

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Influencia del vermicompostaje en la recuperación de
lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas
Residuales Santa Clara - Lima 202**

Marly Tito Sánchez

Para optar el Título Profesional de
Ingeniera Ambiental

Lima, 2022

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su total apoyo en las cosas que me propongo alcanzar, en especial a mi madre y mi hijo. A mis amigos de la EAP de Ingeniería Ambiental, por su constante apoyo y orientación, y le brindo un agradecimiento especial a mi asesora de tesis la Mg. Verónica Nelly Canales Guerra, por su paciencia y por guiarme en todo este proceso de preparación de tesis.

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi hijo Randy por ser la razón de mí existir, por apoyarme y comprender mis ausencias para dedicarme a estudiar; a mi madre Corina por ser mi compañera, amiga, y la mejor madre que el universo me pudo regalar y a mis hermanos Jaime B y Omar, por ser partícipes y por haber contribuido en todo momento para que pueda sacar adelante esta investigación y por creer en mí. También se la dedico a los ingenieros y amigos que me han apoyado externamente para llevar a cabo este proyecto, y, por último, se la dedico al universo maravilloso que siempre de alguna manera pone todo en mi camino para poder cumplir mis objetivos.

CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO I.....	11
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	11
1.1 Planteamiento formulación del problema.....	11
1.1.1 Planteamiento del problema	11
1.1.2 Formulación del problema.....	12
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo general	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
1.3 Justificación.....	12
1.4 Hipótesis y descripción de variables	14
1.4.1 Hipótesis general.....	14
1.4.2 Hipótesis alterna.....	14
1.4.3 Hipótesis nula	14
1.4.4 Hipótesis específicas.....	14
1.4.5 Variable independiente.....	15
1.4.6 Variable dependiente	15
1.5 Limitaciones de la investigación	15
CAPÍTULO II.....	16
MARCO TEORICO	16
2.1 Antecedentes de la investigación	16
2.1.1 Antecedentes internacionales	16
2.1.2 Antecedentes nacionales	18
2.1.3 Antecedentes locales	18
2.2 Bases Teóricas	20
2.2.1 Planta de tratamiento de aguas residuales	20
2.2.2 Lodos residuales de las plantas de tratamiento	23
2.2.3 Tratamiento de los lodos residuales	26
2.2.4 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara.....	30
2.2.5 Vermicompostaje.....	32
2.2.6 Biología de la lombriz	32
2.2.7 Anatomía y fisiología de la <i>Eisenia foetida</i>	33
2.2.8 Factores limitantes para el desarrollo de la <i>Eisenia foetida</i>	35
2.2.9 Lombrices y microorganismos en el vermicompostaje.....	36
2.2.10 Alimentación de la <i>Eisenia foetida</i>	37
2.2.11 Cambios mediante el vermicompostaje en lodos de PTAR	38
2.2.12 Vermicompost - humus de lombriz	40
2.2.13 Marco legal	40
2.3 Definición de términos básicos.....	41
2.4 Modelo teórico conceptual.....	44
CAPITULO III.....	45
METODOLOGÍA.....	45
3.1 Método y alcance de la investigación.....	45
3.1.1 Método de investigación.....	45

3.1.2 Alcance de la investigación	45
3.2 Diseño de la investigación	46
3.2.1 Tipo de diseño de la investigación	46
3.3 Población y muestra	47
3.3.1 Población	47
3.3.2 Muestra	47
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	48
3.4.1 Técnica de la observación	48
3.4.2 Técnica de recolección de datos secundarios	49
3.4.3 Técnica de observación asistida	50
3.5 Procedimiento de la investigación	50
3.5.1 Observación	50
3.5.2 Recolección de datos secundarios	58
3.5.3 Observación asistida mediante instrumentos electrónicos	61
Parámetros a evaluarse en el laboratorio	61
CAPITULO IV	63
RESULTADOS Y DISCUSIONES	63
4.1 Resultados de la investigación y análisis de la información recopilada	63
4.1.1 Parámetros físicos	63
4.1.2 Parámetros químicos	66
4.1.3 Parámetros microbiológicos	75
4.2 Comprobación de las hipótesis específicas	76
4.2.1 Análisis de parámetros físicos	76
4.2.2 Análisis estadísticos de parámetros químicos	77
4.2.3 Análisis estadísticos de parámetros microbiológicos	80
4.3 Discusión de resultados	82
4.3.1 Parámetros físicos	82
4.3.2 Parámetros químicos	83
4.3.3 Parámetros microbiológicos	85
CONCLUSIONES	86
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	89
ANEXOS	98
1. MATRIZ DE CONSISTENCIA	99
2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	100
3. TABLA MUNSELL	101
4. Registro de color y olor	102
5. Análisis de lodos residuales	103
6. Análisis de vermicompost 7 días	104
7. Análisis de vermicompost 14 días	105
8. Análisis estadístico de parámetros	106
9. Fotos del experimento	109

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Valores de los parámetros usualmente estudiados en los lodos.....	25
Tabla 2. Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos	26
Tabla 3. Técnica e instrumentos de recolección de datos	50
Tabla 4. Cuantificación de lombrices	55
Tabla 5. Mezclas de lodo residual y lombrices	55
Tabla 6. Registro de colores mediante la tabla de Munsell.....	57
Tabla 7. Propuesta de registro de olor.....	57
Tabla 8. Caracterización de olor	57
Tabla 9. Parámetros que serán evaluados por el laboratorio SLAB	58
Tabla 10. Estabilización de lodos.....	59
Tabla 11. Parámetros de toxicidad química	59
Tabla 12. Parámetros de higienización.....	59
Tabla 13. Usos del suelo	60
Tabla 14. Registro de color de acuerdo con la tabla Munsell	64
Tabla 15. Registro de olor	64
Tabla 16. Parámetros de toxicidad química	68
Tabla 17. Resultados para ser comparados.....	74
Tabla 18. Resultados comparativos de los parámetros microbiológicos	75
Tabla 19. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de fósforo.....	77
Tabla 20. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de plomo.....	78
Tabla 21. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de sólidos totales.....	79
Tabla 22. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de sólidos volátiles.....	79
Tabla 23. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de coliformes totales.....	80
Tabla 24. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de <i>Escherichia coli</i>	81

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Rango de temperaturas	53
Gráfica 2. Conteo de lombrices en los periodos de experimento	63
Gráfica 3. Parámetros químicos.....	66
Gráfica 4. Resultados de laboratorio.....	67
Gráfica 5. Resultados de laboratorio de pH.....	68
Gráfica 6. Resultados de laboratorio de la MO.....	69
Gráfica 7. Resultados del C/N.....	70
Gráfica 8. Resultados del nitrógeno.....	71
Gráfica 9. Resultados del K - P.....	71
Gráfica 10. Resultados de humedad	72
Gráfica 11. Resultados de la C.E.....	73
Gráfica 12. Resultados de S.t y S.v	74
Gráfica 13. Resultados de parámetros microbiológicos	75

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta Santa Clara	31
<i>Figura 2.</i> Distribución de los órganos principales de la lombriz.....	35
<i>Figura 3.</i> Modelo teórico conceptual.	44
<i>Figura 4.</i> Recolección de muestras de la centrífuga en la PTAR Santa Clara .	48
<i>Figura 5.</i> Muestra homogénea de los lodos residuales.....	48
<i>Figura 6.</i> Ubicación de la PTAR Santa Clara. Google maps.....	51

<i>Figura 7.</i> Punto de muestreo de la Planta Santa Clara.	51
<i>Figura 8.</i> Camas de madera.....	53
<i>Figura 9.</i> Cama envuelta en mala Raschel.....	54
<i>Figura 10.</i> Eisenia foetida.....	54
<i>Figura 11.</i> Lombrices de edad adulta.	54
<i>Figura 12.</i> Denominación de las mezclas.	56
<i>Figura 13.</i> Camas en proceso de investigación.....	56
<i>Figura 14.</i> Vermicomposta preparada para ser trasladada al laboratorio.....	61
<i>Figura 15.</i> Vermicomposta a 14 días preparada para ser trasladada al laboratorio.	62

RESUMEN

Al abordar este tema de investigación, el objetivo básicamente estuvo enfocado en recuperar los lodos que se generan a grandes cantidades en las plantas de tratamiento de aguas residuales, haciendo uso de una técnica sencilla, de bajo costo y eficiente como es el uso de lombrices, en específico la *Eisenia foetida*, para transformar estos desechos. Estos lodos, por lo general, son dispuestos en rellenos sanitarios por su alto contenido de patógenos y de contaminantes, características que los hacen de alguna manera inútiles para aprovecharlos. Por ello, el vermicompostaje es una opción viable para darle valor a estos lodos. Se experimentó con lodos deshidratados del proceso final de la PTAR Santa Clara. La primera caracterización de parámetros arrojó una alta concentración de *Escherichia coli*, coliformes totales, sólidos totales, sólidos volátiles y presencia de metales pesados. La transformación de los lodos comenzó a variar a los siete días, mostrando una disminución exponencial de los parámetros microbiológicos y una disminución de la concentración de metales pesados. A los catorce días, los cambios fueron bastante notables entre los parámetros físicos, mostrando variación del color, olor, etc. Entre los químicos, los descensos más resaltantes se dan en el Cr, sólidos volátiles y totales, y entre los microbiológicos los que más descensos presentan son la *Escherichia coli* y los coliformes totales, lográndose con esta técnica entrar dentro de los límites que dicta el Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA, para el aprovechamiento de lodos residuales. Se culminó con una categorización de clase B de los lodos tratados exclusivamente con lombrices, lo cual sugiere su viabilidad para ser recuperados y reaprovechados.

Palabras clave: lodos residuales, vermicompostaje, *Eisenia foetida*, vermicompost, recuperación, aprovechamiento.

ABSTRACT

When addressing this research topic, the objective was basically focused on recovering the sludge generated in large quantities in wastewater treatment plants, using a simple, low-cost and efficient technique such as the use of worms, in specific the "*Eisenia foetida*", to transform these wastes. The sludge is generally disposed of in sanitary landfills due to its high content of pathogens and pollutants among their characteristics that makes them somehow useless to take advantage of them. For this reason, vermicomposting is a viable option to give value to this sludge, as this thesis presents. It was experimented with dehydrated sludge from the final process of the Santa Clara Residual Water Treatment Plant, the first characterization of parameters yielded a high concentration of *Escherichia coli*, total coliforms, total solids, volatile solids and the presence of heavy metals, etc. the transformation of the sludge began to vary after 7 days, demonstrating an exponential decrease in microbiological parameters, a decrease in the concentration of heavy metals. At 14 days the changes were quite noticeable between the physical parameters, showing variation in color, odor, etc. Among the chemicals, the most notable decreases are in Cr, volatile and total solids, and among the microbiological ones, the ones that show the most decreases are *Escherichia coli* and fecal coliforms, achieving with this technique to enter within the limits dictated by the Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA for the use of residual sludge. Culminating in a class B categorization of the sludge treated exclusively with worms, which suggests its viability to be recovered and reused.

Keywords: residual sludge, vermicomposting, *Eisenia foetida*, vermicompost, recovery, use.

INTRODUCCIÓN

En las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) generalmente confluyen, en las aguas que serán tratadas, una serie de contaminantes, microorganismos patógenos, virus y concentración de metales pesados; todo ello altamente peligroso y dañino para la salud humana y el bienestar ambiental. Todos estos contaminantes provenientes de los tratamientos primarios y secundarios se verán reflejados en la caracterización de los lodos generados en estas plantas. La planta Santa Clara produce cerca de 1500 t/m de este residuo, los cuales son deshidratados y llevados a rellenos sanitarios. Esto implica que se produzca contaminación por lixiviados de las aguas subterráneas, emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación de suelos, etc.

Por ello, se pensó en el uso de lombrices para lograr estabilizar y recuperar estos desechos carentes de valor, pues estos residuos contienen un elevado potencial orgánico, micro-macro nutriente y microorganismos que en asociación con las lombrices son capaces de modificar las características de estos desechos.

El vermicompostaje es una técnica que se ha empleado mucho en países desarrollados con muy buenos resultados; de hecho, EE. UU. es uno de los países que más utiliza esta biotecnología para recuperar sus lodos residuales, casi el 49 % de estos residuos se recuperan y se utilizan para mejorar suelos, en la agricultura, etc.

En el Perú, también existen numerosos estudios que prueban la efectividad de la *Eisenia foetida* sobre estos lodos; mayormente, se han realizado mezclas para mejorar la calidad del vermicompost, con resultados muy interesantes. Sin embargo, este estudio hace su investigación sobre la base de lodos sin ningún tipo de mezcla, con resultados muy alentadores. Dentro de este contexto, se busca lograr el objetivo de recuperar los lodos para darles otro uso bajo la normativa del Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA utilizando el vermicompostaje; de este modo, se ayuda a mitigar el impacto que ocasionan estos desechos y se da una oportunidad de reaprovechamiento y, desde luego, un valor agregado a estos lodos residuales.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Planteamiento del problema

Actualmente, en Latinoamérica, gran parte de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya sean estas industriales o urbanas, no incorporan en su proceso la disposición final de los lodos residuales producidos. Los lodos residuales son definidos como desperdicios que, por lo general, son peligrosos por su alta carga tóxica; es por ello que su almacenaje se debe dar en lugares controlados para evitar contaminar el medio ambiente.

En Perú, el tratamiento de las aguas residuales ha ido mejorando en el transcurso del tiempo; sin embargo, aún existe mucha deficiencia en el manejo y la gestión de las mismas, y esto se debe a factores como la poca experiencia e información en la materia, carencia de personal cualificado y el poco presupuesto que el Estado ofrece en estos asuntos, que pueden ser redituables al país. La producción de lodos residuales en el Perú es muy elevada, pues alcanza incluso los 25 m³ diarios en un punto de operación, lo que abriría la posibilidad de reaprovechar los lodos siguiendo las pautas que regulan la forma de reaprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) mediante el Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA (1).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara produce lodos residuales que no son estabilizados, lo que significa que estos desechos contienen contaminantes como metales pesados, patógenos, tóxicos orgánicos, etc., y el único tratamiento que se le da a estos lodos residuales es el de la deshidratación. Una vez reducido el contenido de humedad, estos lodos son dispuestos en rellenos sanitarios (2).

