aforar el líquido de la pipeta, deberá aplicarse la punta de ésta en el interior del cuello manteniéndola en posición vertical, inclinando el tubo. Nunca se debe introducir en la muestra, más de la tercera parte de la pipeta. Incubar durante 24 ± 2 horas a $41^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$. Realizar la observación del virado de coloración, considerando un color anaranjado intenso como positivo de la prueba correspondiente.

3.7.2.3 Cálculos

El NMP de *Salmonella* spp se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio en A-1. Si se inoculan tres series de tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes a los indicados en la Tabla, se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, a través de la siguiente fórmula:

$$\text{NMP} = (\text{NMP de Tablas}) \times (10/\text{mayor volumen inoculado})$$

Por ejemplo: en medio selenito cistina se obtuvo el código 3/3 para la serie de la dilución 0,1; 2/3 para la serie de la dilución 0,01 y 1/3 para la serie de la dilución 0,001. El código es de 3, 2, 1; el índice de coliformes en Tabla es de 150, por lo que el resultado es:

$$\text{NMP/g ST} = (150) \times (10/0,1) = 15000$$

$$\text{NMP/g ST} = 1,5 \times 10^5 \text{ salmonella}$$

Cuando se inoculan más de tres volúmenes decimales, para la composición del código se utilizan los resultados positivos correspondientes a tres series consecutivas inoculadas.

En la presente tesis solo se realizó la cuantificación de salmonella mas no el aislamiento y la identificación bioquímica. No se tuvo problemas con la adquisición de los reactivos ni con los equipos requeridos

3.7.3 Huevos de helmintos

Se usó como guía de laboratorio el método estándar desarrollado por Moodley et al, 2008 (este método es recomendado en la RM 093-2018-VIVIENDA). La aplicación de esta metodología es fácil, simple y permite comprender, interpretar y llevar a cabo el método para profesionales en formación además de no requerir productos controlados para el conteo de huevos de helmintos (ver Anexo G).

3.7.3.1 Principio del método

El método se basa en tres procesos fundamentales: lavado, filtrado una o más veces y, flotación y sedimentación de los parásitos. Para el aislamiento de los huevos de helmintos se utiliza la separación de los huevos de helmintos del resto de las partículas de mayor y menor tamaño; y una etapa de flotación mediante centrifugación y una solución química saturada con una densidad específica de 1,3; de modo que, todos los huevos de helmintos con densidades relativas que oscilan entre 1,13 (por ejemplo, Ascaris) y 1,27 (por ejemplo, Taenia) puedan flotar en esa solución.

3.7.3.2 Preparación de soluciones

- a) Sulfato de zinc, el $ZnSO_4$ (heptahidratado), se prepara disolviendo 500 g del producto químico en 880 ml de agua desionizada o agua destilada. Se debe utilizar un hidrómetro para ajustar la gravedad específica (SG) a 1,3, utilizando más producto químico si la SG es demasiado bajo o más agua si es $>1,3$. Esta gravedad específica alta facilita la flotación de los huevos más pesados, como los de Taenia sp. (SG = 1,27). No es crítico si la SG de la solución de $ZnSO_4$ es ligeramente superior a 1,3, pero nunca debe ser inferior.
- b) 0,1% Tween80. Diluir 1 ml de Tween80 en 999 ml de agua desionizada o destilada con una pipeta para obtener una solución de lavado al 0,1%. El Tween80 es extremadamente viscoso y es necesario lavarlo todo en el agua en la que está compuesto, succionando alternativamente el agua y expulsándola con la misma pipeta.

3.7.3.3 Preparación de la muestra

- a) Tome lo correspondiente a 1 g de sólido total y colóquelo en tubos tipo Falcon de 50 ml tantos como sea posible (2 en nuestro caso). Si el contenido de sólidos es alto, esta muestra debería ser suficiente. Si es bajo, tome más submuestras de 50 ml.
- b) Añada unos mililitros de solución de Tween80 al 0,1% a las muestras, agite y añada más solución. Repita este procedimiento hasta que los tubos se llenen hasta aproximadamente un centímetro de la parte superior.
- c) Colocar la malla de 150 μm en un embudo cónico sobre un soporte y con un vaso de plástico debajo para recoger el filtrado. Filtrar el contenido bien mezclado de los tubos de uno en uno, enjuagando y lavando la malla y los tubos.
- d) Verter el filtrado en tubos tipo Falcon y centrifugar a 3000 rpm durante 3 minutos. Aspirar el sobrenadante y desechar. Transferir, si es necesario, el contenido en un número adecuado de tubos para que no haya más de 5 ml de sedimento en un tubo de 50 ml con ayuda de agua destilada.
- e) Suspender cada uno de estos tubos con unos ml de ZnSO_4 y agite bien para mezclar. Siga añadiendo más ZnSO_4 y mezclando hasta que el tubo esté casi lleno.
- f) Centrifugar los tubos a 2000 rpm durante 3 minutos. Retirar de la centrífuga y verter el sobrenadante a través del filtro de 20 μm sobre un embudo cónico. Recolectar lo retenido en el filtro en tubos Falcon junto con el lavado del filtro, utilizando agua destilada.
- g) Centrifugar los tubos a 2500 rpm durante 3 minutos; retirar y desechar el sobrenadante. Combinar los depósitos en un solo tubo Falcon, utilizando agua para recuperar todos los huevos de los otros tubos. A continuación, centrifugar de nuevo a 2500rpm durante 3 minutos para obtener un solo depósito.
- h) Cuando haya un último depósito, retírelo todo con una pipeta Pasteur de plástico y colóquelo en uno o varios portaobjetos. Coloque un cubreobjetos sobre cada depósito y examínelo al microscopio utilizando el objetivo de 10x y el objetivo de 40x para confirmar cualquier diagnóstico inseguro.

En la presente tesis solo se cuantificó las distintas especies de huevos de helmintos mas no se identificó cada una de ellas por separado ni tampoco se

realizó la viabilidad de los mismos. Debido a la ausencia de productos controlados con esta metodología no hubo complicaciones en conseguir los reactivos requeridos para el análisis. La malla metálica de 150 μm se encontró disponible en las galerías “Las Malvinas” y para el filtro de 20 μm se usó papel Whatman N°41 que tiene esa capacidad de retención.

3.8 Análisis de Metales Pesados

Se efectuó un análisis de los ocho metales pesados contemplados en la normativa peruana para el reaprovechamiento de los lodos residuales D.S. N° 015-2017 (ver Anexo C) en el laboratorio Baltic Control CMA (ver Anexos H e I). El análisis se realizó en el humus, es decir, el lodo tratado al término del estudio, después de tres meses de tratamiento continuo en el lecho construido en la PTAR San Pedro de Ancón, y en las lombrices que digirieron el lodo residual.

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.1 Resultados de la Prueba de Aceptación

Los resultados, según la caracterización, indicaron que el lodo de la PTAR San Pedro de Ancón se encontraba dentro de los parámetros de humedad, pH y temperatura adecuados para el desarrollo de la lombricultura.

La caracterización del lodo residual de la PTAR Puente Piedra incluso cuando se encontraba bajo las condiciones para el desarrollo de la lombricultura, falló la prueba de aceptación del lodo, las lombrices escaparon en las dos repeticiones que se realizó en menos de 24 horas. En un recipiente en menos de 4 horas ya habían escapado las cinco lombrices y en el otro en 6 horas escaparon cuatro lombrices y en menos de 12 horas escapo la restante. Se separó el lodo por nueve días para reiniciar la prueba, como indica la prueba de aceptación, pero el lodo en un par de días ya mostraba una elevada putrefacción, presencia de larvas de vectores y olor amoniacal. No se continuó el tratamiento de los lodos de la PTAR Puente Piedra con la lombricultura.

En resumen, la prueba de aceptación de los lodos de la PTAR San Pedro de Ancón resultó exitosa al contrario de la de los lodos de la PTAR Puente Piedra.

Las siguientes tablas muestran los resultados de la caracterización del lodo residual y el registro de la prueba de aceptación del lodo como nuevo sustrato de las dos PTAR:

Tabla 7

Caracterización del lodo residual

Parámetro	Lodo PTAR San Pedro de Ancón	Lodo PTAR Puente Piedra
Humedad	91.24%	76.99%
Temperatura	18.7	18.6
pH	6.9	7.47
Solidos totales	8.76%	23.01%
Solidos volátiles	64.47%	71.56%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Resultados de la Prueba de Aceptación del lodo residual como nuevo sustrato

Registro de Prueba de Aceptación									
Lodo	N°	pH	Temp. (°C)	Tiempo transcurrido					
				24 h		48h		10 ^{mo} día	
				M	T	M	T	M	T
PTAR San Pedro de Ancón	1	6.9	18.7	-	1	-	-	-	-
	2			-	-	-	-	-	
PTAR Puente Piedra	1	7.47	18.6	-	5	-	-	-	-
	2			-	5	-	-	-	

M: Numero de lombrices muertas

T: Número de lombrices en la trampa

Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis Fisicoquímico

En la siguiente tabla se muestra el registro de la temperatura y pH en un total de veintidós semanas consecutivas, tomadas una vez a la semana aproximadamente a las 9:00am durante el periodo de setiembre del 2019 a marzo del 2020.

Tabla 9

Medición de la temperatura y pH del lodo residual.