Los lodos que provienen de las PTAR contienen una elevada cantidad de materia orgánica, y gran cantidad de nutrientes (N, P, C y K); así mismo, contienen impurezas solubles e insolubles, y patógenos (huevos de helmintos, virus, bacterias, coliformes fecales), hallándose en muchos casos inconvenientes para su aprovechamiento y disposición final (3).

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, se propone el vermicompostaje para averiguar la influencia que tiene esta técnica, en la recuperación de lodos residuales para evitar su actual destino —“los rellenos sanitarios”— y aplicarlos como mejoradores de suelo, actividades agrícolas,

forestales, o simplemente comercializarlo como abono orgánico de buena calidad.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara - Lima 2021?

1.1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021?
- ¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en las características químicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021?
- ¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en las características microbiológicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar la influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara - Lima 2021.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021.
- Determinar la influencia del vermicompostaje en las características químicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021.
- Determinar la influencia del vermicompostaje en las características microbiológicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021.

1.3 Justificación

En la actualidad, el aumento demográfico se ha ido expandiendo considerablemente en el mundo, lo que representa un estrés hacia la demanda del agua tanto para uso doméstico como industrial, provocando desafíos medioambientales globales y amenazas en la gestión del agua. Esta presión sobre los recursos lleva inevitablemente a un aumento de las aguas negras y

grises, las cuales van a requerir de un tratamiento para ser incorporadas a los cuerpos receptores de agua. Este es un ciclo que por lo general va a recorrer los efluentes residuales hasta terminar en las PTAR para un adecuado manejo (4). El Perú no es la excepción, pues muestra una tendencia creciente hacia la concentración urbana, lo que genera una carga potencial de lodos residuales, que usualmente terminarán en algún relleno sanitario.

Por ello, la presente investigación propone una alternativa para recuperar y reaprovechar los lodos residuales bajo la normativa del Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA y el Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM, usando la técnica del vermicompostaje, pues la lombriz *Eisenia foétida* tiene la capacidad de fragmentar, descomponer y estabilizar estos desechos sin generar ningún tipo de residuo; por el contrario, mejora las condiciones de desarrollo de los microorganismos. Además, este proceso biotecnológico, según demuestran otros estudios, es capaz de eliminar patógenos dañinos del lodo y convertirlo en un estupendo sustrato orgánico con fines reaprovechables (5). El vermicompost que se obtiene se caracteriza por ser uniforme, de apariencia agradable, sin olor, con elevada capacidad de aireación, de drenaje y de retención de agua (6). Más aún, se propone la utilización de una técnica limpia y sencilla, baja en costes de inversión, sin ningún tipo de impacto ambiental que, de acuerdo con distintas investigaciones comprobadas, ha arrojado excelentes resultados.

Esta investigación se justifica, también, porque puede servir de referencia para próximas investigaciones o para ser aplicada a otras PTAR y/o a pequeñas empresas que cuenten con instalaciones de depuración de aguas, y así puedan evitar desperdiciar estos lodos que pueden tener un valor agregado y, de paso, contribuye a la mejora de la gestión residual y ambiental del país.

Finalmente, el beneficio económico estaría dado por la obtención de un producto de calidad con un alto valor monetario a bajo costo, pues la vermicomposta es una fuente natural de materia orgánica y proteínas que se puede comercializar, aplicar como mejorador de suelos, en jardinería, entre otros. Además, considerando que el crecimiento poblacional de las lombrices es intenso, se pueden comercializar estos anélidos para los mismos fines, alimentación animal, carne de lombriz, etc. (7).

En lo social, el impacto se ve reflejado en el manejo ecológico de basura orgánica, desperdicios de cocina, y en la agricultura, lo cual sería beneficioso para las comunidades, ya que mediante el abono obtenido de lombrices pueden mejorar sus mecanismos de autoabastecimiento y, por ende, las condiciones de su hábitat cotidiano (8).

En lo ambiental, esta investigación es de suma importancia, pues el aprovechamiento de los lodos como mejoradores de suelo, su aplicación a suelo residencial y parques, con fines forestales para plantas de tallo largo, incluso para su aplicación en áreas degradadas o reforestación, etc., evitaría su disposición actual en “rellenos sanitarios” y, con ello, problemas de contaminación hacia agua, aire y suelos, que lamentablemente afectan en la actualidad (9).

1.4 Hipótesis y descripción de variables

1.4.1 Hipótesis general

La influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara - Lima 2021 es significativa.

1.4.2 Hipótesis alterna

La influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara - Lima 2021 es significativa.

1.4.3 Hipótesis nula

La influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara - Lima 2021 no es significativa.

1.4.4 Hipótesis específicas

- La influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021 es significativa.
- La influencia del vermicompostaje en las características químicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021 es significativa.
- La influencia del vermicompostaje en las características microbiológicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara - Lima 2021 es significativa.

1.4.5 Variable independiente

- *El vermicompostaje* será la técnica que permita recuperar los lodos residuales de la PTAR Santa Clara.

1.4.6 Variable dependiente

- *La recuperación de lodos residuales* dependerá del vermicompostaje realizado.

1.5 Limitaciones de la investigación

1.5.1 Alcances

Esta investigación propone una alternativa para reutilizar los lodos residuales bajos la normativa que manda el Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA y el Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM, haciendo uso de la técnica del vermicompostaje, mediante la lombriz *Eisenia foetida*.

Se evaluarán y compararán los resultados obtenidos de la investigación con las normas vigentes para saber si es factible la recuperación de lodos residuales.

Se hace hincapié en que esta investigación no contempla la recuperación de suelos degradados con el uso del vermicompostaje de lodos residuales. Para llevarlo a cabo se necesita una investigación más amplia y con más disponibilidad de tiempo.

1.5.2 Limitaciones

El confinamiento que se produjo debido a la pandemia del COVID-19 en el momento de realizar esta investigación limitó el acceso a la PTAR, ya que por protocolos de seguridad sanitaria dicha institución se ofreció a brindar solamente 18 kilos de lodos residuales, los cuales fueron utilizados enteramente en el experimento.

El número de ensayos fue solamente de tres debido a la falta de laboratorios disponibles. Se da a conocer que laboratorios como el de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y el de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) no estuvieron laborando; por lo tanto, se recurrió a un laboratorio particular, donde los costos eran muy elevados por cada ensayo.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Lugo et al. (10) probaron mezclas de estiércol de equino y lodo residual de PTAR en diferentes porcentajes mediante haciendo uso de la técnica del vermicompostaje. Para llevarlo a cabo, se utilizaron cuatro proporciones diferentes de estas mezclas, y durante este proceso se hizo un chequeo exhaustivo por 90 días bajo condiciones de invernadero. Se logró la estabilidad de las vermicompostas en cuanto a relación C/N a 45 días. Por otro lado, se encontró que la mejor relación fue E₇₀-LR₃₀, pues esta relación mostró un equilibrio en la contribución de C y N; los metales pesados disminuyeron en sus concentraciones porque hubo una merma en el Ni, Zn, Cu y Cd, y más aún el pH que se obtuvo ($7,24 \pm 0,1$) fue neutro, la concentración de P aumentó notablemente y también se registró un incremento de lombrices, pues la cantidad fue mayor respecto de los otro tratamientos, lo cual denota que esta relación es la más apropiada para usarla como abono orgánico. La concentración de metales de todas las proporciones de vermicompostas demuestra que no superaron los valores máximos permisibles que sugiere la NOM-04-Semarnat 2002. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se puede emplear como mejorador de suelo.

Ramón et al. (11) diseñaron y construyeron un sistema de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Pamplona, el cual comprende un tratamiento con lombrifiltros (aserrín y *Eisenia foetida*) por donde las aguas residuales transitan. Mediante este sistema se logra obtener agua tratada con disminución de carga orgánica dentro de los límites que promulga la comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA en Colombia.

Se estudió el comportamiento del lombrifiltro por medio del análisis de laboratorio a los parámetros DQO, DBO₂ – SST – SSV, a la entrada y salida del sistema. Y se verificó que la carga del efluente obtenía una eficiencia del 92,06 % de eliminación de carga orgánica utilizando el tratamiento del lombrifiltro.

Veles y Cardona (12) lograron demostrar que los lodos residuales tienen las cualidades óptimas necesarias para ser utilizados como sustrato para la cría de anélidos. Además, demostró que la composición de los lodos residuales

producidos en dicha empresa arroja resultados positivos en cuanto a sus características físicas, químicas y microbiológicas, lo que la hace apta para ser utilizada como enmienda de suelos, pues carece de algún tipo de residuo peligroso que sea perjudicial potencialmente a la salud humana o pueda alterar las características físicas del suelo. El biosólido que se obtuvo de los tratamientos de lombricomposteo y compostaje de los residuos sólidos puede ser considerado para usarse con fines agrícola como abono. Por otro lado, también puede ser empleado como recuperador de suelos, dadas sus cualidades nutricionales. Este estudio permite suponer que existe una posibilidad factible para la conversión del lodo residual a abono orgánico.

Zularisam et al. (13) examinaron el potencial que tienen las lombrices en el tratamiento de lodos de aguas residuales municipales y determinó que es beneficioso. El proceso pone de manifiesto que la tasa de alimentación diaria de las lombrices con lodos de aguas residuales es igual al peso de la biomasa de lombrices. Diariamente se determinó la reducción del volumen de lodos debido al proceso de vermicompostaje. Además, se registraron parámetros físicos como temperatura, contenido de humedad y pH. Se determinaron los contenidos de nutrientes en la lombriz como N, P, K, para los días 1, 7, 14, 21. El N total se incrementó de 19,6 a 35,7 mg L⁻¹, el P total de 9,45 a 10,87 mg L⁻¹, y el K total de 3,44 a 4,80 mg L⁻¹, respectivamente. La transformación de lodos residuales a vermicompost resultó ser del 93% en peso y la biomasa de la lombriz mostró un incremento del 30% con respecto a su peso inicial en 21 días. Por tanto, se comprobó que del vermicompostaje de lodos residuales se obtiene fertilizante orgánico y proporciona un método seguro y práctico.

Por su parte, Droppelmann et al. (14) investigaron el efecto de la densidad inicial de las lombrices en la eliminación de patógenos a través del vermicompostaje de lodo. Se trabajó con cuatro densidades, tres de ellas contenían lombrices en el lodo y la cuarta, llamada blanco, no contenía lombrices. De estas tres densidades, se logró que al segundo día el lodo de aireación extendida sin ningún tipo de mezcla sea de clase B, según la United States Environment Protection Agency (EPA). Estando ya en el día 13 y 20, las muestras lograron la clasificación de clase A, pues se obtuvo la remoción del 100 % de coliformes fecales.

La estimación del número más probable de coliformes fecales (NMPCF) en el periodo dejó comprobar que una mayor densidad de lombrices no necesariamente significa una mayor velocidad de eliminación de patógenos.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Serpa (15) planteó, en su tesis, un sistema de vermicomposteo con cuatro muestras, al cual se le agregaron 5 lombrices adultas y durante 90 días se evaluó la temperatura, pH, biomasa, reproducción de lombrices, capullos, mortandad y la capacidad de remoción de los metales Cu, Cd, Ni, Hg, Pb. Al término de los 90 días, la población de lombrices se incrementó a excepción de la muestra 3. En cuanto a la remoción de metales pesados como el Cd, el porcentaje de remoción es de 8 % a 22 %, y en el caso del Hg es de 8 % a 18 % de remociones altas a lo esperado después de 8 días, y estas se dieron en la muestra 2 y 4. En cuanto a la muestras 1 y 3, la remoción de metales pesados se dio después de 30 días. Finalmente, se concluyó que la lombriz *Eisenia foetida* tiene la capacidad de absorber el Cd y el Hg de los lodos residuales, lo que ofrece una alternativa viable para su aplicación en suelos.

Pomalaza y Ramos (16) evaluaron el efecto de los tratamientos de vermiestabilización de lodos activados en la obtención de compost y el impacto que esta tuvo en la calidad de las plántulas de *Pinus radiata*. Del experimento se obtuvo compost de calidad B, de dos de los tratamientos realizados (T_2 y T_3), y este compost a la vez generó un elevado índice de calidad en las plántulas de *Pinus radiata*. El tratamiento de vermiestabilización de lodos optimizó la relación C/N, equilibró el pH, y mejoró la acumulación de MO en los tratamientos (T_2 , T_3).

2.1.3 Antecedentes locales

Marquina y Martínez (17) establecieron cuatro muestras experimentales, las cuales fueron m1 (LR + compost), m2 (LR+ compost + lombrices), m3 (LR + estiércol de conejo + lombrices), m4 (LR + compost + estiércol de conejo + lombrices), de las cuales se determinó que la m3 logró cumplir con los parámetros de color del abono orgánico, pH y cantidad de lombrices, lo que indicó ser un ecosistema estupendo para el crecimiento de la lombriz. También se determinó que esta muestra posee un elevado contenido de materia orgánica y de nutrientes adecuados. El abono que se obtuvo en la PTAR San Antonio de Carapongo se encuentra dentro de los estándares internacionales, por lo que se le puede definir como un abono orgánico de excelente calidad.

Por su parte, Francisco et al. (18) usaron un diseño estadístico totalmente al azar (DCA), el cual evalúa la concentración de metales, y el

método estadístico de la varianza (ANOVA) y el test de Turkey ($P \leq 0,05$) de comparación de promedios, para medir las variaciones biométricas de la planta indicadora de maíz. Se realizaron dos tipos de ensayo: el N.º 1 (lodo seco directamente de los tratamientos) y el N.º 2 (lodo anteriormente compostado por un tiempo de ocho meses). Las conclusiones en la evaluación de ensayos preliminares diagnosticaron que el lodo producido en la PTAR de Puente Piedra logró alcanzar las exigencias ambientales y sanitarias, lo que permite su utilización en propósitos agrícolas. La concentración de metales en el suelo como, Cd, Hg, As y Pb, antes y después de la fertilización y en la planta indicadora de maíz, se halló dentro de los niveles normales de la norma técnica de aplicación de lodo en suelo US – EPA Part 503 y la directiva 86/278/EEC. Sin embargo, el Cr presentó un aumento en el suelo y obtuvo un rango crítico como valor, al culminar el ensayo con riesgo de toxicidad para la planta. La evaluación entre el lodo compostado y el lodo seco dio como resultado importantes diferencias comparadas con los controles que se manejaron. No obstante, el lodo estabilizado fue el que brindó un rendimiento muy favorable en su aplicación, pues proporcionó resultados notables en el desarrollo del cultivo. Aun así, se debe examinar la presencia de metales pesados y riesgo de toxicidad.

Delgado y Chima (19) evaluaron, en su tesis, la eficiencia del proceso de higienización del lodo y la calidad del producto final —el compost— como sustrato orgánico para mejorar suelos con fines agrícolas. Se diseñaron tres tipos de pilas de volteo en el trabajo experimental; se hicieron tres repeticiones para cada una de ellas, las cuales contienen entre su composición lodos residuales. La primera pila trabajó con lodo de digestión anaeróbica procedente del reactor anaerobio de flujo ascendente (31,6 %) + broza de espárrago (65,8 %) + poda de pasto (2,6 %); la segunda pila trabajó con lodo procedente de la Laguna Facultativa (31,6 %) + broza de espárrago (65,8 %) + poda de pasto (2,6 %), y la tercera pila trabajó con lodo procedente del estanque donde crían peces (33,3 %) + broza de espárrago (64,1 %) + poda de pasto (2,6 %). Al cabo de 25 días, el compost que se consiguió resultó ser beneficioso para el suelo, aunque se debe utilizar con restricción, pues si bien se alcanzó a reducir la concentración de coliformes fecales y termotolerantes, no se obtuvo una total higienización de los lodos. Se concluye que sí se puede obtener una disminución significativa de la carga orgánica y patógena en los lodos residuales de la PTAR de la Universidad Nacional de Ingeniería “UNITRAR”,

logrando un sustrato rico en minerales y humus, benéfico para las plantas, que puede ser usado con restricción sin significar un riesgo para la salud.

Castañeda (20) se planteó el reaprovechamiento del lodo activado y residuos orgánicos haciendo uso de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) para la obtención de humus. El diseño que se realizó para este experimento fue la aplicación de 5 tratamientos (T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5), cada uno de ellas con tres repeticiones acondicionadas en cajas. Al culminar el proceso de obtención de humus se detectó que la T_3 es la que más cerca estuvo del límite que establece la norma mexicana para humus; quedó probado que es importante la añadidura de la precomposta en distintas dosis, pues se obtiene humus orgánico de muy buena calidad.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

Las PTAR son instalaciones especializadas cuyo objetivo es separar los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales haciendo uso de operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos, hasta el grado que lo marquen las especificaciones, antes de verterlas a los cuerpos receptores. Estas plantas, para lograr el objetivo de descontaminar el agua en cada uno de sus procesos, requieren de gran cantidad de equipo especializado. La tecnología que permita el filtrado y procesado del agua es el factor crucial para el funcionamiento adecuado de estas instalaciones (21).

Un equipo especializado será el encargado de supervisar con frecuencia, que se desarrolle adecuadamente cada una de las etapas de trabajo y, por ende, también serán capaces de solucionar los inconvenientes que se puedan presentar en el transcurso de los procesos de descontaminación. El buen funcionamiento de la planta en cada una de sus etapas es esencial para alcanzar un resultado final que cumpla con los requisitos especificados a nivel ambiental (21). En el Perú, los ECA de agua son los estándares que rigen los vertidos de aguas residuales en los cuerpos de agua receptora (22).

Procesos involucrados en el tratamiento convencional de aguas residuales. El tratamiento convencional de las aguas residuales se divide en: (a) pretratamiento, (b) tratamiento primario, (c) tratamiento secundario, (d) tratamiento terciario para remover nutrientes (N, P) y, (e) desinfección (23).

- **Pretratamiento preliminar**

El pretratamiento desarrolla toda una serie de condiciones que deben presentar las aguas residuales (AR) para someterlas a los siguientes procesos de tratamiento secundario biológicos convencionales. El pretratamiento de las aguas urbanas mayormente es solo una operación física, es decir, se equilibran los caudales, se separan mediante rejillas y hay separación de arena o remanentes de aceites. Las AR industriales puede que requieran un pretratamiento químico, que se puede dar mediante el lavado con aire (separación de amoníaco), oxidación, reducción (precipitación de metales pesados) y proceso de flotación por aire (separación de aceites) (24).

- **Tratamiento primario**

El tratamiento primario es la operación física en la que se utiliza el filtro de rejas, desespumado, y sedimentación para separar contaminantes flotantes decantables o demasiado grandes para ser capaces de pasar por las rejas. Este tratamiento primario es capaz de eliminar el 35 % de la DBO, 20 % de fósforo y el 60 % de sólidos suspendidos (25). Cualquier DBO, N o P disuelto pasará a través del tratamiento primario y se incorporará al tratamiento secundario. El proceso de coagulación se puede añadir para acrecentar la eliminación de materia de partículas. Esto puede reducir el importe de energía global que se requiere durante el segundo tratamiento para convertir biológicamente estas partículas de CO₂ en nueva biomasa y agua.

- **Tratamiento secundario (biológico)**

El principal objetivo de este tratamiento consiste en eliminar los sólidos suspendidos y la DBO adicional, aún más de lo que se logra con la simple sedimentación. En el tratamiento biológico, los microorganismos utilizan el material orgánico que se encuentra en el agua residual como fuente de alimento y lo transforman en células biológicas llamadas biomasa. Teniendo en cuenta que en el agua se encuentra una gran variedad de sustancias orgánicas, para realizar el tratamiento se precisa de diversas clases de microorganismos; esto es un cultivo mezclado. Además, cada tipo de microorganismo que se encuentre en el cultivo mezclado utilizará la fuente de alimento más adecuada a su metabolismo (26). Usualmente se utilizan dos métodos y en los dos se utiliza la capacidad que poseen los microorganismos para transformar los residuos orgánicos en compuestos estabilizados de baja energía. En el tratamiento de crecimiento suspendido, los microorganismos se

fijan en el agua y se trasladan con ella. Lo contrario sucede en el tratamiento de crecimiento en película fija; este proceso se realiza en una superficie inmóvil, donde el agua circula por los microorganismos, muy parecido a cuando el agua corre por un medio filtrante en un proceso de potabilización.

- **Tratamiento terciario**

El tratamiento terciario o tratamiento avanzado es el proceso físico-químico que tiene como objetivo procurar eliminar los contaminantes que no se han podido eliminar en los anteriores tratamientos utilizando los procesos convencionales. Algunas veces se debe reducir elementos traza tales como compuestos orgánicos refractarios o metales pesados, por su alta toxicidad para la vida acuática o su injerencia con captaciones de agua potable aguas abajo. Los tratamientos avanzados de aguas residuales tienen básicamente dos funciones: afinado del efluente y eliminación de compuestos tóxicos.

Para ambas funciones, los tratamientos fácilmente disponibles son los siguientes: (a) separación de sólidos en suspensión, (b) adsorción de carbón activo (separación de compuestos orgánicos), (c) intercambio iónico, (d) ósmosis inversa, y (e) eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (27).

- **Desinfección**

El propósito de la desinfección es acabar con los organismos patógenos, y para ello se emplean indicadores de coliformes fecales y totales. Entre los procedimientos más usados están la desinfección con cloro, la ozonización y la radiación ultravioleta.

La desinfección con cloro es la que más se utiliza, pero esta forma de desinfección puede crear inconvenientes en los peces y en las aguas receptoras. Debido a ello, se realiza el procedimiento de dechloración, que consiste en la eliminación total del cloro residual combinado que existe tras la cloración (28).

La ozonización es un proceso de desinfección corto de contacto para eliminar los patógenos (28). El ozono suele reaccionar sencillamente con los restos orgánicos no saturados que se encuentran en las aguas residuales (27).

La desinfección por radiación ultravioleta no necesita de almacenaje ni genera residuos tóxicos. Tampoco produce compuestos que sean perjudiciales para el ambiente, pero sí se encuentra en función de la transparencia del agua, la cual puede influir en el paso de los rayos UV, de la aglomeración de sólidos

suspendidos que impiden el paso de dichos rayos, y de la concentración y tipo de patógenos que se quiere eliminar (29).

2.2.2 Lodos residuales de las plantas de tratamiento

Los lodos que se originan en las PTAR son el resultado de la concentración de los sólidos contenidos en el efluente, o de la formación de nuevos sólidos suspendidos resultantes de los sólidos disueltos. Estos lodos son subproductos que pueden ser líquidos, sólidos o semisólidos, los cuales son generados mientras se realizan los procesos mecánicos, biológicos y químicos de limpieza de las aguas servidas en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por lo general, están compuestos de gran cantidad de materia orgánica, macro y micronutrientes, microorganismos, metales pesados y agua. Estos lodos están constituidos básicamente por agentes contaminantes, debido a la aglomeración de materiales en suspensión y compuestos orgánicos en las condiciones de tratamiento (26).

Los lodos que se originan únicamente del proceso de separación sólido-líquido (decantación, flotación) son conocidos como lodos primarios, que están constituidos por partículas sólidas, básicamente de naturaleza orgánica, y a los que resultan de procesos biológicos se les denominan lodos secundarios, que son esencialmente biomasa en demasía obtenida de los procesos biológicos (30). Una parte considerable de las sustancias contaminantes que se eliminan en los procesos de tratamiento de aguas residuales se encuentra totalmente en estos lodos (30).

Las cantidades de lodo que se obtienen en los procesos de tratamiento de agua son consideradas significativas. En el tratamiento primario se originan entre 0,25 a 0,35 % del volumen de las aguas residuales tratadas, 1,5 a 2,0 % si se hace uso del proceso de lodos activados y 1,0 % adicional si se aplican sustancias químicas para la eliminación de fósforo.

Lógicamente, estos lodos no se deben evacuar sin un tratamiento previo, ya que podría ser causante de problemas ambientales.

- **Características y tipos de lodos**

La arena, pedazos de vidrio y de fierro, tornillos y otros materiales densos que se separan en los desarenadores, realmente no son lodo, ya que su consistencia para nada es fluida. Todos estos desechos se extraen de manera fácil y son relativamente estables a la actividad biológica, es decir, no

son biodegradables. Por lo regular estos materiales se disponen directamente en camiones de volteo al lugar establecido de disposición final de residuos sólidos municipales.

Lodos primarios o crudos: Es el residuo que se asienta en el fondo del sedimentador primario; contiene de 3 a 8 % de sólidos (1 % de sólidos = 1 g de sólidos/100 ml de volumen de lodos). De estos, alrededor del 70 % son de naturaleza orgánica. Este desecho toma condiciones anaerobias rápidamente y es de olor desagradable; su aspecto es pardo y pegajoso. Presentan una alta variabilidad debido a los diferentes tipos de componentes, ya sea urbano o industrial, y son susceptibles de provocar contaminación (31).

Lodos secundarios: Es el residuo del proceso de tratamiento secundario, constituido de materiales inertes y microorganismos. Se encuentra relativamente estabilizado, ya que el 90 % de los sólidos son de naturaleza orgánica, debido a la aireación que se ha dado en el proceso biológico, lo que resulta en la obtención de unos lodos con menos olores muy diferente de los lodos primarios. Estos lodos presentan condiciones sépticas, lo cual hace que sea imprescindible estabilizarlos. El contenido de sólidos está ligado a la fuente; por ejemplo, es de 0,5 a 1,5 % en los lodos activados de desecho y de 4 a 6 % en el lodo de filtros percoladores. En algunos casos, los lodos secundarios contienen precipitados químicos en gran cantidad; esto se debe a que el tanque de aireación es usado también como tanque de reacción para la añadidura de sustancias químicas, necesarias para la eliminación de fósforo (32).

Lodos terciarios: La naturaleza del proceso de tratamiento terciario contribuye en las propiedades de los lodos obtenidos. Ejemplo, la eliminación de P provoca lodos químicos trabajosos de tratar y manejar. Cuando la remoción de P se ejecuta en el proceso de lodos activados, el lodo químico se mezcla con el biológico, ocasionando que el lodo biológico sea más complicado de tratar. La eliminación de N por desnitrificación origina un lodo biológico con propiedades muy semejantes a las de los lodos activados de desecho.

- **Caracterización de los lodos**

Determinar las características de los lodos es la pieza fundamental para cuantificar las concentraciones de nutrientes, los compuestos dañinos que deben ser eliminados, con miras a su aplicación en suelos, fines agronómicos, forestales, etc. En un apropiado manejo de lodos se debe calcular la composición química (incluyendo la concentración de metales pesados) y

conocer el contenido de patógenos y parásitos que pueda haber en estos desechos.

Conforme con algunos estudios realizados, se ha fijado un grupo de indicadores que deben ser cuantificados, pues lo que se pretende es establecer el nivel de contaminación que poseen estos residuos. Existe un intervalo de valores para cada uno de esos indicadores (Tabla 1), información que posibilita realizar una elección adecuada de los procesos de tratamiento desde el punto de vista medioambiental y económico, con miras a permitir su reutilización o disposición final segura.

Tabla 1. Valores de los parámetros usualmente estudiados en los lodos

Indicadores	Máximo	Mínimo
DQO total (mg/L)	90000	6000
DBO total (mg/L)	30000	2000
Nitrógeno total (mg/L)	1500	200
Fósforo total (mg/L)	300	40
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	100000	7000
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	60000	40000
pH	8,5	7,0
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	10^8	10^6

Nota: Tomado de Amador- Díaz, Veliz-Lorenzo y Bataller-Venta, 2015, p. 3.