Semana	Temp. (°C)	pH
0	18.6	7.2
1	18.5	7
2	18.1	6.9
3	18.6	7.2
4	18.5	7
5	18.6	7.1
6	18.7	7.1
7	19.1	7.2
8	18.9	7.1
9	19.2	7.2
10	19.4	7.1
11	19.6	7

12	19.8	7.2
13	20.1	7.1
14	20.6	7.2
15	21.5	7.1
16	22.3	7
17	23.6	7.1
18	24.1	7
19	24.7	7
20	25.3	6.9
21	25.4	7
22	26.1	7

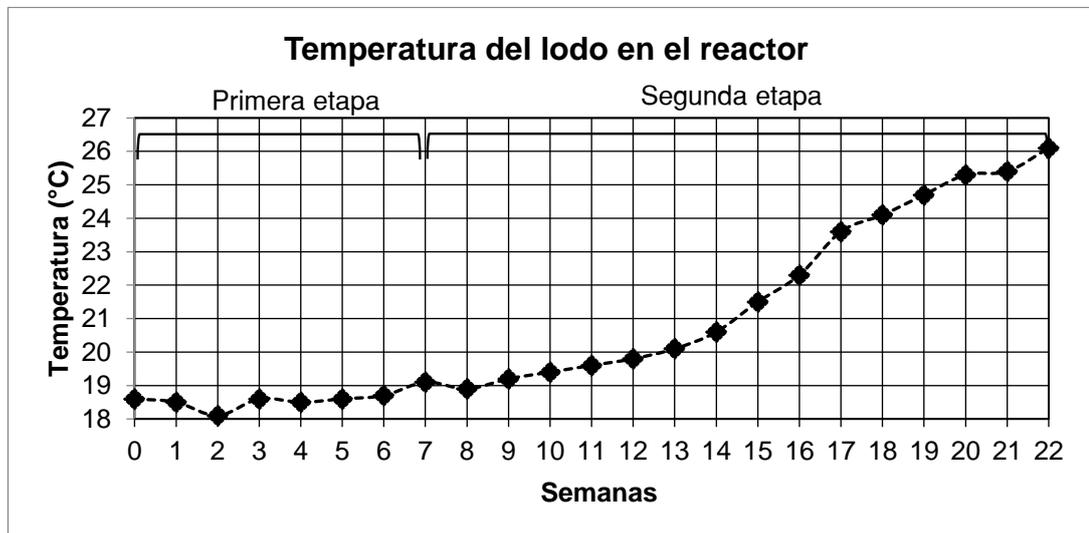
Fuente: Elaboración propia

4.2.1 Temperatura del Lodo

En la Figura 10 se observa la variación de la temperatura durante las veintidós semanas de la investigación dividida en dos etapas, la primera hasta la séptima semana y la segunda etapa desde la séptima semana hasta la vigésimo segunda:

Figura 10

Variación de la Temperatura del lodo en exceso utilizado para la Lombricultura



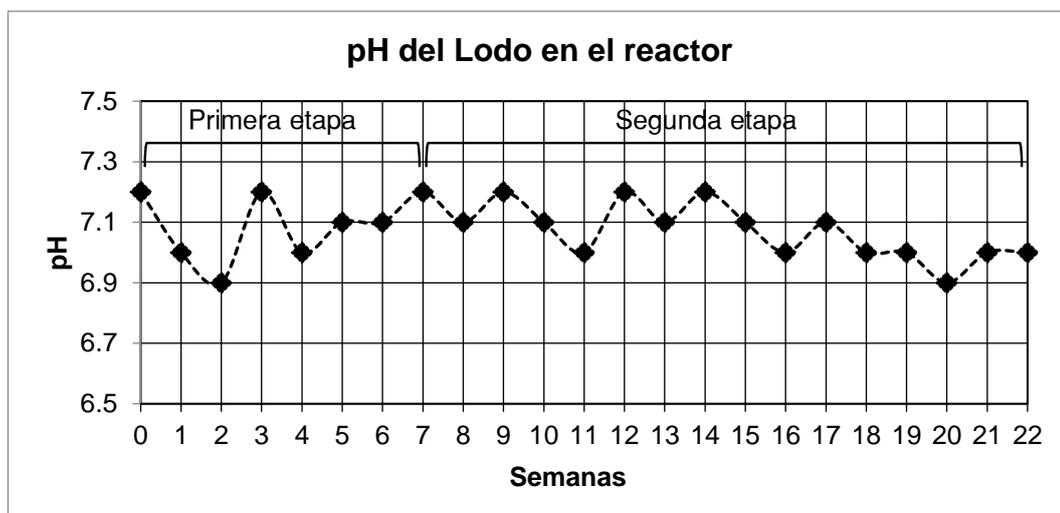
Fuente: Elaboración propia

4.2.2 PH

En la Figura 11 se observa la variación del pH durante las veintidós semanas de la investigación dividida en dos etapas, la primera hasta la séptima semana y la segunda etapa desde la séptima semana hasta la vigésimo segunda:

Figura 11

Medición del pH en el lodo en exceso



Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Humedad

La humedad inicial corresponde al lodo en exceso que ha sido secado durante tres semanas en el lecho de secado que luego fue agregado en el lombricario para su tratamiento.

Tabla 10

Reducción de la humedad

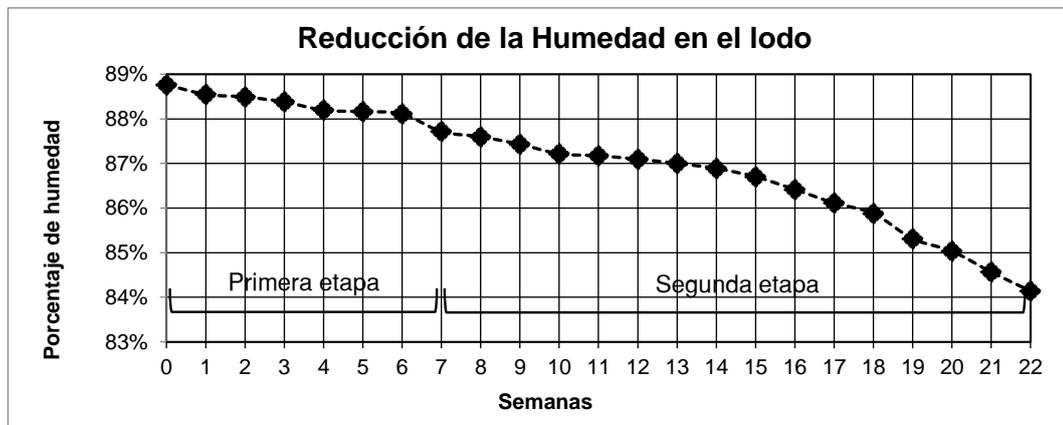
Semana	%Humedad
0	88.77%
1	88.55%
2	88.49%
3	88.38%
4	88.20%
5	88.16%
6	88.11%
7	87.72%

8	87.60%
9	87.43%
10	87.22%
11	87.17%
12	87.10%
13	87.00%
14	86.89%
15	86.70%
16	86.42%
17	86.11%
18	85.88%
19	85.31%
20	85.03%
21	84.57%
22	84.14%

Fuente: Elaboración propia

Figura 12

Reducción de la humedad del lodo en exceso



Fuente: Elaboración propia

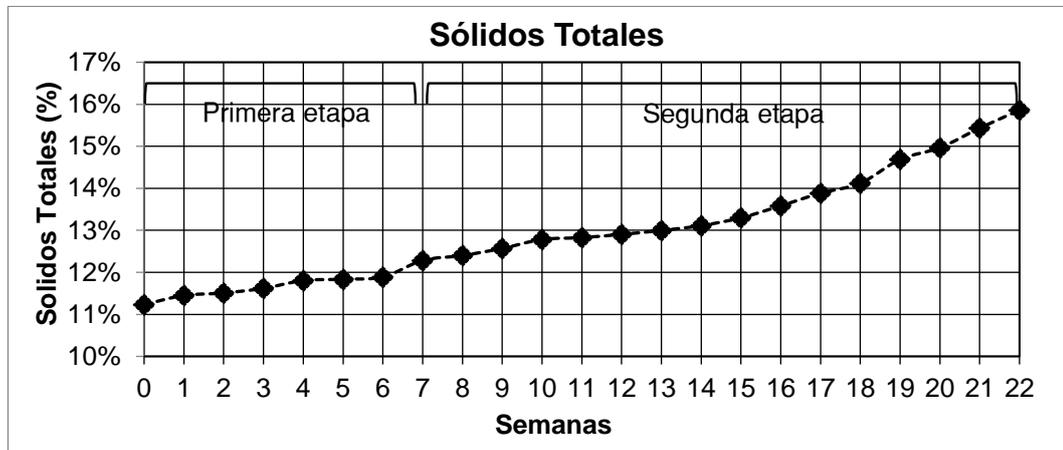
4.2.4 Sólidos Totales, Fijos y Volátiles Totales

El monitoreo de los sólidos totales es esencial, la variación de cada semana indicaba que cantidad se iba a requerir en lodo húmedo para calcular la cantidad de lodo seco presente para los distintos análisis microbiológicos que se realizó en la investigación.

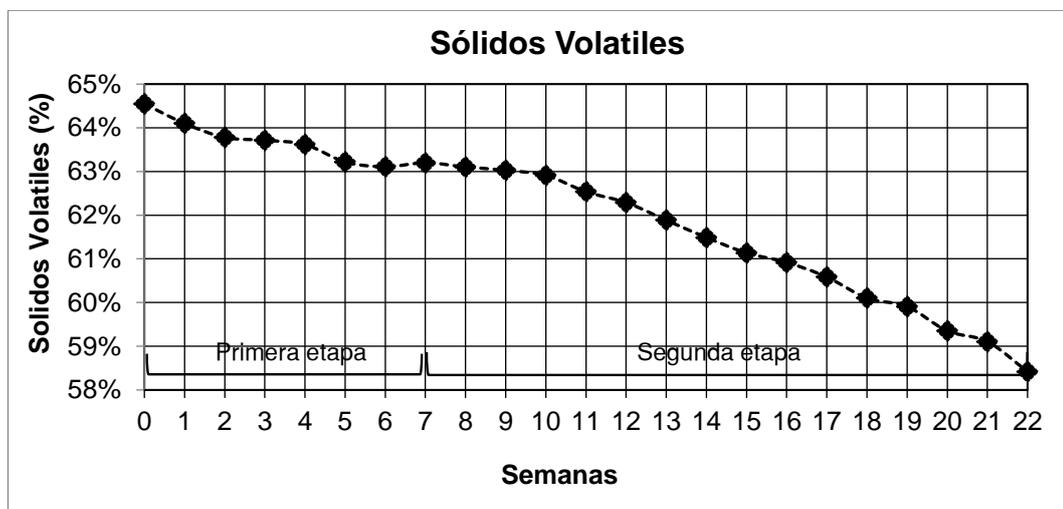
Tabla 11*Determinación de Sólidos Totales, Fijos y Volátiles Totales*

Semana	%ST	%SV	%SF
0	11.23%	64.55%	35.45%
1	11.45%	64.10%	35.90%
2	11.51%	63.78%	36.22%
3	11.62%	63.71%	36.29%
4	11.80%	63.62%	36.38%
5	11.84%	63.22%	36.78%
6	11.89%	63.11%	36.89%
7	12.28%	63.20%	36.80%
8	12.40%	63.10%	36.90%
9	12.57%	63.03%	36.97%
10	12.78%	62.91%	37.09%
11	12.83%	62.54%	37.46%
12	12.90%	62.29%	37.71%
13	13.00%	61.89%	38.11%
14	13.11%	61.49%	38.51%
15	13.30%	61.14%	38.86%
16	13.58%	60.92%	39.08%
17	13.89%	60.58%	39.42%
18	14.12%	60.10%	39.90%
19	14.69%	59.91%	40.09%
20	14.97%	59.35%	40.65%
21	15.43%	59.11%	40.89%
22	15.86%	58.42%	41.58%