Existen metales que son necesarios, pero en concentraciones mínimas, como por ej. el zinc, cobalto, hierro o molibdeno, que son parte de la hemoglobina. Lamentablemente, el desarrollo tecnológico, la producción de residuos y el consumo masivo ha generado la presencia de metales en cantidades importantes. Los metales pesados de por sí son propios de la naturaleza y en algunos casos son muy útiles; en la atmósfera su concentración es menor al 0,1 % y en el suelo su concentración debería ser en función del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo, por lo que se hace necesario identificar y valorar estos elementos en los lodos.

El contenido de metales pesados es otro indicador que se debe valorar a la hora de hacer la caracterización del lodo. Los metales pesados están representados por un grupo de elementos químicos que se caracterizan por poseer una alta toxicidad para los seres vivos; sin embargo, se admite en concentraciones tolerables en los lodos para darle un manejo de forma segura (26).

Tabla 2. Concentraciones permisibles para los metales pesados en los lodos

Metal	Concentración (mg/kg de lodo seco)
Zinc	2500-4000
Cobre	1000-1750
Cromo	1000-1500
Plomo	750-1200
Níquel	300-400
Cadmio	20-40
Mercurio	16-25
Arsénico	20-40
Selenio	50-100
Molibdeno	10-25

Nota: Tomado de Amador-Díaz, Veliz-Lorenzo y Bataller-Venta, 2015, p. 3.

2.2.3 Tratamiento de los lodos residuales

Los procesos básicos para el tratamiento de desechos residuales son los siguientes:

Acondicionamiento: Es el tratamiento químico o térmico del lodo para mejorar la eficacia del espesado y la deshidratación. Consiste en separar el líquido de lo sólido (33). Entre los métodos de acondicionamiento de lodos más utilizados, tenemos la añadidura de coagulantes, tales como cal, el cloruro férrico, o polímeros orgánicos. Otro agente acondicionador que se usa es la ceniza producida de la incineración de los lodos. Los coagulantes químicos trabajan agrupando los sólidos; de esta forma se separa sencillamente del agua.

Otro método de acondicionamiento es calentarlo hasta que alcance temperatura y presión importantes de entre (175 a 230° C y 1000 a 2000 kPa). Bajo este estado, se tiende a liberar el agua que se halla mezclada en el lodo; sin embargo, la operación y el mantenimiento resultan ser muy complejos.

Espesamiento: Como primer paso del tratamiento de lodos se debe procurar reducir su carga volumétrica lo más que se pueda, antes de pasar a la deshidratación final o digestión del lodo. Esto se consigue por gravedad o flotación con aire disuelto. En el primero se deja precipitar hasta el fondo y en el segundo se ayuda a que los sólidos emerjan por encima del líquido mediante la inyección de aire a presión (275 a 55 kPa).

Deshidratación: Tiene como objetivo extraer la mayor cantidad posible de agua de los lodos para obtener un lodo seco y poroso. El método de deshidratación más usado ha sido el de lechos o camas de secado. Las camas de secado son usualmente utilizadas en pequeñas plantas de tratamiento, por la sencillez de su mantenimiento y operación. También se emplean otros métodos como: (a) filtración al vacío, que separa el agua aplicando el vacío a través de un medio poroso que retiene los sólidos y permite al agua continuar su recorrido; (b) filtración a presión, cuya ventaja principal sobre el de vacío es que se obtiene una torta mucho más seca; y (c) centrifugado, donde se utiliza un tazón sólido en el cual los sólidos son agitados hacia la pared por medio de la fuerza centrífuga y rastrillados por un tornillo sin fin; mediante el centrifugado se pueden deshidratar los lodos hasta un 30 por 100 sin mucha dificultad.

Estabilización: La estabilización del lodo es el proceso que convierte los sólidos orgánicos en formas más refractarias (inertes), lo cual da lugar a un lodo libre de patógenos. Mediante la estabilización se puede obtener una reducción de olores y eliminación de la putrefacción. Este proceso se da con la intención de que el lodo pueda manipularse o usarse como acondicionadores de suelo sin representar ningún daño o peligro para salud. Hay variedad de procesos para lograr la estabilización de lodos tales como digestión anaerobia, digestión aerobia, incineración, pirolisis, compostaje y vermicompostaje.

- **Digestión anaerobia**

Este proceso unitario es el utilizado con mayor frecuencia, pues no requiere aireación intensiva de energía. La digestión anaerobia se desarrolla en carencia de oxígeno, por microorganismos anaerobios, en reactores cerrados y acondicionados para tal fin. El tratamiento anaerobio de desechos complejos considera dos etapas. La primera etapa se conoce comúnmente como

fermentación ácida, la débil acidez del lodo, con pH ligeramente inferior a 7 baja a un nivel de 5,5.

En esta fase, los microorganismos atacan las sustancias presentes en el lodo, formando alcoholes, ácidos orgánicos y nuevas células bacterianas, de modo que observa poca estabilización de DBO o DQO. Inmediatamente después ocurre la segunda etapa, la cual se le conoce como digestión alcalina o fermentación del metano; acá se sube el pH hasta 7,4. Entonces, las bacterias anaerobias estrictas de varias especies transforman los productos finales de la primera etapa en gases primordialmente CH_4 y CO_2 . Es exactamente aquí donde el material orgánico es estabilizado realmente (27), (33).

- **Digestión aerobia**

La digestión aerobia es un proceso mediante el cual se produce una aireación, por un período de tiempo significativo, de una mezcla de lodo digerible de la clarificación primaria y del lodo del tratamiento biológico aerobio, obteniéndose como consecuencia una destrucción de células, y un descenso de sólidos volátiles en suspensión. El principal propósito de este proceso es reducir el contenido de sólidos para su disposición final. Esta reducción es el efecto de la transformación por oxidación de una parte esencial del lodo en productos volátiles. Los sólidos volátiles disminuyen como en la digestión anaerobia y así se obtiene un humus muy fertilizante y estabilizado. El proceso de digestión aerobia está guiado por los principios de los lodos activados y más puntualmente por la aireación prolongada. Las ventajas son: humus estabilizado como producto final, bajo coste de inversión, pocos olores, fácil realización, gas no explosivo (CO_2 y NH_3).

- **Incineración**

La incineración es utilizada para transformar la torta de lodos secos o desaguados en ceniza inerte. En algunos casos es probable obtener una combustión automantenida si se emplea un combustible auxiliar para subir la temperatura del hogar múltiple por arriba del punto de ignición. Los productos de combustión son fundamentalmente CO_2 , SO_2 , vapor de agua y ceniza. Regularmente se utilizan dos clases de equipos: de hogar múltiple y de lecho fluidizado para secado y combustión (30). Este proceso es muy poco empleado porque es complejo y necesita de personal cualificado. Asimismo, se debe tomar en consideración de que si no se ejecuta el proceso apropiadamente, puede suscitar problemas de contaminación atmosférica (33).

La incineración se emplea con frecuencia en países desarrollados. En el año 2000, en los Países Bajos, principalmente la provincia de Holanda, la incineración figuró en lugar prioritario con una previsión del 15 por 100 de lodos a incinerar. La incineración es una parte integral de las políticas de tratamiento de lodos en la mayoría de países desarrollados. Por ejemplo, en Ludwigshafen, en Alemania, los lodos químicos y urbanos se tratan en incineradoras de 120.000 t/año. Actualmente se incinera alrededor del 3 por 100 de los lodos en los Países Bajos con plantas en Dordrecht, Amsterdam y Oyen. Japón, en 1999, tenía 220 incineradora de lodos de depuradoras, siendo la metodología más favorecida el sistema de lecho fluidizado.

- **Pirolisis**

Existen variedad de sustancias orgánicas que son térmicamente inestables, y al someterse a calor en una atmósfera libre de oxígeno se despedazan en fracciones líquidas, sólidas y gaseosas, mediante una combinación de cracking térmico y reacciones de condensación. *Pirolisis* es el término utilizado para describir este proceso. A diferencia del proceso de combustión, el cual es muy exotérmico, el proceso de pirolisis es muy endotérmico. La pirolisis produce una corriente gaseosa que contiene H, CH₄, CO, CO₂ y otros dependiendo del lodo, una corriente de fuel/alquitrán, y un residuo de carbono casi puro.

- **Compostaje**

Es un proceso de estabilización biológica, que se realiza en presencia de oxígeno, temperatura específica y en condiciones de humedad, hasta lograr obtenerse un producto final estable. El lodo que se transforma en composta adecuadamente es un material sin inconvenientes de carácter sanitario, exento de microorganismos patógenos, de malos olores y de algunos contaminantes presentes en los lodos (33). En el proceso de compostaje se dan transformaciones que ocurrirían usualmente en el suelo de forma natural pero con una cinética más rápida, pues el desarrollo bacteriano tiene el ambiente favorable para optimizarse en este proceso. El compostaje de lodo se lleva a cabo mezclando este residuo deshidratado con un material de soporte que le brinde porosidad y permita el desplazamiento de aire dentro de la masa (catalogado este proceso, en opinión de algunos expertos, la diferencia clara de los procesos de compostaje de los de digestión aerobia) (34).

El compostaje es un proceso “seco” mientras que la digestión aerobia y anaerobia es un proceso “húmedo”. De manera natural, la descomposición aerobia se sucede en los suelos; sin embargo, el compostaje artificial concibe

todo este entorno “suelo” para apresurar la descomposición orgánica. El proceso de compostaje alcanza temperaturas entre 55 y 70° y requiere de 30 días para la degradación completa. Si se logra alcanzar esta degradación completa, se dice que el proceso es irreversible y el compost como producto final está estabilizado totalmente (24).

Uso y reaprovechamiento de lodos residuales. Los que más invierten en la infraestructura necesaria para reducir y estabilizar los lodos residuales son los países desarrollados, y no solo eso, sino que también cuentan con un registro sobre la calidad y cantidad del residuo, y con estadísticas sobre su disposición final o su aprovechamiento. Caso contrario sucede con los países en vías de desarrollo, pues los lodos residuales no se consideran como un desecho por tratar. Al ser visto de esta forma, es comprensible que la inversión en infraestructura sea totalmente baja o nula (35). Hace pocos años que se le viene dando importancia a los lodos como residuo orgánico, y ha avivado el interés para ser aplicado en el suelo, por ser una alternativa económicamente viable que ofrece beneficios agronómicos, pues se conoce que incorpora elementos fertilizantes al suelo como N y P. Son por estas cualidades que uno de sus potenciales usos es la aplicación agrícola, ya que posee un alto contenido de materia orgánica, de micronutrientes y macronutrientes (36).

Los lodos residuales también se pueden utilizar como fertilizantes forestales, ya que por su alto contenido de materia orgánica pueden ayudar a la recuperación de tierras, pues permiten que los suelos tengan una mayor cantidad de vegetación y se restablezcan, sobre todo en zonas semiáridas, lo cual genera un aumento en la vegetación y una merma en los niveles de erosión (36).

Estados Unidos asigna el 49 % de sus biosólidos en agricultura, silvicultura y mejoramiento de suelos. La Unión Europea distribuye un 45 % de sus lodos generados a la agricultura, China el 45 %, Canadá el 52 %, y América Latina solo el 5,6 % (35).

2.2.4 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara

El terreno de la PTAR tiene un área aproximada de 21.000 m². Está diseñada para operar los 360 días del año, 24 horas por día.

La PTAR opera un sistema de lodos activados de aireación extendida y está integrada por un pretratamiento seguido de un proceso mixto de tratamiento secundario, o también, sistema de tratamiento biológico anóxico-

aerobio; finalmente, un tratamiento terciario comprendido de filtración y cloración. A toda esta secuencia se integrará un sistema de control de olores en la etapa de pretratamiento y un sistema de acondicionamiento de lodos generados en la etapa biológica.

Descripción del proceso en la planta de tratamiento

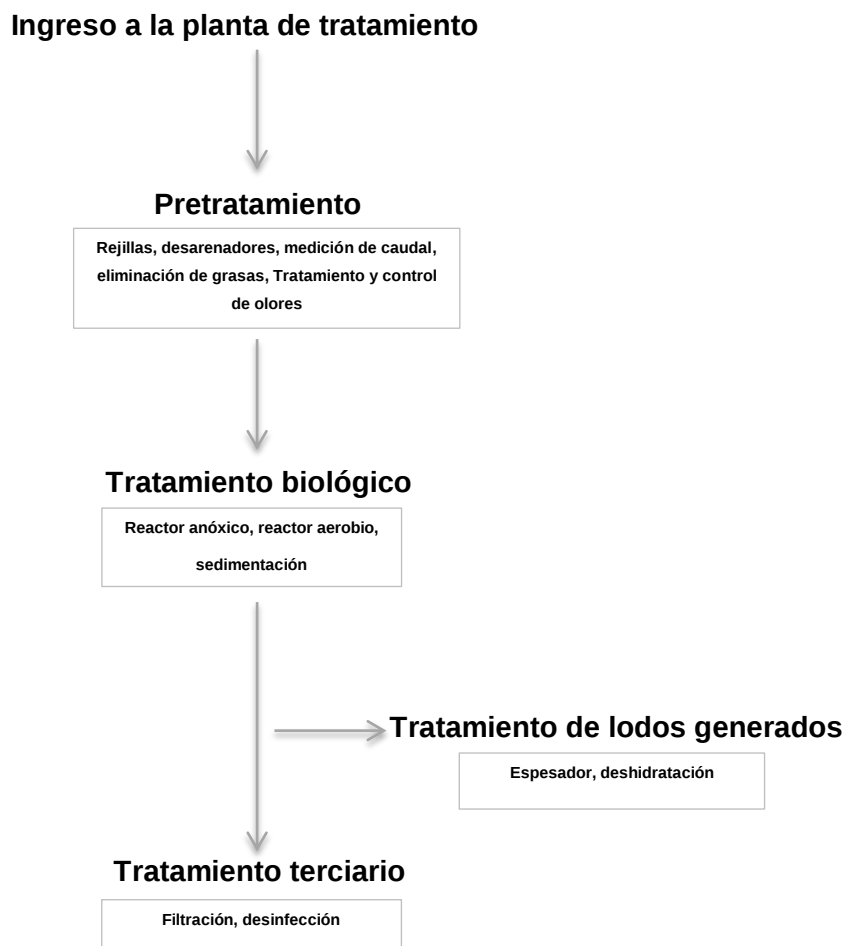


Figura 1. Descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta Santa Clara

Los lodos de la PTAR Santa Clara que se generan en el tratamiento biológico son enviados a las bombas centrífugas; de allí, se envía la purga de lodo hacia dos espesadores a gravedad. La carga con la que fueron diseñados estos equipos es de 31.85 kgSST/m²/d. El sobrenadante de los espesadores se manda por gravedad al cárcamo de bombeo de agua cruda y los lodos ya espesados son enviados mediante las bombas de cavidad progresiva hacia la etapa de deshidratación de lodos.

La *deshidratación* de lodos tiene como objetivo reducir su contenido de humedad para facilitar su manejo, disminuyendo los costos de transporte y minimizando la producción de lixiviados en el sitio de colocación. La

deshidratación de lodos se lleva a cabo mediante dos centrífugas decantadoras con capacidad máxima de 521.588 kg de sólidos/hora, lo que permite operar las centrífugas unas 16 horas por día.

2.2.5 Vermicompostaje

Vermes proviene del latín, que significa lombriz, gusano, y *vermicompostaje* es esencialmente compostaje orgánico con gusanos. El vermicompostaje, lombricompostaje o compostaje con lombrices, en sus diferentes denominaciones, es un proceso biotecnológico eficaz, libre de generación de residuos y de bajo coste, que permite biodegradar y estabilizar residuos orgánicos, bajo condiciones aerobias y mesófilas mediante la acción de ciertas especies de lombrices de tierra capaces de alimentarse del residuo a la vez que aceleran la degradación microbiana, obteniendo como resultado un recurso muy valioso, útil y respetuoso con el medio ambiente. En este proceso se aprovecha la capacidad detritívora de los anélidos que ingieren, trituran y digieren el desecho orgánico, descomponiéndolo a través de la acción de sus enzimas digestivas y de la microflora aeróbica que se encuentra dentro del intestino. En el lombricompostaje, las lombrices coexisten e interactúan estrechamente con los microorganismos, fundamentalmente bacterias y hongos, aunque también aparecen protozoos, microalgas y arqueas, acelerando la biodegradación y bioestabilización del residuo orgánico y modificando de este modo sus propiedades físicas, químicas, bioquímicas y biológicas (37) (38).

Dependiendo del residuo y la especie empleada dentro de la variedad de lombrices que participan en este tipo de procesos se ha encontrado que son tan aptas de consumir cantidades de residuos equivalentes al 50-100 % de su propio peso al día (39).

2.2.6 Biología de la lombriz

En el presente estudio se utilizará a la especie *Eisenia foetida* por motivo de crianza, reproducción y por la variedad de residuos orgánicos en la que vive. Además, es el anélido más adecuado para los procesos y sistemas de vermicompostaje (40). A la *Eisenia f.* se le conoce también como “lombriz atigrada”, porque presenta bandas intersegmentarias pálidas o amarillentas y es de color marrón (41).

Clasificación taxonómica: (42)

- Reino: Animalia

- Subreino: Eumetazoa
- Phylum: Anélida
- Clase: Oligoqueto
- Subclase: Diploesticulata
- Superorden: Megadrili
- Orden: Haplotaxida
- Suborden: Lumbricina
- Superfamilia: Lumbricoidea
- Familia: Lumbricidae
- Género: *Eisenia*
- Especie: *E. foetida*

Este tipo de especie posee un formidable mecanismo de autorregulación en su proceso de procreación. Si tienen excedente de alimento en su ambiente se multiplicarán y reproducirán a mayor velocidad; sin embargo, si existe insuficiente alimento o presentan condiciones perjudiciales (demasiado de calor o frío) autorregulan inmediatamente su disposición de reproducción, estableciéndose a mínimos o simplemente dejan de reproducirse. Se ha evidenciado tanto en medios de cultivo como en condiciones naturales, que con abundante alimento, la *E.f.* actúa con mucho apetito y eso le permite ser una de las especies de anélidos con mayor productividad de vermicompost (43). Además de ser lombrices con alta resistencia y de fácil manejo, pues comúnmente no se escapan de su lecho (43).

2.2.7 Anatomía y fisiología de la *Eisenia foetida*

Las lombrices de tierra pertenecen a la rama de los anélidos, clase Oligoqueto, que significa “con pocas quetas” (en alusión a 4 pares de cerdas que emergen apenas perceptibles de la piel, 2 laterales y 2 ventrales, y que permiten anclar partes del cuerpo al sustrato o al consorte durante la cópula). Pertenecen al grupo de los invertebrados y se distinguen por poseer un diseño estructural sencillo, cabeza no diferenciada, cuerpo segmentado y vermiforme, no posee órganos sensoriales especializados, cavidad del cuerpo recorrida por un tubo digestivo, un cordón nervioso ventilar y un sistema cerrado de vasos sanguíneos, intercambio gaseoso a través de superficie corporal húmeda y limitados mecanismos de control del equilibrio osmótico (44).

La cavidad digestiva se inicia con la boca (carece de dientes y dentículos), dando paso a la faringe (dilatable y que actúa de bomba de vacío,

lo cual le permite aspirar la comida); se prosigue con un esófago delgado que distalmente se dilata proporcionando dos cavidades: la molleja y el buche, ambas con recubrimiento quitinoso, y la primera dotada de una robusta musculatura. Luego, el intestino se expande por los 2/3 restantes del cuerpo, que desemboca en el extremo posterior en el ano. La lombriz *E. foetida* usualmente presenta un diámetro aproximado de entre 3 y 5 mm y una longitud de entre 4 y 8 cm.

Su sistema circulatorio es cerrado, lo cual significa que por los vasos sanguíneos la sangre circula. Los troncos principales del sistema consisten en un vaso que pasa dorsalmente en la pared del tubo digestivo y otro ubicado ventralmente, entre el tubo digestivo y la cadena ganglionar. En los lumbricidos se hallan unidos lateralmente el vaso dorsal y el ventral, y en la región anterior del cuerpo suelen engrosarse constituyendo los llamados 5 corazones. Por esta razón, si a un anélido se le cercena la cola puede seguir viviendo, porque sigue manteniendo su capacidad cardíaca.

El aparato reproductor de la *Eisenia f.* es hermafrodita protándrica (maduran primero las gónadas masculinas), su fecundación es cruzada y cada individuo reúne ambos sexos, por tanto producen óvulos y espermatozoides. Son hermafroditas incompletas, lo que significa que son incapaces de autorreproducirse, pues necesitan de otra lombriz para copular. El genital masculino coloca el esperma en el genital femenino, donde es retenido hasta el instante de la fecundación; al cabo de unos días, la lombriz produce cápsulas, también denominadas capullos o cocón, que incluyen un número variable de huevos (entre 1 y 20). Un órgano muy particular del anélido es el clitelo, anillo que se encuentra en el primer tercio del cuerpo, cerca de la cabeza. Su función es reproductora, proporcionando la secreción de un líquido cuya función es dar protección a los huevos. La existencia del clitelo permite reconocer si la lombriz es adulta y si esta apta para llevar a cabo acciones reproductoras. En un medio/alimento adecuado, la *Eisenia foetida* se reproduce semanalmente y durante todo el año (45) (07).

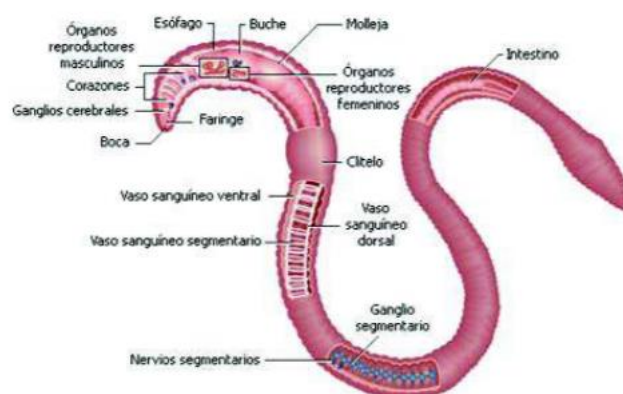


Figura 2. Tomada de "Distribución de los órganos principales de la lombriz", por Barbado, 2003, p.25.

2.2.8 Factores limitantes para el desarrollo de la *Eisenia f.*

Temperatura. Para que la lombriz se desarrolle adecuadamente, debe ser necesario que la temperatura del medio que la albergue sea de 14-27 °C, puesto que la temperatura afecta la tasa metabólica de la población de anélidos, así como los patrones de distribución y actividad de la misma, limitando la tasa de crecimiento y reproducción de la población de lombrices durante el vermicompostaje.

Humedad. Las lombrices implicadas en el proceso de vermicompostaje tienen su mejor progreso a una humedad entre el 85-95 %. Frente a la sequía, la lombriz se defiende permaneciendo aletargada.

pH. Se debe tener en cuenta la acidez o alcalinidad del medio. Los anélidos aceptan un nivel de tolerancia a este parámetro; por fuera del nivel, no aumentan ni son capaces de reproducirse con la misma eficacia. El nivel óptimo para la lombriz es un pH de entre 6 y 8. La labor de las lombrices hace que el sustrato evolucione hacia valores más moderados centrados en torno a la neutralidad.

Luz. La lombriz es una especie fotofóbica, pues posee a lo largo de su cuerpo un sistema de sensores para detectar la presencia de luz solar. Obviamente, no será capaz de desarrollarse en la superficie del desecho si este se encuentra iluminado.

Aireación. Los anélidos, al no tener órganos respiratorios especializados, adquieren el oxígeno por difusión mediante la pared del cuerpo, utilizando el mismo mecanismo para eliminar el CO₂. No obstante, los anélidos son altamente sensibles a las condiciones anaerobias, por lo que su respiración en condiciones de baja presión de oxígeno puede disminuir entre un 55 % y un

65 %. Asimismo, se puede ver mermada la función alimenticia bajo estas condiciones no óptimas.

Conductividad eléctrica. La lombriz tiene muy poca capacidad de osmorregular las sales que absorbe mediante su piel; por consiguiente, si el residuo orgánico en el que habita posee una mayor cantidad de sales, esto tiende a obstruir la apropiada digestión de los anélidos; por ello suelen vivir apropiadamente en sustratos con baja CE. La CE superior a 8 dS m^{-1} puede ocasionar el deceso de la *Eisenia foetida*.

Relación C/N. La relación C/N óptima está en torno a 25. Ahora bien, si la relación C/N es mayor de 40, merma la actividad biológica, dado que los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono, ralentizando el proceso, debido a la deficiente disponibilidad de N para la síntesis proteica (46).

2.2.9 Lombrices y microorganismos en el vermicompostaje

El vermicompostaje es un proceso biooxidativo, el cual se realiza en condiciones aerobias y mesófilas dado que las lombrices coexisten e interactúan estrechamente con los microorganismos, fundamentalmente bacterias y hongos, aunque también aparecen protozoos, microalgas y arqueas, acelerando la biodegradación y bioestabilización del residuo orgánico y modificando, de este modo, sus propiedades físicas, químicas, bioquímicas y biológicas. Tradicionalmente, se ha considerado que la degradación bioquímica del residuo orgánico es llevada a cabo, fundamentalmente, por la acción de los microorganismos involucrados en el proceso de lombricompostaje, ya que producen y liberan enzimas; mientras que las lombrices dirigen y acondicionan el sustrato mecánicamente. Sin embargo, actualmente existen estudios que han revelado que la labor de las lombrices durante el vermicompostaje determina la estructura, diversidad y funcionalidad de las comunidades microbianas que se suceden durante el proceso, así como las comunidades microbianas que se establecen en los vermicompost obtenidos (47).

Las lombrices ejercen una doble acción, directa e indirecta, sobre los microorganismos autóctonos del residuo orgánico, dirigiendo la sucesión de poblaciones microbianas que acompaña a los cambios físico-químicos del residuo orgánico que se producen a lo largo de las distintas etapas del proceso de lombricompostaje. Los efectos directos están relacionados con la actividad propia de los anélidos en el proceso, como la digestión del residuo orgánico y de los microorganismos albergados en él, mientras que los efectos indirectos se relacionan con los cambios físico-químicos derivados de los efectos

directos, como, por ejemplo, la fragmentación del residuo o la aireación del mismo debido al desplazamiento de las lombrices. El residuo orgánico ingerido es fragmentado y triturado aumentando su área superficial, lo que permite su colonización microbiana (48).

Por otro lado, el tránsito a través del intestino del anélido del residuo orgánico altera también su composición química, aumentando la concentración de nutrientes que será asimilable sin esfuerzo por los microorganismos, los cuales se desarrollan velozmente en el residuo recién excretado logrando terminar finalmente su degradación (49). El *mucus* producido por la lombriz y sus excreciones incentiva la reproducción de microorganismos degradadores de M.O. en el desecho durante el proceso de vermicompostaje, dado que estos compuestos son mucho más simples de asimilar para los microorganismos (48).

Así mismo, el desplazamiento de las lombrices dentro del residuo promueve su aireación estimulando su biooxidación microbiana (50). Por consiguiente, gracias al trabajo conjunto de lombrices y microorganismos, el residuo orgánico es degradado hasta mineralizarse parcialmente, humificarse y estabilizarse. Al final, el producto resultante, del cual ya se ha retirado la población de lombrices y que ha sido sometido a una etapa de maduración, presenta unas características físicas, químicas y bioquímicas muy distintas al residuo original, difiriendo además en cuanto a la estructura y biodiversidad de su comunidad microbiana, la cual es estable y dependiente del tipo de vermicompost obtenido a partir del residuo orgánico particular biotransformado.