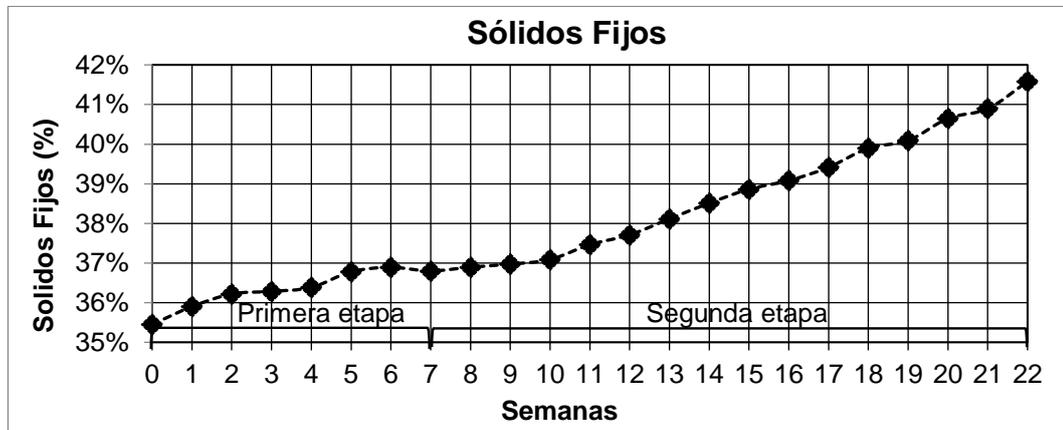
Fuente: Elaboración propia

Figura 13*Determinación de Sólidos Totales (%)*

Fuente: Elaboración propia

Figura 14*Determinación de Sólidos Volátiles (%)*

Fuente: Elaboración propia

Figura 15*Determinación de Sólidos Fijos (%)*

Fuente: Elaboración propia

4.3 Análisis Microbiológico

4.3.1 Coliformes Fecales

Se realizó el análisis en 1 g/ST de lodo residual, previo cálculo semanal del porcentaje de ST presente en la muestra. Se cuantificó mediante la técnica de tubos múltiples o número más probable (NMP) en la prueba directa, utilizando el medio A-1.

Esta investigación se dividió en dos etapas; la primera, comprendido entre la semana 0 y 6; y la segunda, a partir de la semana 7 en adelante. En la primera etapa se llega a una eficiencia del 97.82% y en la etapa 2, comprendido entre la semana 7 a la 20, también se alcanza una eficiencia del 97.82%. Esto es fácilmente observable en la Figura 16.

Tabla 12*Coliformes Fecales (NMP/gST)*

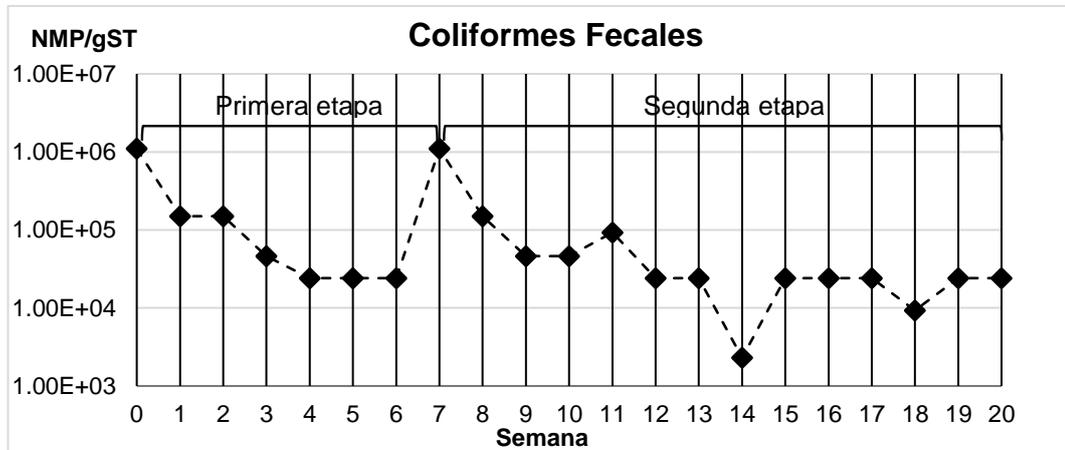
Semana	CF (NMP/g)
0	1.10x10 ⁶
1	1.50x10 ⁵
2	1.50x10 ⁵
3	4.60x10 ⁴
4	2.40x10 ⁴
5	2.40x10 ⁴

6	2.40x10 ⁴
7	1.10x10 ⁶
8	1.50x10 ⁵
9	4.60x10 ⁴
10	4.60x10 ⁴
11	9.30x10 ⁴
12	2.40x10 ⁴
13	2.40x10 ⁴
14	2.30x10 ³
15	2.40x10 ⁴
16	2.40x10 ⁴
17	2.40x10 ⁴
18	9.30x10 ³
19	2.40x10 ⁴
20	2.40x10 ⁴

Fuente: Elaboración propia

Figura 16

Cuantificación de Coliformes Fecales (NMP/gST)



Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Salmonella spp

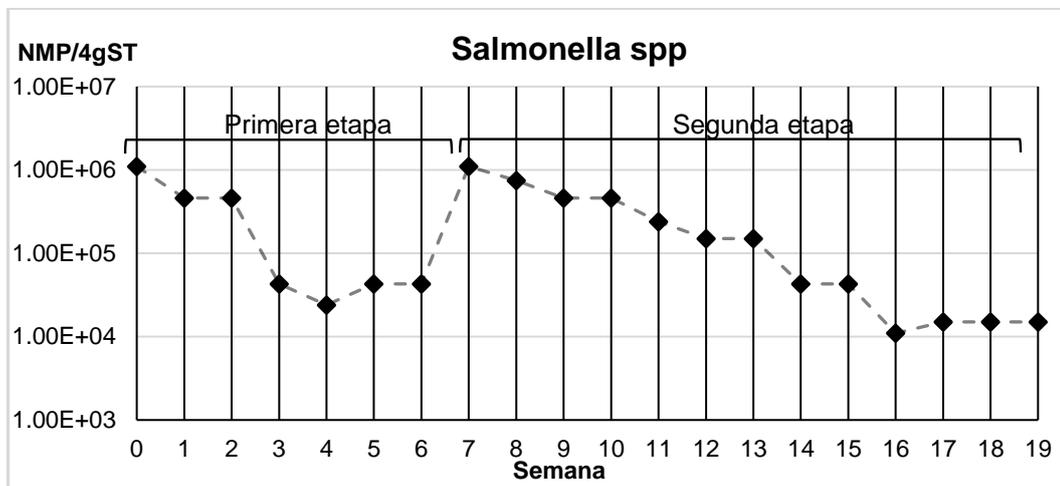
Se realizó el análisis en 4 g/ST de lodo residual según lo recomendado en la Normativa mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 siendo la medición solo cuantitativa, previo calculo semanal del porcentaje de ST presente en la muestra.

Tabla 13*Salmonella spp (NMP/4gST)*

Semana	Salmonella spp (NMP/4gST)
0	1.10x10 ⁶
1	4.60x10 ⁵
2	4.60x10 ⁵
3	4.30x10 ⁴
4	2.40x10 ⁴
5	4.30x10 ⁴
6	4.30x10 ⁴
7	1.10x10 ⁶
8	7.50x10 ⁵
9	4.60x10 ⁵
10	4.60x10 ⁵
11	2.40x10 ⁵
12	1.50x10 ⁵
13	1.50x10 ⁵
14	4.30x10 ⁴
15	4.30x10 ⁴
16	1.10x10 ⁴
17	1.50x10 ⁴
18	1.50x10 ⁴
19	1.50x10 ⁴

Fuente: Elaboración propia

En la etapa 1, comprendido entre la semana 0 a la 6, se llega a una eficiencia del 96.04% y en la etapa 2, comprendido entre la semana 7 a la 19 llega a una eficiencia del 98.64%.

Figura 17*Salmonella spp (NMP/4gST)*

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Huevos de helmintos

Se realizó el análisis en 1 g/ST de lodo residual, previo calculo semanal del porcentaje de ST presente en la muestra. En la etapa 1, semana inicial a la semana 6, se obtuvo una eficiencia en la reducción de huevos de helmintos de 86.51% mientras que en la etapa 2, semana 7 hasta la semana 19, se obtuvo una eficiencia del 96.12%.

Se muestra la variación del conteo de huevos de helmintos en la Figura 18 y como la lombriz *Eisenia foetida* redujo cada semana este parámetro.

Tabla 14*Cuantificación de Huevos de helmintos (HH/gST)*

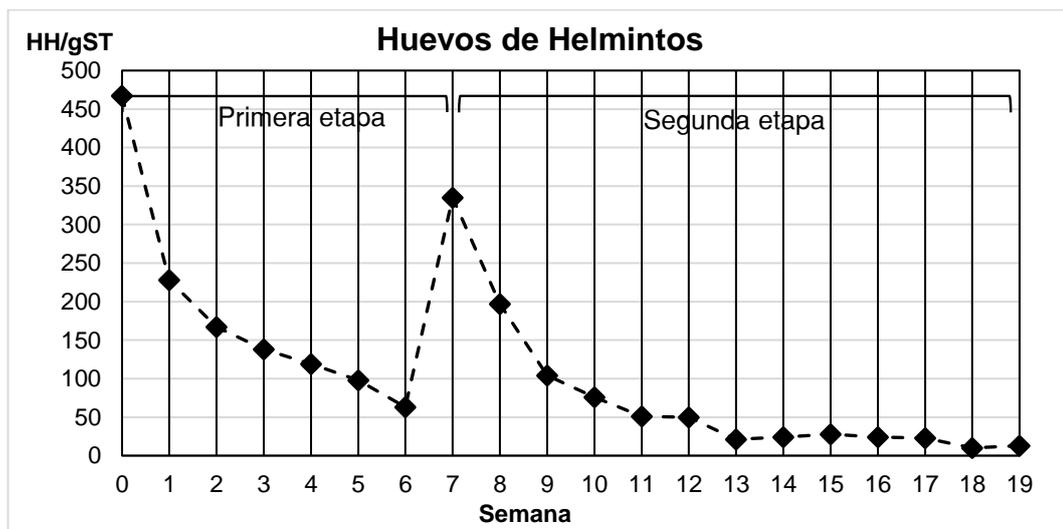
Semana	Huevos de helmintos (HH/gST)
0	467
1	228
2	167
3	138
4	119
5	98
6	63
7	335

8	197
9	104
10	76
11	51
12	50
13	21
14	24
15	28
16	24
17	23
18	10
19	13

Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Huevos de Helmintos (HH/gST)



Fuente: Elaboración propia

Además de los análisis realizados se observó algunas características no medibles como la sensación de olor, aunque el lodo crudo nunca tuvo un olor intenso era ligeramente desagradable, al pertenecer a un tratamiento aeróbico, la poca intensidad del olor con las semanas se convertía a uno parecido al de la tierra húmeda. Otra observación adicional fue la presencia de pequeñas larvas que estaban en el lodo y que fueron desapareciendo con los días y que luego de dos semanas ya no eran visibles.