2.2.10 Alimentación de la *Eisenia foetida*

La cantidad de residuos usada para el proceso de vermicompostaje debe ser la idónea como para permitir el adecuado crecimiento de los anélidos. En el caso de residuos considerados óptimos para alimentar a las lombrices, se establece que bajo condiciones de lombricompostaje adecuadas, una biomasa de lombriz de un kg requiere esa misma cantidad de residuo al día (51). En otro estudio (52), se evidenció que en el caso de un residuo compuesto por lodo residual y papel, una biomasa de lombrices de la especie *E. f.* de 1 kg puede compostar óptimamente 1,25 kg de este residuo. Sin embargo, los mismos autores señalaron que una menor cantidad de alimento, 0,75 kg de residuo/kg lombriz/día permite obtener un vermicompost más degradado y de mayor calidad. También se demuestra que 1 kg de *Eisenia foetida* era capaz de vermicompostar 0,8 kg de lodos de PTAR al día (53). En otro caso también se

descubrió que en residuos tales como heces humanas, la máxima cantidad de residuo que *Eisenia f.* puede lombricompostar al día es de 0,5 kg residuo/lombriz. Estas investigaciones sugieren que entre 0,5 y 1 kg de residuos se degrada al día en procesos de vermicompostaje donde se emplea una población de lombrices de 1 kg.

Residuos utilizados en el vermicompostaje. Existen muchos residuos utilizables generados de actividades diferentes, como la industria, la agricultura y lo urbano. A pesar de la fácil capacidad de adaptación que presenta la lombriz, la característica del sustrato o material de crecimiento puede afectar directamente el estado y reproducción de este organismo. Los residuos más empleados para este proceso son lodos de PTAR, restos hortícolas, estiércoles, y otros residuos vegetales (procedentes de procesos agroalimentarios, jardín, paja de cereales, etc.).

2.2.11 Cambios mediante el vermicompostaje en lodos de PTAR

Se ha definido la estabilización de los biosólidos como la eliminación de olores indeseables, la reducción de patógenos (bacterias, virus) y vectores de enfermedades (roedores, moscas), así como la disminución de toxinas biodegradables (hidrocarburos, pesticidas) y metales pesados como cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc (54).

Relación del vermicompostaje en los metales pesados. La *Eisenia foetida*, tiene la capacidad de tolerar altas concentraciones de metales pesados, inmovilizándolos en las paredes de su intestino. Luego, los metales pesados son transferidos a las glándulas calcíferas que posee la lombriz, donde son regulados bioquímicamente y excretados a una concentración menor que la inicial.

Con respecto al efecto que pueda tener el uso de lombrices en los metales pesados que se encuentran en los residuos orgánicos, los estudios realizados muestran resultados contradictorios, pues en algunos estudios se ha reportado el aumento en las concentraciones de estos elementos y otros estudios demuestran el efecto contrario. Sin embargo, de modo general, se puede decir que el vermicompostaje disminuye la concentración de metales pesados asimilables para cultivos vegetales (50).

pH y conductividad. El trabajo mutuo entre microorganismos y lombrices durante el proceso de vermicompostaje produce cambios importantes en las propiedades químicas del residuo. En las glándulas

calcíferas de las lombrices también se lleva a cabo la regulación del pH del lodo residual (55). Y esta es una de las propiedades que tiende a ser modificada en este proceso, el cual cambia de acuerdo con el valor que presente inicialmente este parámetro en el residuo orgánico a vermicompostar. Si se utilizan residuos orgánicos alcalinos, este llega a disminuir su pH obteniéndose un vermicompost con valores cercanos a la neutralidad. Lo contrario sucede si se utilizan residuos orgánicos ácidos, pues el pH tiende a subir y los vermicompost obtenidos suelen ser neutros o ligeramente alcalinos.

Otro parámetro que también llega a cambiar significativamente en los procesos de vermicompostaje es el contenido de sales; la CE usualmente se reduce por el lavado de sales tras el riego para conservar la humedad, pero se han observado experimentos en los cuales tiende a subir debido al efecto de la mineralización de MO.

Materia orgánica. Durante los procesos de vermicompostaje, la teoría señala que la materia orgánica debe ir disminuyendo debido al constante accionar de los microorganismos y lombrices, esto se refleja primordialmente en la mineralización de las moléculas orgánicas del residuo hasta compuestos inorgánicos y formas orgánicas más simples. El grado de disminución está relacionado con factores tales como la especie de lombriz utilizada, el tipo de residuo orgánico, su biodegradabilidad y, naturalmente, las condiciones en las que se lleva a cabo el vermicompostaje y su tiempo de duración.

Conocer este parámetro es esencial, porque de ser aplicado al suelo, la cantidad de MO que la enmienda orgánica aporte afectará directa y totalmente en las propiedades (físicas, químicas y biológicas) y en la fertilidad del suelo; por ello, es importante conocer su estabilidad.

Macronutrientes. Se conoce que el vermicompostaje eleva la concentración de nutrientes (K-P-Mg-Ca) en el residuo orgánico utilizado como sustrato; esto se produce debido a que la materia orgánica del residuo es mineralizado y porque el residuo tiende a reducir su volumen tras el vermicompostaje, lo cual provoca que aumente la concentración de nutrientes en el residuo vermicompostado.

Microorganismos patógenos. Existen numerosos estudios que demuestran que la lombriz *Ef.* es capaz de eliminar microorganismos patógenos y parásitos presentes en el lodo residual, ya que cuando el residuo atraviesa su sistema digestivo, los microorganismos depredadores ahí

presentes reducen las poblaciones de bacterias como *Salmonella sp* y *Escherichia coli*, al igual que esporas y quistes de otros parásitos (56).

2.2.12 Vermicompost - humus de lombriz

Es el producto que resulta de las transformaciones bioquímicas y microbiológicas que tienen lugar en los residuos orgánicos a través del proceso de ingestión y digestión por los anélidos, así como de la actividad microbiana asociada en el lombricompostaje. El humus de lombriz presenta un color oscuro acercándose al negro, con la apariencia de uniformidad, ligereza y porosidad que son características de los suelos fértiles; posee un alto contenido de materia orgánica parcialmente humificada, y concentraciones significativas de macro y micronutriente, concentraciones variables de sustancias fitohormonales y se encuentra libre de sustancias fitotóxicas, así como, de patógenos humanos. Además, todos los diferentes tipos de vermicomposts que se pueden producir a partir de diversos residuos orgánicos son materiales estables que podrían ser almacenados sin sufrir alteraciones posteriores significativas.

2.2.13 Marco legal

Las regulaciones que tienen los lodos residuales en el mundo tienen varias consideraciones; por ejemplo, establecen parámetros y límites en las concentraciones de metales pesados. En EE. UU. y la Unión Europea las normativas son muy similares al respecto, que han sido imitadas en muchos países. Por lo regular, las normatividades establecen los mismos indicadores de contaminación fecal (coliformes fecales y huevos de helminto), e instauran la necesidad de tratamiento de los lodos (secado térmico, estabilización química, digestión anaeróbica, aeróbica, etc.) para que al ser transformados en biosólidos puedan ser aplicados a suelos (57).

Normas internacionales.

México: NOM-004-Semarnat-2002. Norma oficial mexicana de protección ambiental –lodos y biosólidos–, especificaciones y LMP de contaminación para su aprovechamiento y disposición final (59).

EPA: 40 CFR Part 503. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (1992) (60).

Unión Europea: Directiva 86/278/CEE. Norma de protección al medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura (61).

Normas nacionales. Entre los documentos que regularizan el manejo, monitoreo y reaprovechamiento de los lodos en el Perú, se pueden mencionar los siguientes:

Resolución Ministerial N.º 128-2017-VIVIENDA. “Aprueban condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final”.

Resolución Ministerial N.º 093-2018-VIVIENDA. “Protocolo de monitoreo de biosólidos”

Resolución Ministerial N.º 024-2017-VIVIENDA. “Reglamento para el reaprovechamiento de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales”

Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA. “Decreto supremo que aprueba el reglamento para el aprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales”.

Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM. “Decreto Supremo que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para suelo (ECA)”.

Todos los biosólidos deben obedecer una serie de requisitos para su reaprovechamiento, ya sea para uso agrícola, forestal industrial o energético. Para ello, se hace mención de los parámetros que se deben cumplir para poder reutilizarlos. Por tanto, el vermicompost de lodos residuales debe cumplir los parámetros de microorganismos patógenos y de concentraciones de metales pesados para poder ser clasificado como clase A o B, perteneciente al Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA.

2.3 Definición de términos básicos

Aguas residuales: Son las que se producen en hogares, oficinas, industrias e instituciones, y pueden ser mezcladas con agua de lluvia, aguas superficiales y aguas subterráneas (62).

Demanda biológica de oxígeno (DBO): Es la medida del oxígeno utilizada por organismos para la oxidación de la M.O. (62).

Demanda química de oxígeno (DQO): Es la medida, mediante oxidación química con bicromato, de la mayor cantidad de M.O. (62).

Estándares de Calidad Ambiental (ECA): Son instrumentos de gestión ambiental que se utilizan para medir la situación de la calidad del ambiente.

Fija los rangos de concentración de elementos o sustancias presentes en el ambiente, que no representen peligro para la salud y el ambiente.

Microorganismos: Son organismos de muy pequeña dimensión que solo se pueden ver en microscopio (63).

Orgánico: Es un elemento que contiene C y H, y usualmente otros elementos como azufre, oxígeno y nitrógeno. Se refiere a los residuos/materiales de origen natural y orgánico (vegetal, animal o microbiano), es decir, material compostable (64).

Biomasa: Es la materia orgánica que se origina de un proceso biológico, la cual puede ser provocada o espontánea, y es empleada como fuente de energía (65).

Patógenos: Son protozoarios, bacterias, virus, hongos, huevos de helminto en lodos y/o biosólidos aptos de causar epidemias y enfermedades en el ser humano.

Efluente: Son las aguas servidas con desechos líquidos, sólidos o gaseosos que se originan en vivienda y/o industrias; generalmente se vierten a las corrientes de agua (66).

Contaminación: Es cualquier sustancia que, dada su concentración y/o naturaleza, puede tener consecuencias negativas sobre el entorno (medio ambiente).

Biodegradable: Es aquello que se descompone en condiciones ambientales naturales mediante un agente biológico.

Antropogénico: Acciones humanas que, en particular, tienen efecto sobre la naturaleza (67).

Estabilización de lodo: Es el proceso de reducción de la fracción orgánica (*sólidos volátiles*) en relación con la materia seca (*sólidos totales*) para vigilar la degradación biológica en el material, los potenciales de generación de olores, de atracción de vectores y de patogenicidad aplicados a los lodos de PTAR.

Residuo: Material inservible después de haber realizado un trabajo u operación (68).

Biotechnológico: Actividad que se basa en conocimientos multidisciplinarios, hace uso de agentes biológicos y organismos vivos para crear productos útiles o resolver problemas (69).

Sustrato: Es el medio o alimento del que están compuestos los lechos del vermicultivo.

Clitelo: Cinturón que se halla en el tercio anterior del cuerpo de los anélidos, mostrando su madurez. Provistos de glándulas que suministran el alimento y la cubierta del cocón.

Vermiforme: Que tiene forma de gusano (70).

Cocón: O puesta, capullo que encierra los embriones, lombricitas, que subsisten de un líquido que lo llena. No es un huevo (los huevos son colocados dentro del cocón).

Humus: “Mantillo”, MO estabilizada que alberga o atrapa nutrientes minerales (sales), indispensables para el desarrollo vegetal.

2.4 Modelo teórico conceptual

Este modelo teórico (Figura 3) es la representación sistemática de cada etapa por la cual se conduce el experimento a realizarse.

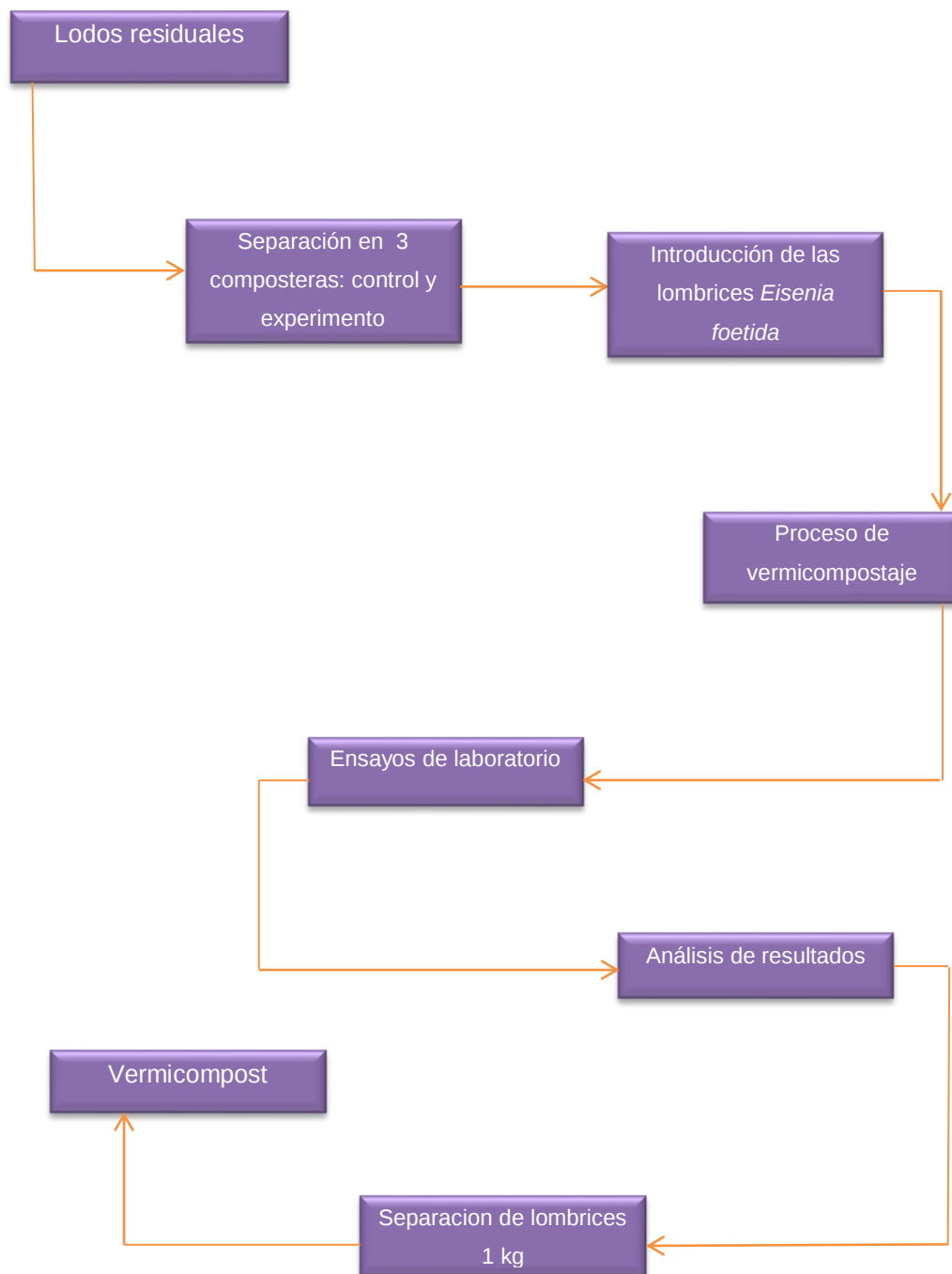


Figura 3. Modelo teórico conceptual.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método y alcance de la investigación