4.4 Análisis de Metales Pesados

El análisis de metales pesados fue realizado en el humus de lombriz, que es el lodo tratado por la lombricultura, y en la lombriz *Eisenia foetida* en el laboratorio Baltic Control CMA:

Tabla 15

Análisis de Metales Pesados en el Humus y en la lombriz Eisenia Foetida

PTAR San Pedro de Ancón				
Parámetro	Unidad	Humus	Lombriz	D.S. 015-2017
Arsénico	mg/kg	0.009	0.009	40
Cadmio	mg/kg	1.41	1.32	40
Cobre	mg/kg	721.67	490.9	1500
Plomo	mg/kg	28.05	28.55	400
Mercurio	mg/kg	0.001	0.001	17
Níquel	mg/kg	6.8	6.35	400
Zinc	mg/kg	85.07	82.8	2400
Cromo total	mg/kg	39.63	61.37	1200

Fuente: Laboratorio Baltic Control CMA SA

CAPITULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 PH y Temperatura

Las lecturas de pH y temperatura durante el estudio, presentadas en la Tabla 9; según Schuldt (2006) estuvieron en el rango óptimo de desarrollo de la lombriz *Eisenia foetida* teniendo en promedio un pH neutro de 7 y una temperatura de 20.8°C. Hait y Tare (2011) encontraron que la remoción de patógenos con lombriz *Eisenia foetida* eran mayores a temperaturas cercanas a 20°C y con una elevada humedad, alrededor del 90%, considerando que en esta investigación el promedio de la temperatura y la humedad fueron de 20.8°C y 87% respectivamente se puede inferir entonces que la remoción en esta investigación se encuentra dentro del rango óptimo de remoción de patógenos

5.2 Humedad y Solidos Totales

Se observa en la Tabla 10 que la humedad es óptima para el desarrollo de la lombriz *Eisenia foetida* y casi se mantiene constante solo bajando cuatro puntos porcentuales durante todo el monitoreo. Debido a que se trabajó con un lodo de humedad inicial de 88.77% no fue necesario secarlo ni tampoco agregar ninguna cantidad de agua en ningún momento llegando en las últimas semanas hasta casi un 84%, encontrándose en todo momento en el rango óptimo para el desarrollo de la lombricultura. Aunque se considera que una humedad del 84% no es ideal para una disposición final a un relleno, si lo es para aplicarlo en los suelos, sobre todo, sobre uno árido como lo es en Ancón. Los sólidos totales fueron aumentando lentamente debido a la deshidratación, este parámetro es influenciado por la cantidad de agua que contiene el lodo que tan solo disminuyó 4.63%.

5.3 Solidos Fijos y Volátiles Totales

En la reducción de los sólidos volátiles se observa que el porcentaje se redujo de 64.55% a 58,42% en las 22 semanas lo cual lo indica que las lombrices estabilizan de manera gradual según van digiriendo el lodo y excretándolo como humus. De acuerdo a la normativa nacional, en el Artículo 12 del D.S. N°015-2017-VIVIENDA (ver Anexo C), se considera que un lodo está estabilizado y apto para su reaprovechamiento como biosólido cuando posee una concentración de 60% o menor de solidos volátiles y este resultado se alcanzó en la semana 18 (ver Tabla 11), después de tres meses de aplicarse el lodo en la segunda etapa. Frente a lo

mencionado se acepta la hipótesis de reducción de sólidos volátiles (aumento de sólidos fijos), la lombricultura con *Eisenia foetida* estabiliza los lodos residuales al reducir su fracción orgánica (sólidos volátiles). Khwairakpam y Bhargava (2009) expresan que el incremento de sólidos fijos se debe a que las lombrices consumen los residuos con una buena tasa de digestión además que también la asimilación microbiana está realizando el proceso de descomposición. En tal sentido, según lo observado en estos resultados se verifica que a medida que pasa el tiempo mejor se estabilizará el lodo, es decir, aumentará del contenido de sólidos fijos (disminución de sólidos volátiles en contraparte). Y esto se confirma con el análisis realizado al lodo que ha tenido cuatro meses en la etapa 2 de digestión llegando al 58.42% en sólidos volátiles que representa una disminución del 9.49% lo cual se encuentra dentro del rango de reducción de sólidos volátiles (7.6–15.2%) mostrados por Hait y Tare (2011).

5.4 Coliformes fecales

En la investigación se pudo encontrar que la reducción de coliformes fecales en 35 días (entre la semana 7 y la semana 12) fue de 1.1×10^6 a 2.4×10^4 (Tabla 12), con lo cual se alcanzó una eficiencia de remoción del 97.82%, esta concentración se mantuvo regularmente durante las ocho semanas siguientes hasta el final (hasta la semana 20); sin embargo, hubo dos lecturas que se registró 2.3×10^3 NMP/gST y 9.3×10^3 NMP/gST en la semana 14 y 18 respectivamente (Tabla 12) probablemente se deba a que las muestras fueron tomadas de manera puntual y estos dos registros fueron de casi 100% humus. En la Figura 16 se muestra que la lombriz *Eisenia foetida* es capaz de reducir los coliformes fecales presentes en el lodo residual a medida que va digiriéndolo y transformándolo en humus. Frente a lo mencionado, se rechaza la hipótesis de investigación, que refiere que la lombricultura con *Eisenia foetida* reduce la concentración de coliformes fecales presentes en los lodos en exceso en más del 99%, como lo corroboraron Khwairakpam y Bhargava (2009) quienes llegaron a una concentración final de coliformes fecales de 2.3×10^3 NMP/gST en 45 días con una eficiencia de remoción del 99.9% y que la reducción se debe a que los coliformes fecales ingresan a la cadena alimentaria de la lombriz. En tal sentido, se concluye que la lombricultura con *Eisenia foetida* aunque produce resultados óptimos en la remoción de

coliformes fecales presentes en el lodo residual aeróbico no lo remueve en más del 99%.

5.5 Salmonella spp

En el análisis de Salmonella spp se encontró que la concentración mínima fue de 1.5×10^4 NMP/4gST que se alcanzó en nueve semanas de tratamiento (Figura 17). La eficiencia de remoción lograda para la Salmonella spp es de 98.64%. Se verifica la hipótesis, la lombricultura con *Eisenia foetida* reduce la concentración de Salmonella spp en más del 97%. Hait y Tare (2011) encontraron en su estudio que la lombriz *Eisenia foetida* removía la Salmonella con una eficiencia del 97.88% alcanzando concentraciones finales de menores a 3.6 NMP/gST. Murry y Hinckley (1992) atribuyeron esta reducción a las lombrices (*Eisenia foetida*) debido a que su remoción era muchísimo mayor en su presencia que en su ausencia (8% vs 2% de reducción de salmonella en 48 horas). Al igual que Aguilera (2002), aunque trabajo con lombriz *Eisenia andrei*, encontró que la Salmonella disminuía su concentración al pasar por su tracto digestivo.

5.6 Huevos de helmintos

La cantidad de huevos de helmintos se redujo de 335 HH/gST a 13 hh/gST en doce semanas, considerando la etapa 2 de la semana 7 hasta la semana 19 (Tabla 14), lo cual resulta una eficiencia del 96.12%, la reducción se debió a la digestión de los huevos de helmintos por las lombrices. No se consiguió la reducción propuesta de más del 98% alcanzado por Eastman (2001) que indica una reducción de 98.87%.

Aunque en la última semana de la segunda etapa todavía contenía huevos de helmintos, que pueden causar perjuicio, probablemente se hubiese reducido más si se hubiese expuesto a un secado solar o si se continuaba con el tratamiento.

Considerando la reducción de patógenos (coliformes fecales, salmonella spp y huevos de helmintos), la ausencia de olores desagradables y la reducción de su potencial de putrefacción mediante la reducción de su fracción volátil (sólidos volátiles), se puede decir que la lombricultura estabiliza el lodo residual de la PTAR San Pedro de Ancón.

En general, la reducción de coliformes fecales, salmonella spp y huevos de helmintos (Figura 19) se explica de acuerdo a Edwards et al (2011) a la influencia de las lombrices; los mecanismos por los que pueden reducirse estos patógenos incluyen los efectos directos de la ingestión, la inhibición microbiana por sustancias antimicrobianas o antagonistas microbianos producidos por las propias lombrices, y la destrucción de microorganismos por digestión y asimilación enzimática. Los efectos indirectos pueden incluir la estimulación de especies microbianas endémicas o de otro tipo que conduzcan a la competencia, el antagonismo, la actividad fagocitaria tanto dentro de la lombriz como fuera de ella, la producción de sustancias antimicrobianas como los ácidos húmicos, y otros numerosos mecanismos posibles. Otra razón por la reducción de patógenos, la podemos explicar con Hartenstein (1981) cuando expresa que las concentraciones cada vez más altas de fenoles que aparecen durante la humificación son posiblemente menos toleradas por los patógenos que por la biota nativa del suelo. Considerando que las tasas de humificación que tiene lugar durante la etapa de transformación del lodo son mayores y más rápidas durante el vermicompostaje (Kiyasudeen et al, 2016); además que algunas lombrices son capaces de bioactivar compuestos orgánicos para formar fenoles (Paik et al, 1996).

5.7 Metales Pesados

El análisis de metales pesados (Tabla 15), comprueba que la lombriz es un bioacumulador de metales pesados (Shuldt, 2006) albergando en su organismo pequeñas concentraciones de metales pesados y que puede tolerar tales concentraciones e incluso se puede utilizar en algunos casos como biorremediador (Zapata et al, 2017) al reducir sus concentraciones como muestran diversos estudios (Khwairakpam y Bhargava, 2009; Suthar, 2009). Aunque las lombrices de tierra pueden reducir eficazmente la disponibilidad de metales en los lodos y que pueden utilizarse para las prácticas de restauración de suelos, Suthar y Singh (2009) indican que no se debe omitir una elevada concentración de metales bioconcentrados en los tejidos de las lombrices y que esta junto con su posible impacto en el ecosistema del suelo deberían ser una prioridad de investigación en el campo de la vermitecnología. En nuestro caso, las concentraciones de metales pesados presentes en el humus no son significativas

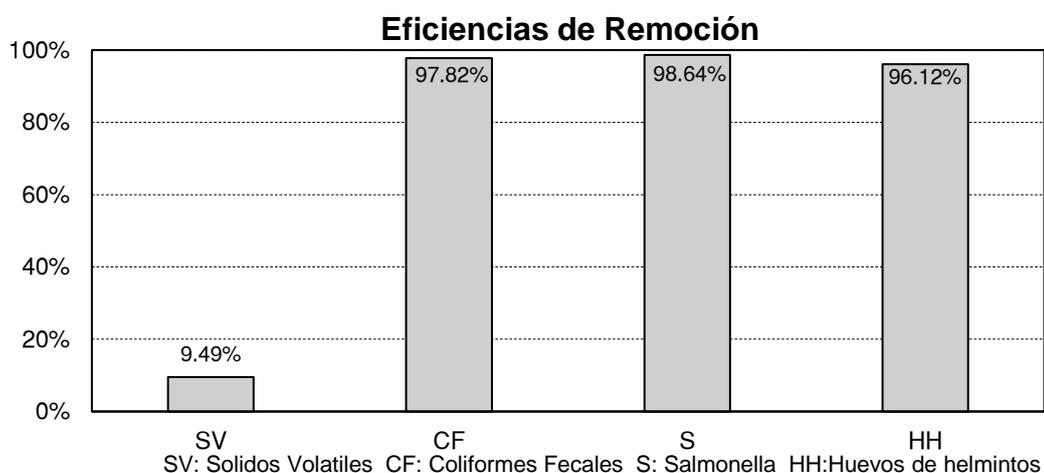
y están muy por debajo de las exigencias de la normativa peruana para su reaprovechamiento (ver Anexo C).

- EVALUACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LA HIPÓTESIS

A continuación, se resume la evaluación de la hipótesis:

Figura 19

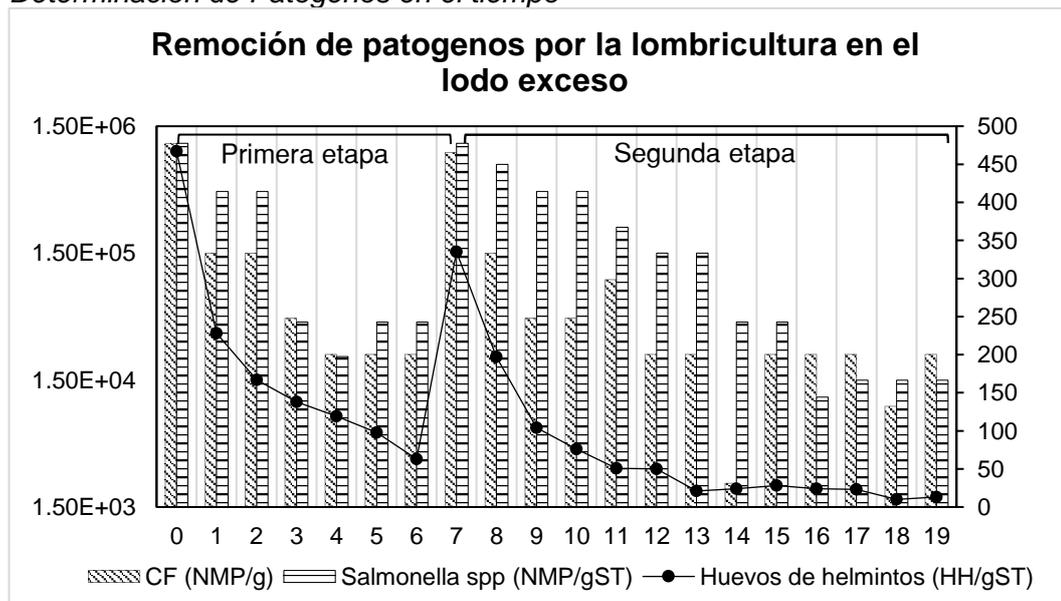
Resumen de las Eficiencias de Remoción de los Parámetros Monitoreados



Fuente: Elaboración propia

Figura 20

Determinación de Patógenos en el tiempo



Fuente: Elaboración propia

La Figura 19 muestra las remociones alcanzadas en esta investigación, según lo observado podemos evaluar el cumplimiento de la hipótesis planteada:

Se confirma la hipótesis respecto a los sólidos volátiles, estas se encuentran en el rango esperado, alcanzando una reducción del 9.49% (7.6-15%).

La remoción de coliformes fecales no alcanzó la hipótesis planteada, aunque se llegó a remoción moderada de 97.82% no se acercó a los niveles esperados (más del 99%); se rechaza la hipótesis.

La reducción de *Salmonella* spp se encontró en el rango esperado, se acepta la hipótesis. La lombricultura con *Eisenia foetida* removió en más del 97% la concentración de *Salmonella* spp en los lodos en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón.

La remoción de huevos de helmintos (96.12%), no alcanzó el rango planteado (98-99%). Se rechaza la hipótesis, sin embargo, es muy posible que si se hubiese continuado con el tratamiento se hubiese alcanzado la hipótesis planteada, lo cual no se pudo concluir por el inicio de la pandemia lo que resultó en el cese de actividades de la Universidad Nacional de Ingeniería y por ende el de los laboratorios.

1. Efecto de la adición del lodo en la segunda etapa

El lodo en exceso agregado en la segunda etapa causó cambios variables en el reactor. La reducción de los sólidos volátiles tuvo un aumento del 0.14%. La reducción de coliformes fecales fue afectada por la adición, tras haber llegado a las concentraciones mínimas de 2.4×10^4 NMP/gST se regresó a la concentración inicial de 1.1×10^6 NMP/gST. Sin embargo, la curva de reducción de la segunda etapa fue muy parecida a la primera. La reducción de *Salmonella* spp al igual que la de coliformes fecales fue interferida por la adición de nuevo lodo; durante la primera etapa se redujo rápidamente; en tres semanas se alcanzó la concentración de 4.3×10^4 NMP/gST, lo cual en la segunda etapa tal valor fue alcanzado en siete semanas. La segunda etapa tuvo una remoción más lenta, pero de resultados similares. La reducción de huevos de helmintos fue interferida de manera similar al de los coliformes fecales y *Salmonella* spp, Aunque luego de la adición del lodo la reducción continuó de manera similar al de la primera etapa.

2. Clasificación del lodo tratado según la normativa nacional

Según la normativa nacional DS 015-2017-VIVIENDA, el lodo en exceso tratado por la lombricultura utilizando *Eisenia foetida* se encuentra dentro de las características de un biosólido clase B, cuyo reaprovechamiento corresponde a fines agrícolas para plantas de tallo alto, forestales, reforestales, mejorador de suelos, etc.

3. Evaluación de la calidad del humus producido

El humus de lombriz producto del lodo está estabilizado, se redujo notoriamente los patógenos, no presenta malos olores, sino el olor característico a tierra húmeda que corresponde a la humificación del sustrato, su fracción volátil ha disminuido, se puede decir en definitiva que el humus es más estable que el lodo en exceso.

4. Crecimiento de las lombrices

Aunque no formó parte de esta investigación supervisar el crecimiento poblacional de las lombrices en el lodo, se contabilizó los dos primeros meses el desarrollo de cocones y juveniles. No hubo ninguna muerte durante las dos etapas.

Tabla 16

Crecimiento Poblacional de Lombrices

Crecimiento poblacional de lombrices			
Mes	Cocones	Juveniles	Adultos
0	0	0	30
1	48	1	30
2	154	37	30

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La investigación realizada determinó una moderada eficiencia de remoción de la lombricultura usando *Eisenia foetida* para el tratamiento de los lodos en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón, debido a que, redujo significativamente las concentraciones de sólidos volátiles, coliformes fecales, salmonella spp y huevos de helmintos. Sin embargo, la hipótesis planteada se cumplió parcialmente, puesto que, no todos los parámetros alcanzaron las remociones esperadas.

La calidad de los lodos residuales de la PTAR San Pedro de Ancón cumplió con las condiciones para el crecimiento de la lombriz *Eisenia foetida* porque se encontró en el rango óptimo de desarrollo; además que, durante la investigación, no se registró muertes en lombrices, por el contrario, se observó presencia de cocones y juveniles.

Se evaluó las características del humus producido y estos corresponden a una clasificación, según la normativa nacional, de biosólido clase B, es decir, un reaprovechamiento con restricciones y aplicable con fines forestales o mejorador de suelos. Por lo tanto, la lombricultura con *Eisenia foetida* corresponde a un tratamiento para los lodos en exceso de la PTAR San Pedro de Ancón que genera un biosólido clase B y requiere un tratamiento adicional si se desea llevarlo a la clase A.

Durante el proceso de lombricultura se redujo la concentración de los metales pesados, debido a que la lombriz *Eisenia foetida* lo bioacumuló en sus tejidos, además de ser capaz de tolerarlo durante su desarrollo.

RECOMENDACIONES

Los lodos que cumplan con las condiciones teóricas para el desarrollo de la lombriz roja californiana en un posible tratamiento con lombricultura, deberían de aplicar la prueba de aceptación para verificar su normal desarrollo en un lodo en exceso como nuevo sustrato.

No debe incorporarse nuevo sustrato (lodos en exceso) por al menos cinco semanas con el fin de no interrumpir la remoción óptima de coliformes fecales contenidos en el lodo inicial o nueve semanas si no se desea interrumpir con la remoción de *Salmonella* spp.