3.1.1 Método de investigación

3.1.1.1 Método general o teórico de la investigación

El método de investigación es de tipo científico *deductivo*, pues se va a determinar la influencia que tiene el vermicompostaje sobre los lodos que son desechos por terminar en un relleno sanitario. Se partirá de ideas generales hasta llegar a un experimento particular que llevará a conclusiones particulares; lo cual quiere decir que se determinará si la variable independiente, en este caso el vermicompostaje, tiene efecto positivo sobre los lodos residuales, que es la variable dependiente (71).

3.1.1.2 Método específico de la investigación

El método de investigación es de tipo *cuantitativo*, ya que se adapta perfectamente a la presente investigación, pues se establecerán comparaciones numéricas de los datos recolectados mediante los ensayos recogidos secuencialmente en todo el proceso del experimento. Estos datos serán analizados para brindar un resultado final y objetivo, y de esta manera responder a las hipótesis (72).

3.1.2 Alcance de la investigación

Alcance descriptivo-correlacional. Los estudios *descriptivos* buscan establecer las características, propiedades y perfiles de cualquier grupo que se sujete a estudio. Es decir, evalúan, recolectan o miden la información sobre distintos conceptos (variables), dimensiones, componentes o aspectos del fenómeno por investigar, mas no es su propósito señalar cómo las variables medidas se relacionan (72).

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, esta investigación busca conocer parámetros tales como conductividad eléctrica, pH, humedad, SV, ST, P, K, MO, Pb, Cr, Cd, etc.

El propósito de los estudios *correlacionales* es conocer la relación que existe entre dos o más categorías, conceptos o variables en una situación en particular. Una correlación entre dos o más variables no supone una relación causal entre ellos, es decir, solo significa que dichos valores están relacionados ya sea de forma negativa (cuando uno se eleva el otro disminuye) o en forma positiva (se elevan o disminuyen juntos) (72).

Para la presente investigación, se relacionará la influencia que ejercen las lombrices sobre los lodos residuales por medio del experimento.

3.2 Diseño de la investigación

Se trata de un diseño *experimental*, es decir, un procedimiento científico que permite inducir relaciones empíricas entre variables o comprobar la veracidad de una hipótesis, ley o modelo, por medio de un experimento controlado (71).

En este tipo de diseño se manipula intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador.

Asimismo, en el diseño experimental, la variable independiente (el vermicompostaje) se manipulará para conocer los efectos que tiene sobre la variable dependiente (lodos residuales) (72).

En la presente investigación, se realizará un experimento preliminar, para determinar la capacidad de adaptación de la lombriz *Eisenia foetida* al nuevo sustrato “lodos residuales”, dando a conocer que los lodos residuales serán puros, por lo que no se hará ningún tipo de mezclas. Luego, se proseguirá con un experimento regular que cuenta con dos grupos: el primero de control y el segundo experimental, el cual a su vez cuenta con dos repeticiones del mismo tipo. Los resultados cuantitativos de los grupos experimentales se analizarán tres veces para determinar cambios en los parámetros propuestos.

3.2.1 Tipo de diseño de la investigación

La investigación presenta una categoría *cuasiexperimental* (debido a que ambas muestras son grupos intactos constituidos). En este tipo de categoría no se escogen al azar ni se emparejan los tipos de muestras que forman parte del grupo de control.

El diseño contará con preprueba – posprueba para controlar el experimento. El diseño presenta la siguiente forma para el vermicompostaje (72):

G	–	O
G ₁	X	O ₁

G = Lodos residuales puros

_ = Ausencia de estímulo

O = Medición de parámetros físicos, químicos y microbiológicos

G₁= Lodos residuales

X = Estímulo (lombriz *Eisenia f.*)

O₁= Medición de parámetros físicos, químicos y microbiológicos

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población del presente estudio estará compuesta por los lodos residuales finales que provienen de la centrifuga, de la PTAR Santa Clara producidos en el mes de marzo del 2021.

La PTAR Santa Clara emplea un sistema de tratamiento de lodos activados con aireación extendida.

3.3.2 Muestra

Muestra no probabilística. La elección de muestra será de tipo no probabilístico, o también llamado muestras dirigidas; suponen un procedimiento de selección informal. Se aplican en cuantiosas investigaciones cualitativas y cuantitativas. En este tipo de muestras, la elección de los sujetos no depende de que todos tengan la misma probabilidad de ser elegidos, sino de la decisión del investigador (72). El método no probabilístico se adapta a la investigación emprendida y al tipo de población por utilizarse.

Muestra homogénea. En este tipo de muestra, las unidades por seleccionar poseen las mismas características o perfil, o bien comparten rangos similares. Su propósito es centrarse en el tema por investigar. Las muestras homogéneas se usan también para integrar grupos en experimentos y cuasi experimentos, donde se procura que los sujetos sean similares en variables.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, la muestra es de tipo homogénea, ya que la población estará constituida por 18 kg de lodos residuales con rasgos y características similares (los lodos finales provenientes de la centrifugadora tienen las mismas características; por tanto, se puede tomar la muestra desde cualquier punto de los contenedores).



Figura 4. Recolección de muestras de la centrífuga en la PTAR Santa Clara



Figura 5. Muestra homogénea de los lodos residuales

Tamaño de la muestra. En esta investigación se va a utilizar 18 kg de lodos homogéneos, los cuales serán distribuidos en tres porciones diferentes de 5 kg cada una. A estas porciones se las llamarán camas y los 3 kg restantes serán llevados al laboratorio para analizarlos y conocer sus propiedades.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1 Técnica de la observación

La técnica que se empleará en la presente investigación es la de la observación, ya que esta técnica consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos o conductas que se manifiestan. En muy diversas circunstancias puede utilizarse como instrumento de medición. Antes de comenzar la recolección de datos, las variables por observar son especificadas y definidas en la observación cualitativa. Además, se enfoca en

información que por medio de los sentidos (datos visuales, auditivos, producto del tacto y el olfato) puede ser evaluada (72).

Al hacer uso de esta técnica, se puede recopilar información sobre el cambio de textura, color, olor que se va presentando en los lodos residuales, la adaptación de las lombrices a su nuevo sustrato, el tiempo en el que las lombrices van transformando los lodos. En cuanto al color, este se irá midiendo utilizando la tabla de Munsell (ver Anexo 1).

Descripción de instrumentos.

Registro de observación. Este instrumento sirvió para registrar y observar los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el proceso de vermicompostaje.

Notas. Este instrumento se utilizó para determinar cambios en el proceso de vermicompostaje. Los datos que se obtengan se volcarán en los registros por procesar. Día a día se tomarán notas en una bitácora sobre la presencia de lombrices en las camas, color, olor.

3.4.2 Técnica de recolección de datos secundarios

Estos datos son recolectados por distintos investigadores, lo cual conlleva la revisión de registros públicos, documentos y archivos relacionados con el tema de investigación (72).

En la presente investigación, esta técnica fue de mucha utilidad, pues se ha podido comparar la calidad del vermicompost obtenido con las normas peruanas para determinar si se pueden recuperar los lodos residuales, como lo plantea esta tesis.

Descripción de instrumentos.

Informe de ensayo IE-230321-02. Análisis de parámetros físico, químico y microbiológico realizado a los lodos residuales deshidratados de la PTAR Santa Clara, por la empresa Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. SLAB (ver Anexo 3).

Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA. “Decreto supremo que aprueba el Reglamento para el aprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales”.

Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM. “Decreto supremo que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para suelo”.

3.4.3 Técnica de observación asistida

Se hará uso de esta técnica para recopilar información de los valores que presenten los parámetros por evaluarse, los cuales se realizarán en el laboratorio SLAB.

Descripción de instrumentos.

- Informe de ensayo de vermicompost: Análisis de parámetros químico y microbiológico realizado a los 7 días, por la empresa Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. SLAB (ver Anexo 4).
- Informe de ensayo de vermicompost: Análisis de los parámetros anteriores realizado a los 14 días, por la empresa Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. (SLAB) (ver Anexo 5).

Tabla 3. Técnica e instrumentos de recolección de datos

Técnica	Instrumento
Observación	➤ Bitácora de notas ➤ Conteo de lombrices ➤ Tabla de MUNSELL ➤ Fotografías
Recolección de datos secundarios	➤ Informe de ensayo IE-230321-02 Análisis de lodos residuales ➤ Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA ➤ Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM
Observación asistida	- Mediante instrumentos electrónicos ➤ Análisis de vermicompost a 7 días ➤ Análisis de vermicompost a 14 días.

3.5 Procedimiento de la investigación

3.5.1 Observación

Ubicación de la PTAR. La presente investigación hará uso de los lodos residuales finales de la PTAR Santa Clara, la cual está ubicada en la margen izquierda del río Rímac entre las coordenadas:

- 8671400 N 294200 E

- 8671550 N 294300 E

Se localiza entre el km 10,5 de la Carretera Central, distrito de Ate Vitarte, provincia y departamento de Lima, tal como se muestra en la Figura 5. Esta planta está planeada para limpiar un caudal de 437,81 l/s provenientes de los desagües de Huaycán, Nicolás de Piérola y Santa Clara.

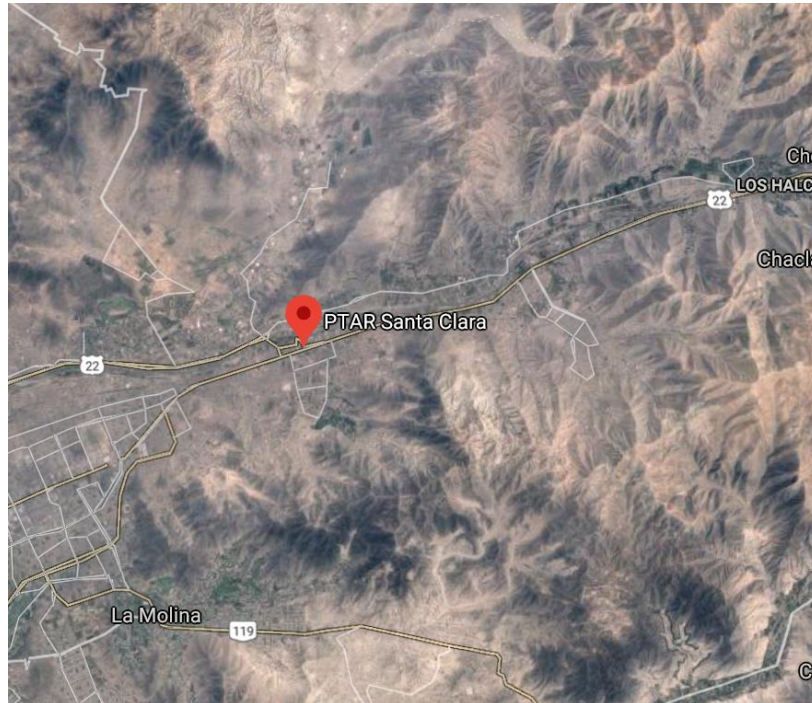


Figura 6. Ubicación de la PTAR Santa Clara. Google maps.

Toma de muestra para la investigación.

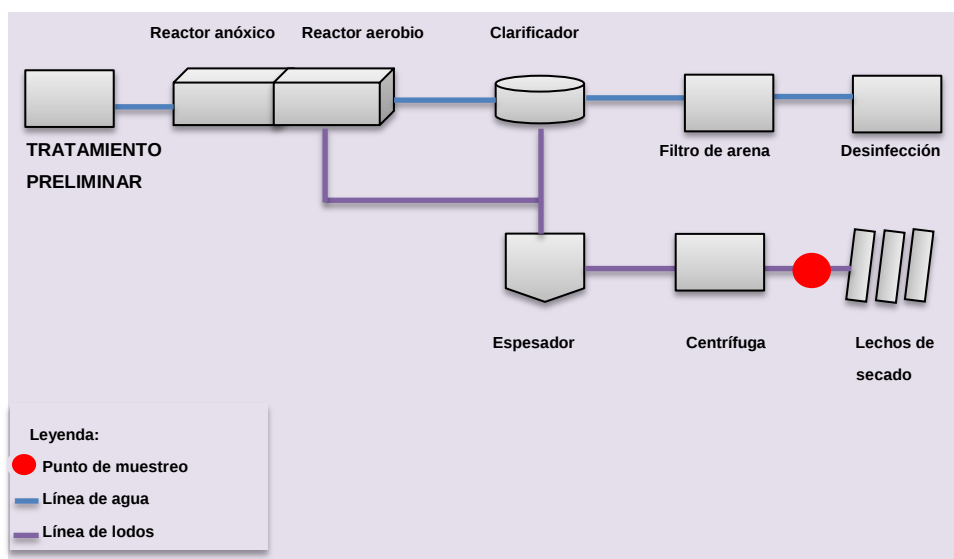


Figura 7. Punto de muestreo de la Planta Santa Clara. Adaptada de "Propuesta de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica", por Candela- Lévano, 2020.