Se recomienda realizar un estudio de comparación de tasas superficiales para conocer la aplicación óptima de lombrices por área y un estudio de capacidad de porte del lodo para revelar el número de lombrices que pueda albergar el lodo como sustrato.

Un humus con concentraciones elevadas de metales pesados no debe ingresar a la cadena alimentaria humana, se recomienda su aplicación a forestaciones. Aun cuando las lombrices de tierra pueden reducir la concentración de metales en los lodos, que pueden utilizarse posteriormente para prácticas sostenibles de restauración del suelo, un nivel elevado de metales bioacumulados en las lombrices para uso como fuente de proteínas puede ser riesgoso, se recomienda una evaluación de tal riesgo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, R. (2002). *El potencial bactericida de la lombriz roja californiana Eisenia andrei*. [Tesis de grado, Universidad de Guadalajara].
<http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/handle/123456789/2953>
- Alcañiz, J. M., Ortiz, O. y Carabassa, V. (2009). *Utilización de lodos de depuradora en restauración: Manual de aplicación en actividades extractivas y terrenos marginales*. Agencia Catalana del Agua.
http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/empresa_i_producio_sostenible/restauracio_dactivitats_extractives/index.html
- Alianza por el agua. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Zaragoza: Ideasmares.
- Andreoli, C., Von Sperling M. y Fernandes, F. (2007). *Biological Wastewater treatment (vol. 6: Sludge treatment and disposal)*. Londres: IWA Publishing.
- APHA-AWWA-WEF. (2017). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association.
- Berrios, M. (2019). *Vermiestabilización de lodos activados secundarios generados en plantas de tratamiento de aguas residuales con lagunas aireadas utilizando Eisenia foetida L. para el reaprovechamiento en la agricultura*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Brown, G. (2000). Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European Journal of Soil Biology*, 36 (3-4), 177-198. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(00\)01062-1](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(00)01062-1)
- Castañeda, W. (2018). *Uso de la Lombriz Roja (Eisenia foetida) en lodos activados de la PTAR "San Antonio de Carapongo" y residuos orgánicos para la producción de humus- Lima 2018*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/34590>
- Decreto Supremo N°015-2017 [Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento]. Reglamento para el Reaprovechamiento de los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. 22 de junio de 2017.

- Eastman, B. R., Kane, P. N., Edwards, C. A., Trytek, L., Gunadi, B., Stermer, A. L. y Mobley, J. R. (2001). The Effectiveness of Vermiculture in Human Pathogen Reduction for USEPA Biosolids Stabilization. *Compost Science & Utilization*, 9 (1), 38-49.
<https://doi.org/10.1080/1065657X.2001.10702015>
- Edwards, C. A., Arancon, N. Q. y Sherman, R. (2011). *Vermiculture Technology: Earthworms, organic wastes and environmental management*. Florida: CRC Press.
- Fair, G., Geyer, J. y Okun D. (2008). *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales: purificación de aguas y tratamiento de aguas residuales*. México D. F.: Limusa.
- Ferruzi, C. (2007). *Manual de lombricultura* (4ta Reimpresión). Madrid: Mundi-Prensa.
- Garrido, J. y Rojas S. (2008). *Alternativas de uso y disposición de Biosólidos y su impacto en las tarifas de Agua* [Tesis de grado, Universidad de Chile]. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/107940>
- Grajales, S., Monsalve, J. y Castaño, J. (2006). Programa de manejo integral de los lodos generados en la planta de Tratamiento de aguas residuales de la universidad tecnológica de Pereira. *Scientia Et Technica*, 2(31), 285-290. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911639049>
- Hait, S. y Tare, V. (2011). Optimizing vermistabilization of waste activated sludge using vermicompost as bulking material. *Waste Management*, 31 (3), 502-511. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.004>
- Hartenstein, R. (1981). Sludge decomposition and stabilization. *Science*, 212 (4496), 743-749. <https://doi.org/10.1126/science.212.4496.743>
- Khwairakpam, M. y Bhargava, R. (2009). Vermitechnology for sewage sludge recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 948-954. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.088>
- Kiyasudeen, K., Hakimi, M., Quaik, S. y Ismail, A. (2016). Prospects of organic waste management and the significance of earthworms. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24708-3>
- Loose, D. (2016). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de*

servicios de saneamiento. <https://www.sunass.gob.pe/sunass-te-informa/publicaciones/aguas-residuales/>

- López, C., Buitrón, G., García, H. y Cervantes, F. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- Marín, A. y Osés, M. (2013). *Operación y Mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados*. Comision Estatal del Agua de Jalisco.
- Marquina, L. y Martinez J. (2016). *Obtención de abonos orgánicos por medio de las lombrices "Eisenia foetida" a partir de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales San Antonio de Carapongo Lima-Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Callao]. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/1745>
- Martínez De La Cerda, J. (2003). *Efecto del lodo residual en el rendimiento y concentración de metales pesados de hortalizas y granos básicos* [Tesis de grado, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/5905/1/1020150704.PDF>
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and resource recovery*. New York: Mc Graw Hill.
- Ministerio del Ambiente. (02 de agosto 2021). *Listado de rellenos sanitarios*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/279709-listado-de-rellenos-sanitarios-a-nivel-nacional>
- Moodley, P., Archer, C. y Hawksworth, D. (2008). *Standards methods for the recovery and enumeration of helminth ova in wastewater, sludge, compost and urine-diversion waste in South Africa*. Water Research Commission. <http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT%20322-web.pdf>
- Murry, A. y Hinckley, L. (1992). Effect of Earthworm (*Eisenia foetida*) on Salmonella enteritidis in Horse Manure. *Bioresource Technology*, 41 (2), 97-100. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90176-X](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90176-X)
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. Protección ambiental, lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de

- contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. 15 de agosto de 2003. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ecol/semarnat004.pdf>
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1 (1), 51-58.
http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf
 - Paik, S., Cho, E., Yu, K., Kim, Y., Suh, J. y Chang, C. (1996). Endogenous phenoloxidase purified from an earthworm, *Lumbricus rubellus*. *Korean Journal of Zoology*, 39 (1), 36-46.
<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO199611919893354.pdf>
 - Pedersen, J. y Hendriksen, N. (1993). Effect of passage through the intestinal tract of detritivore earthworms (*Lumbricus* spp.) on the number of selected Gram-negative and total bacteria. *Biology and Fertility of Soils*, 16(3), 227-232. <https://doi.org/10.1007/BF00361413>
 - Resolución Ministerial N°093-2018 [Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento]. Protocolo de Monitoreo de biosólidos. 13 de marzo de 2018.
 - Rojas, R. y Mendoza, L. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Produccion+Limpia*, 7(2), 74-94.
<http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a06.pdf>
 - Romero, J. A. (2013). *Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela colombiana de Ingeniería.
 - Schuldt, M. (2006). *Lombricultura: teoría y práctica*. Madrid: Mundiprensa.
 - Shammas, N. y Wang, L. (2011). *Water supply and Wastewater removal: Fair, Geyer, and Okun's Water and Wastewater Engineering*. New Jersey: Wiley.
 - Suthar, S. (2009). Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugarcane trash. *Journal of Hazardous Materials*, 163(1), 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.106>
 - Suthar, S y Singh, S. (2009). Bioconcentrations of Metals (Fe, Cu, Zn, Pb) in Earthworms (*Eisenia fetida*), Inoculated in Municipal Sewage Sludge: Do Earthworms pose a possible risk of terrestrial food chain

contamination? *Environmental Toxicology*, 24(1), 25-32.

<https://doi.org/10.1002/tox.20388>

- Tineo, A. (1994). *Crianza y manejo de lombrices de tierra con fines agrícolas*. Costa Rica: CATIE.
- Vélez, J. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción + Limpia*, 2(2), 57-71. <http://hdl.handle.net/10567/532>
- Ujang, Z. y Henze, M. (2006). *Municipal wastewater management in developing countries: Principle and engineering*. Londres: IWA Publishing.
- US Environmental Protection Agency. (2003). *Environmental regulations and technology: Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*. <https://www.epa.gov/biosolids/control-pathogens-and-vector-attraction-sewage-sludge>
- US Environmental Protection Agency. (1999). *Biosolids generation, use, and disposal in the United States*. <https://www.epa.gov/biosolids/biosolids-generation-use-and-disposal-united-states>
- US Environmental Protection Agency. (1993). *Standards for the use or disposal of sewage sludge*. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2018-title40-vol32/xml/CFR-2018-title40-vol32-part503.xml>
- Zagal, E. y Sadzawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Universidad de Concepción. http://www.sag.cl/sites/default/files/METODOS_LODOS_SUELOS.pdf

ANEXOS

Anexo A. Tecnologías de estabilización para biosólidos. D.S. N°015-2017-VIVIENDA

Anexo I

Tecnologías de estabilización para biosólidos

De acuerdo con el párrafo 12.1 del artículo 12 del presente Reglamento, los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se consideran estabilizados y aptos para su reaprovechamiento como biosólidos cuando la relación de Sólidos Volátiles (SV) a Sólidos Totales (ST) sea menor o igual que sesenta por ciento (60 %) (0,6). Las tecnologías que permiten cumplir con el parámetro indicado son:

1. **Proceso de tratamiento de aguas residuales que permitan la permanencia de lodo por varios años:** lagunas de estabilización, lagunas anaerobias, facultativas, aireadas y lagunas utilizando el proceso de fitodepuración.
2. **Procesos de tratamiento de aguas residuales con tiempo prolongado de permanencia de lodo en ambiente aeróbico:** lodos activados por aireación extendida, filtro percolador con recirculación del efluente,
3. **Procesos de tratamiento de aguas residuales con tiempo prolongado de permanencia de lodo en ambiente anaerobio:** tanques Imhoff, RAFAML (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente y Manto de Lodos), otros sistemas anaerobios debidamente justificados en los que se demuestre un tiempo prolongado de permanencia de lodos.
4. **Procesos de digestión anaerobia y aerobia de lodos:** digestor de lodo y compostaje de lodo.
Observación: para la eficiencia de estos procesos, los lodos pueden ser mezclados con sustratos complementarios que no tengan efecto negativo a la calidad del biosólido.
5. **Otros procesos:** es necesario que se pruebe la eficiencia en relación a la estabilización de los lodos frente a la Autoridad Sanitaria.

Los lodos residuales que se extraen de procesos de tratamiento de aguas residuales señalados en los incisos 1), 2) y 3) en condiciones de operación de acuerdo con el diseño, se consideran como estabilizados sin necesidad de comprobar la relación de SV a ST.

Los procesos señalados en el inciso 4) corresponden a una estabilización por separado que se exige aplicar a aquellos lodos que se extraen de las instalaciones del tratamiento de aguas residuales antes de su estabilización o en condiciones que no permiten el control operacional. Estas características se aplican a los siguientes tipos de lodos de PTAR:

- a) Lodo primario: separado de aguas residuales crudas en el sedimentador primario.
- b) Lodo secundario con poco tiempo de retención del lodo (p. ejem. lodo activado convencional, filtro percolador sin recirculación del efluente).
- c) Lodos provenientes de plantas de tratamiento sobrecargadas o no operado de acuerdo con el diseño (por falta de energía u otros problemas operacionales).
- d) Excretas de instalaciones de saneamiento *in situ*: tanque séptico; letrinas con o sin arrastre hidráulico, con o sin hoyo impermeabilizado; letrinas de compostaje seco con contenedor, de una o doble cámara.

Dichos lodos, después de su extracción, deben pasar necesariamente por una estabilización por separado conforme los procesos señalados en el inciso 4) u otros procesos de acuerdo con el inciso 5).

Anexo B. Tecnologías para la higienización de Biosólidos D.S. N°015-2017-VIVIENDA

Anexo II

Tecnologías para la higienización de biosólidos

Sección A

Se consideran biosólidos de Clase A a aquellos que cumplan con los dos (2) requisitos de higienización siguientes:

1. Concentración de *Escherichia coli* menor a 1.000 NMP (Número más probable) por gramo de Sólidos Totales (ST) o concentración de *Salmonella spp.* menor a 1 NMP por 10 gramos de Sólidos Totales (ST).
 - a) Es obligatorio la prueba de al menos uno de los dos parámetros conforme al artículo 14 del presente reglamento.
 - b) En caso el laboratorio no cuente con un sistema de medición para ambos parámetros, alternativamente se podrá medir el parámetro Coliformes Termotolerantes, que debe ser menor a 1.000 NMP por gramo de (ST).
2. Concentración de **huevos de helmintos viables menor a 1 en 4 gramos de (ST)** cuyo cumplimiento se podrá demostrar alternativamente mediante la acreditación ante la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de las condiciones de operación de uno de los procesos señalados a continuación:
 - a) **Compostaje térmico:** Es el método de compostaje en pilas estáticas aireadas y volteadas para mantener una temperatura de 55°C o más por un periodo mínimo de 14 días.
 - b) **Secado térmico o solar:** Es el contacto directo o indirecto de lodo con gases a mayor temperatura o energía solar para reducir la humedad a un 10 % como máximo (>90 % materia seca).
 - c) **Digestión anaerobia termofílica:** Los valores del tiempo de residencia medio y temperatura serán de 20 días en temperaturas de 50°C como mínimo.
 - d) **Tratamiento alcalino:** Acondicionamiento con cal para que el pH se mantenga a un nivel de pH 12 durante un periodo no inferior de 72 horas. Adicionalmente, el lodo deberá secarse hasta obtener un contenido de sólidos totales de 50 % como mínimo.
 - e) **Procesos de tratamiento equivalente:** Cuyo uso sea previamente aprobado por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en relación a su eficiencia en la inactivación del Indicador de Huevos de Helmintos viables en los lodos o biosólidos frente a la Autoridad Sanitaria.

Sección B

Se consideran biosólidos de Clase B a aquellos que han llegado al nivel exigido de su higienización por procesos de estabilización, conforme a lo señalado en el Anexo I.

El nivel de higienización se puede demostrar alternativamente mediante la acreditación ante la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de las condiciones de operación de alguno de los procesos indicados a continuación:

Anexo C. Parámetros de estabilización, higienización de lodos y toxicidad química D.S. N°15-2017-VIVIENDA

Artículo 12.- Parámetro de estabilización

12.1. Los lodos generados en las PTAR para ser estabilizados y calificados como biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con el siguiente parámetro:

Tabla N° 1 Estabilización de lodos
<u>Concentración de materia orgánica:</u> Materia orgánica (SV) ≤ 60% de Materia seca (ST)

Artículo 13.- Parámetro de toxicidad química

13.1. Los biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con los siguientes parámetros de toxicidad química:

Tabla N° 2 Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y de Clase B								
Mg/kg ST Materia Seca	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Plomo	Mercurio	Níquel	Zinc
Clase A y Clase B	40	40	1200	1500	400	17	400	2400

Artículo 14.- Parámetros de higienización

14.1. Los biosólidos de Clase A y de Clase B deben cumplir con los parámetros de higienización siguientes:

Tabla N° 3 Parámetros de higienización de biosólidos		
Indicador	Clase A	Clase B
Indicadores de contaminación fecal	<i>Escherichia coli</i> < 1000 NMP/ 1g ST o <i>Salmonella sp.</i> < 1 NMP / 10g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del Anexo N° II.
Indicador de Huevos de Helmintos	Huevos viables de Helmintos < 1 / 4g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización	

Anexo D. Pruebas de Laboratorio Físicoquímicas

Figura D1

Muestras de lodo en bolsas herméticas



Figura D2

Pesaje de lodo en balanza analítica



Figura D3

Medición de pH, temperatura del lodo

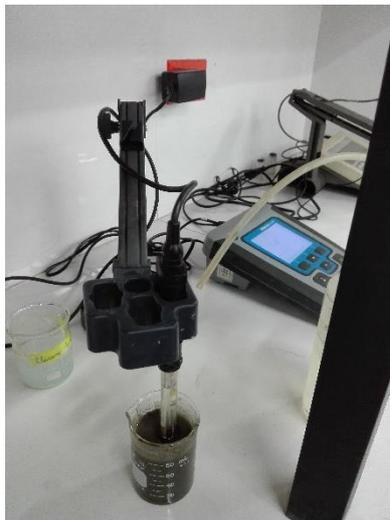


Figura D4

Capsulas sobre la plancha de calefacción



Figura D5

Capsulas en la mufla para la medición de SV y SF



Figura D6

Capsulas en el desecador



Anexo E. Pruebas de laboratorio de Coliformes fecales

Figura E1

Pesaje del medio de cultivo A-1



Figura E2

Dilución del medio de cultivo A-1



Figura E3

Llenado de medio A-1 en los tubos de ensayo



Figura E4

Tubo de ensayo y tubo Durham con medio A-1



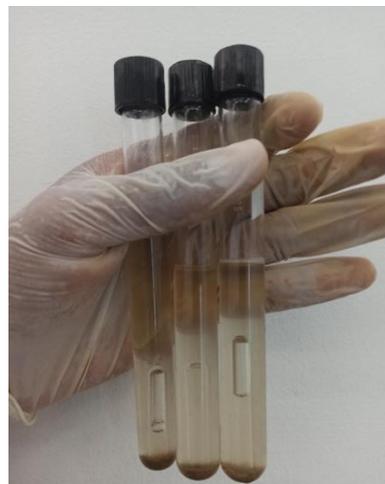
Figura E5

Incubación de nueve tubos de ensayo



Figura E6

Examinación de tubos positivos mediante la presencia de gas en tubos Durham



Anexo F. Pruebas de laboratorio de Salmonella spp

Figura F1

Preparado de caldo selenito cistina



Figura F2

Enriquecimiento de lodo con caldo tetracionato



Figura F3

Distribución de caldo selenito cistina en tubos de ensayo

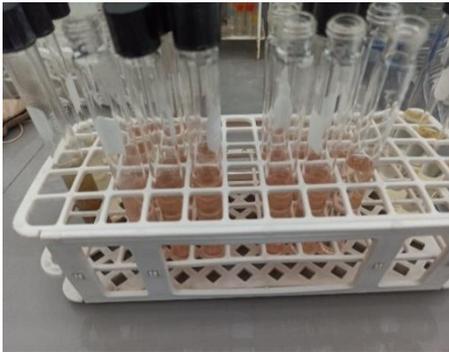


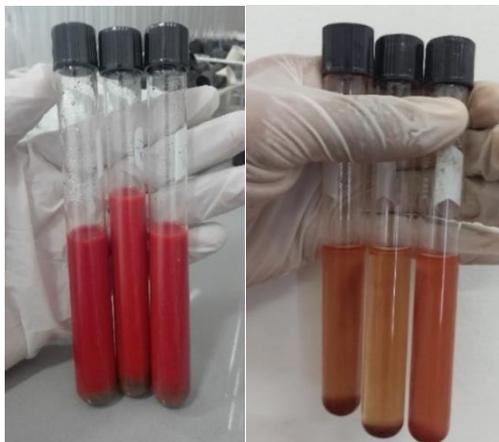
Figura F4

Incubación de la muestra con caldo selenito cistina



Figura F5

Examinación de tubos positivos mediante el virado de color a anaranjado intenso.



Anexo G. Pruebas de laboratorio de Huevos de Helmintos

Figura G1

Preparación del $ZnSO_4$ ajustando a una densidad específica de 1.3



Figura G2

Tubo centrifuga de lodo lavado con Tween80 y filtrado por malla 150 μm , listo para centrifugar



Figura G3

Tubos centrifugados y sin sobrenadante, listos para suspenderlos en $ZnSO_4$



Figura G4

Tubos centrifugados con $ZnSO_4$

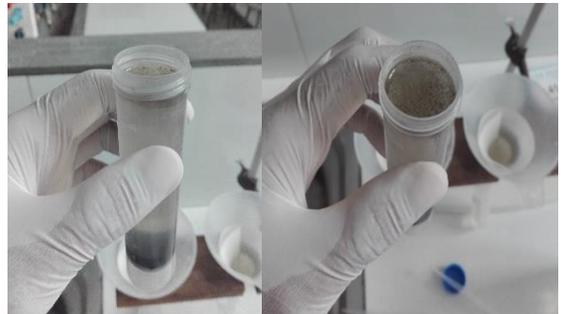


Figura G5

Filtrado del sobrenadante de los tubos centrifugados con $ZnSO_4$



Figura G6

Portaobjetos que contienen huevos de helmintos para su cuantificación

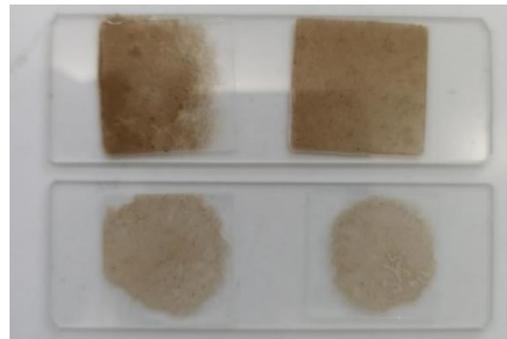


Figura G7

Portaobjetos que contienen huevos de helmintos de las últimas semanas para su cuantificación

**Figura G8**

Vista bajo microscopio con objetivo 10x para su cuantificación

**Figura G9**

Vista bajo microscopio con objetivo 40x para su verificación



Anexo H. Análisis de metales pesados del humus, lodo residual digerido por las lombrices Eisenia foetida.

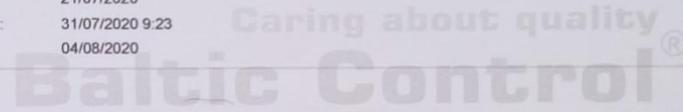


Caring about quality
Baltic Control[®]
Baltic Control CMA S.A.

INFORME DE ENSAYO N° 202003992/2020

Razón social: CASQUINO TIPULA IVAN ALEJANDRO RUC: 10460073231
 Domicilio legal: Calle Las Magnolias 201 Urb. El Ermitaño Distrito Independencia CMA: CMA2181/2020

Producto declarado: LODO RESIDUAL TRATADO
 Número de Muestras: 01
 Cantidad de Muestra: Una (01) unidad de 600 gr aprox.
 Presentación: Envase sellado
 Condición de la muestra: Temperatura Ambiente
 Datos proporcionados por el cliente: No Indica
 Procedencia de la muestra: Proporcionado por el cliente
 Procedimiento de muestreo: No Aplica
 Plan de muestreo: No Aplica
 Lugar de muestreo: No Aplica
 Fecha de muestreo: No Aplica
 Fecha de recepción de la muestra: 21/07/2020
 Código de Laboratorio: 202003992
 Fecha de inicio de análisis: 21/07/2020
 Fecha de término de análisis: 31/07/2020 9:23
 Fecha de emisión: 04/08/2020



Página 1 de 2

Físico Químicos	Unidad	Resultado
Zinc	mg/Kg	85,070
Cobre (ICP)	mg/Kg	721,67
Cromo (ICP)	mg/Kg	39,630
Mercurio (Lodos, sedimentos y suelos)	mg/Kg	< 0,001
Arsénico (Lodos, sedimentos y suelos)	mg/Kg	< 0,009
Cadmio (Lodos, sedimentos y suelos)	mg/Kg	1,410
Plomo (Lodos, sedimentos y suelos)	mg/Kg	28,050
Níquel	mg/Kg	6,800

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE UN DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE" CY

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de BALTIC CONTROL CMA S.A.
 Cualquier emenda o corrección en el contenido del presente informe lo anula automáticamente.
 Los resultados corresponden al objeto ensayado.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos o como certificado de sistemas de calidad de la entidad que lo produce.

FR-13-07-01 / V05

Our General terms and Conditions are available in full on www.balticcontrol.com or, at your request
 Offices, Resident Inspectors, Joint Ventureships, and Representatives throughout the World



Global independent inspection,
testing and certification services

International Federation
of Inspection Agencies

Baltic Control CMA S.A.
 Antigua Carretera Panamericana Sur Km.32.5
 Lurín - Perú

Phone Central: (+511) 660 2323



Caring about quality
Baltic Control[®]
 Baltic Control CMA S.A.

INFORME DE ENSAYO N° 202003992/2020

Página 2 de 2

Método de análisis	Método de Referencia
Zinc	Espectrofotometría de absorción atómica
Cobre (ICP)	AOAC 990.08
Cromo (ICP)	EPA 3050-B (1996) / EPA - Method 200.7 Revision 4.4 (1994) Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils Revision 2 / Determination of metals and trace Elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry
Mercurio (Lodos, sedimentos y suelos)	EPA 7471 B - Mercury in solid or semisolid waste (manual cold - vapor technique)
Arsénico (Lodos, sedimentos y suelos)	EPA 3050B Rev. 2 1996 / EPA 6010D Rev. 5 2018. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils / Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry.
Cadmio (Lodos, sedimentos y suelos)	EPA 3050B Rev. 2 1996 / EPA 6010D Rev. 5 2018. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils / Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry.
Plomo (Lodos, sedimentos y suelos)	EPA 3050B Rev. 2 1996 / EPA 6010D Rev. 5 2018. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils / Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry.
Niquel	AOAC 965.09 19th Ed. 2012



Quim. Celino Yahuana Palacios
 Gerente de Laboratorio

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE UN DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE" CY

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de BALTIC CONTROL CMA S.A.
 Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente informe lo anula automáticamente.
 Los resultados corresponden al objeto ensayado.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos o como certificado de sistemas de calidad de la entidad que lo produce.

FR-13-07-01 / V05

Global, independent inspection,
 testing and certification services

Baltic Control CMA S.A.
 Antigua Carretera Panamericana Sur Km.32.5
 Lurin - Perú

Phone Central: (+511) 660 2323

Our General terms and Conditions are available in full on www.balticcontrol.com or, at your request
 Offices, Resident Inspectors, Joint Ventureships, and Representatives throughout the World



Anexo I. Análisis de metales pesados de la lombriz *Eisenia foetida* utilizada en el tratamiento de lodos residuales



Caring about quality®
Baltic Control®
Baltic Control CMA S.A.

INFORME DE ENSAYO N° 202003993/2020

Razón social: CASQUINO TIPULA IVAN ALEJANDRO	RUC: 10460073231
Domicilio legal: Calle Las Magnolias 201 Urb. El Ermitaño Distrito Independencia	CMA: CMA2182/2020

Producto declarado:	LOMBRIZ DE TIERRA
Número de Muestras:	01
Cantidad de Muestra:	Dos (02) unidades de 600 gr aprox.
Presentación:	Envase sellado
Condición de la muestra:	Temperatura Ambiente
Datos proporcionados por el cliente:	No Indica
Procedencia de la muestra:	Proporcionado por el cliente
Procedimiento de muestreo:	No Aplica
Plan de muestreo:	No Aplica
Lugar de muestreo:	No Aplica
Fecha de muestreo:	No Aplica
Fecha de recepción de la muestra:	21/07/2020
Código de Laboratorio:	202003993
Fecha de inicio de análisis:	21/07/2020
Fecha de término de análisis:	31/07/2020 9:23
Fecha de emisión:	04/08/2020



Página 1 de 2

Físico Químicos		
Análisis	Unidad	Resultado
Arsénico (ICP)	mg/Kg	< 0,009
Cadmio (ICP)	mg/Kg	1,320
Cromo (ICP)	mg/Kg	61,370
Cobre (ICP)	mg/Kg	490,90
Mercurio (ICP)	mg/Kg	< 0,001
Níquel (ICP)	mg/Kg	6,350
Zinc (ICP)	mg/Kg	82,8
Plomo (LC: 0.002 mg/Kg)	mg/Kg	28,550

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE UN DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE CY

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de BALTIC CONTROL CMA S.A.
Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente informe lo anula automáticamente.
Los resultados corresponden al objeto ensayado.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos o como certificado de sistemas de calidad de la entidad que lo produce.

<p>FR-13-07-01 / V05</p> <p style="font-size: x-small;">Our General terms and Conditions are available in full our www.balticcontrol.com or, at your request Offices, Residents Inspectors, Joint Ventureships, and Representatives throughout the World</p>	<p style="font-size: x-small;">Global independent inspection, testing and certification services</p>  <p style="font-size: x-small;">International Federation of Inspection Agencies</p> <p>Baltic Control CMA S.A. Antigua Carretera Panamericana Sur Km.32.5 Lurín - Perú</p> <p>Phone Central: (+511) 660 2323</p>
---	--



Caring about quality®
Baltic Control
 Baltic Control CMA S.A.

INFORME DE ENSAYO N° 202003993/2020

Página 2 de 2

Método de análisis	Método de Referencia
Arsénico (ICP)	AOAC 990.08
Cadmio (ICP)	AOAC 990.08
Cromo (ICP)	AOAC 990.08
Cobre (ICP)	AOAC 990.08
Mercurio (ICP)	AOAC 990.08
Niquel (ICP)	AOAC 990.08
Zinc (ICP)	AOAC 990.08
Plomo (LC: 0.002 mg/Kg)	AOAC 999.11. 20th Ed. 2016. Determination of Lead, Cadmium, Copper, Iron, and Zinc in Foods.



Quim. Celino Yahuana Palacios
 Gerente de Laboratorio

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE UN DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE" CY

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de BALTIC CONTROL CMA S.A.
 Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente informe lo anula automáticamente.
 Los resultados corresponden al objeto ensayado.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de productos o como certificado de sistemas de calidad de la entidad que lo produce.

FR-13-07-01 / V05

Global independent inspection,
 testing and certification services.

Baltic Control CMA S.A.
 Antigua Carretera - Panamericana Sur Km.32.5
 Lurin - Perú

Phone Central: (+511) 660 2323

Our General terms and Conditions are available in full our www.balticcontrol.com or, at your request
 Offices, Resident Inspectors, Joint Ventureships, and Representatives throughout the World



Anexo J. Lecho de Lombrices construido en la PTAR San Pedro de Ancón.

Figura J1

Armado de acero del lecho de lombrices



Figura J2

Encofrado del lecho de lombrices



Figura J3

Lecho de lombrices terminado



Figura J4

Prueba hidráulica del lecho de lombrices



Anexo K. Desarrollo de la Lombriz *Eisenia foetida* en la PTAR San Pedro de Ancón

Figura K1

Lecho de lombrices en la PTAR San Pedro de Ancón



Figura K2

Diferentes tamaños de lombrices, de juveniles a adultas



Figura K3

Acoplamiento de lombrices



Figura K4

Curioso caso de acoplamiento de tres lombrices



Figura K5

Cocones de lombrices



Anexo L. Operación y Mantenimiento del lecho de lombrices en la PTAR San Pedro de Ancón.

Figura L1

Incorporación de lodo crudo



Figura L2

Retiro de lixiviados del lecho de lombriz



Figura L3

Retiro del humus de lombriz en motos cargueras



Figura L3

Disposición de humus sobre el terreno del cementerio Parque del Recuerdo de Ancón