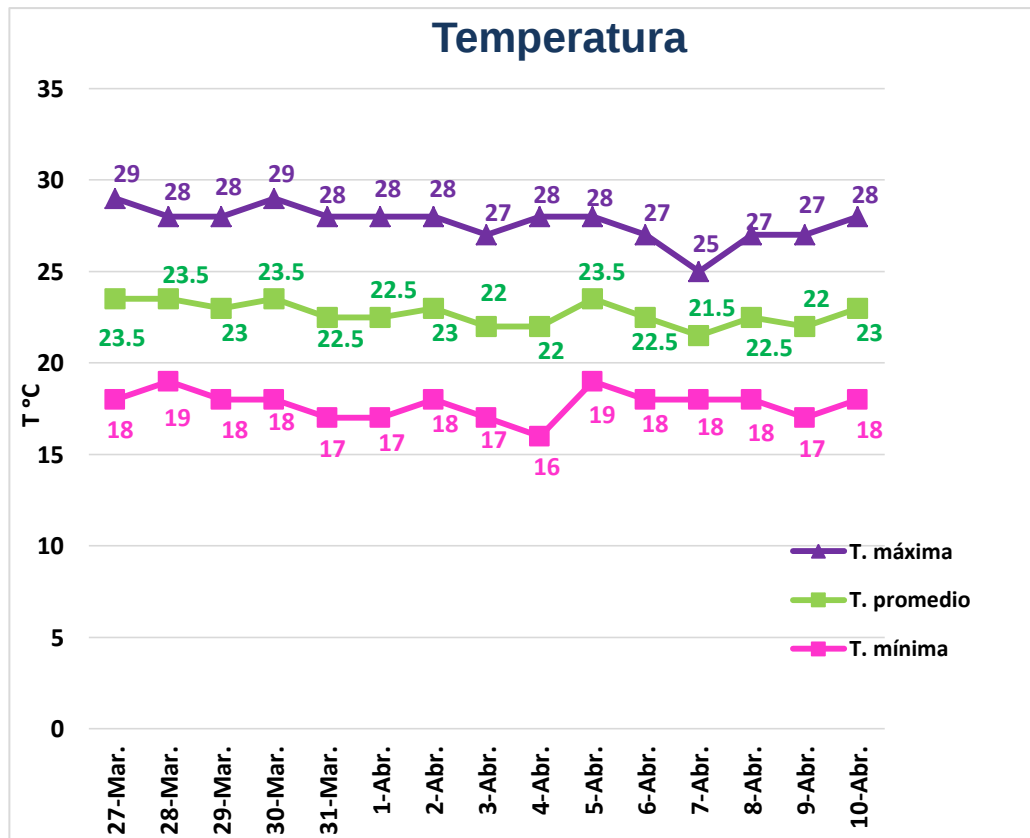
La PTAR Santa Clara, a cargo del Ing. Francisco Quezada, brindó dentro de sus posibilidades todas las facilidades, “pese a las medidas sanitarias tomadas debido al Covid-19”, para entrar en su entidad y obtener los lodos residuales para este trabajo de investigación. La cantidad de lodos recogidos fue de 18 kg en el punto de muestreo, los cuales fueron recolectados en dos baldes de plástico siguiendo los protocolos de seguridad para manipular desechos peligrosos. Una vez completada la cantidad, se procedió a tapar herméticamente los baldes para su traslado al lugar del experimento.

Igualmente, ese mismo día se separaron en dos bolsas de plástico tres kilos de lodo residual, los cuales fueron etiquetados para ser llevados al laboratorio, pues esa es la cantidad mínima de lodo que exige el laboratorio para su análisis.

Debido a la situación de pandemia en el Perú, factor limitante en la investigación, los laboratorios como el de la Universidad Agraria La Molina y otros no estuvieron operando, por lo que se decidió optar por un laboratorio particular.

Ubicación del campo experimental. Este experimento se llevó a cabo en la azotea de una casa ubicada en el distrito de Santa Anita, Lima, en el periodo de marzo-abril del año 2021.

Condiciones climáticas del área experimental. El día 27 de marzo de 2021, día en que se llevó a cabo el experimento, las condiciones climatológicas en la capital se mostraron favorables, con una temperatura en el rango de los 18 °C a 29 °C, lo cual es óptimo para el desarrollo de las lombrices. Los datos climatológicos se tomaron del Senamhi, tal como se muestra en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Rango de temperaturas del 27 de marzo al 10 de abril. Se aprecian las variaciones climatológicas para el óptimo desarrollo de la *Eisenia f.*

Preparación de las camas. Se fabricaron tres camas de madera, las cuales fueron forradas en el interior con arpilleras y se prepararon 2 tapas de mallas raschel negras. Este material sirvió para protegerlas de la luz y permitirles la entrada de oxígeno a las lombrices.

En las Figuras 8 y 9 se aprecian las medidas de las camas.

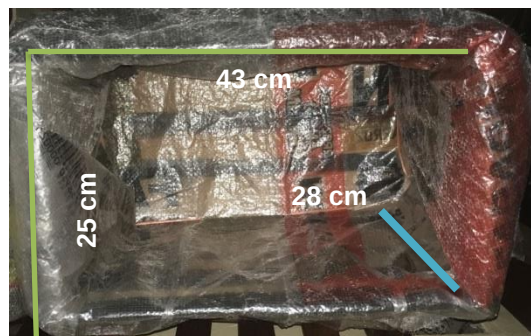


Figura 8. Camas de madera.



Figura 9. Cama envuelta en mala Raschel.

Compra de lombrices y conteo de lombrices. Las lombrices *Eisenia f.* (ver Figuras 10 y 11) fueron obtenidas del criadero de lombrices del ing. Roberto Velásquez. Los anélidos obtenidos fueron ejemplares adultos y reproductores que presentaban su estructura clitelar formada. Se compraron 2 kg de lombriz limpia (es decir, lombriz sin sustrato, solo lombriz).



Figura 10. *Eisenia foetida*.



Figura 11. Lombrices de edad adulta.

Al obtener lombrices en edad adulta, reproductoras, se decidió contarlas para determinar si hubo incremento o disminución de las mismas en el transcurso del experimento; esto con el objetivo de comparar las cantidades al finalizar. En la Tabla 4 se aprecia el resultado obtenido una vez realizado el conteo de lombrices de forma manual.

Tabla 4. Cuantificación de lombrices

<i>Eisenia foetida</i>	
1 kg	# de anélidos
C _{1a}	834
C _{1b}	823

Procedimiento preliminar. Esta investigación propone el vermicompostaje en los lodos residuales puros sin ningún tipo de mezcla con otro sustrato. Ante este hecho, surgía la incógnita de si las lombrices serían capaces de sobrevivir a su nuevo sustrato, considerando que se habían criado consumiendo solo restos orgánicos (cáscaras de frutas, verduras, cáscara de huevo, podas de jardín, etc.); por ello, a modo de prueba de supervivencia recomendada por Ferruzzi, se utilizó ½ kg de lombrices en ½ kg de su propio sustrato y un 1 kg de lodos residuales, para observar la adaptabilidad de los anélidos. Al cabo de 3 días, se observó que la especie *Eisenia f.* presentaba una adaptabilidad excelente al lodo, pues gran parte de las lombrices se habían trasladado al lodo residual dejando a atrás su propio sustrato. Ante estos resultados se procedió con el experimento en sí.

Inicio del experimento. Se prepararon las tres camas, nominadas de ahora en adelante como C₀, C_{1a} y C_{1b} (ver Figura 12). La primera es la cama de control, la segunda y la tercera son camas experimentales (ver Figura 13), cuya estructura se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Mezclas de lodo residual y lombrices

Camas	Estructura de las mezclas	
C ₀	5 kg de lodo residual puro	-
C _{1a}	5 kg de lodo residual puro	1 kg de lombrices
C _{1b}	5 kg de lodo residual puro	1 kg de lombrices

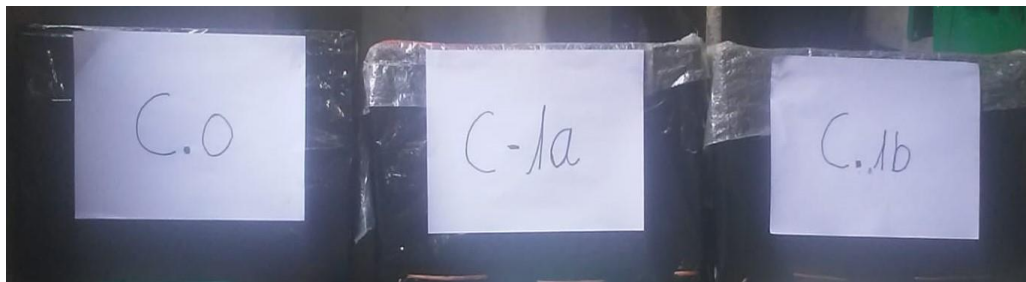


Figura 12. Denominación de las mezclas.



Figura 13. Camas en proceso de investigación.

A las camas C_{1a} y C_{1b} se les chequeó la humedad utilizando el método del puño cerrado, observándose la tendencia al goteo según Schuldt. Al comprobar que ambas presentaban humedad de entre 80 y 85 % se les agregó 1 kg de lombrices. De este modo, empezó el experimento el día 27 de marzo del 2021 por la mañana. Por la tarde, se observó que gran parte de las lombrices ya habían ingresado al interior del lodo residual; fue entonces cuando se procedió a cubrirlas con la malla raschel para evitar el ingreso de luz y de insectos. Las camas serán observadas diariamente a fin de verificar el comportamiento de las lombrices, humedad, olor, color.

Humedad. Este parámetro estuvo controlado por una “frecuencia de riego a criterio” que por lo regular se hacía cada dos días, de acuerdo con las inspecciones hechas día tras día, tomando en cuenta también la temperatura ambiental del momento.

Color, olor. El lodo residual mostró parámetros organolépticos iniciales muy marcados, el color del lodo es marrón claro a simple vista, presenta una textura pastosa de grumos grandes y un olor sumamente desagradable al inicio del experimento. Se espera que en el transcurso de los días, debido a la intensa actividad de los anélidos y microorganismos, el vermicompost presente cambios en el color y el olor. Como se mencionó, el color del lodo a simple vista parece ser marrón claro; sin embargo, se hará uso de la tabla Munsell 10

YR para determinar el color exacto del lodo residual (ver Tablas 6, 7 y 8). Esta tabla contiene el color particular del humus, el cual es 10 YR 2/1. Se espera llegar a esa tonalidad con este experimento, y para registrarlo se utilizará una ficha de observación desde los días 0, 7 y 14.

Tabla 6. Registro de colores mediante la tabla de Munsell

Registro de colores			
10YR Munsell			
Fecha	C ₀	C _{1a}	C _{1b}
27/03/2021	5/4	5/4	5/4

Tabla 7. Propuesta de registro de olor

Registro de olor			
Rango de olor propuesto			
Fecha	C ₀	C _{1a}	C _{1b}
27/03/2021	1	1	1

Tabla 8. Caracterización de olor

1	Olor desagradable
2	Olor medio
3	Sin olor
4	Olor a tierra

Control sanitario. Este control se realizó todos los días durante el experimento, control que se aplicó para estar al pendiente de eventualidades tales como amenazas, fuga de lombrices, acontecimientos extraños que pueden afectar el vermicompost.

Lombrices. Las lombrices presentan una adaptabilidad inmediata al lodo residual, observándose que desde el día inicial empiezan a comer el sustrato. No se presentó fuga de lombrices, lo cual es un indicativo de que el lodo presenta las condiciones necesarias para el óptimo desarrollo de los anélidos.

Al cuarto día se observó que en la superficie del lodo hay huevos o cocones de lombrices; esto se debe en gran medida a que las lombrices utilizadas ya estaban en una edad adulta y las condiciones actuales de su hábitat son óptimas para reproducirse.

Recolección de vermicompost y retirada de lombrices. La recolección de 3 kg del vermicompost de la C_{1a} para llevar al laboratorio se realiza de forma manual, así como la retirada de lombrices.

La recolección de 3 kg del vermicompost de la C_{1b} para llevar a laboratorio se realiza de forma manual, así como la retirada de las lombrices.

Fotografías. El experimento queda registrado en las fotografías que a diario se toman para tener constancia de las actividades llevadas a cabo y verificar que los datos son verdaderos.

3.5.2 Recolección de datos secundarios

El laboratorio Sistema de Servicio y Análisis Químico S.A.C. (SLAB) es el que se ha escogido para realizar los tres ensayos de este experimento. Los parámetros por evaluarse se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros que serán evaluados por el laboratorio SLAB

Parámetro	Unidad	Metodología
Plomo, Cromo, Cadmio	mg/kg (Base seca)	ICP-MS
Conductividad eléctrica	uS/cm	Nom-021-RECNAT-2000
pH	%	EPA SW-846 Method 9045D Revision 4
humedad	%	Gravimetría
SV	g/L	Gravimetría
ST	g/L	Gravimetría
Materia orgánica	% (Base seca)	Nom-021-RECNAT-2000
Relación C/N	-	Cálculo
Potasio	mg/kg	Absorción Atómica-Llama
Fósforo	mg/kg	UV-VIS
Nitrógeno total	% (Base seca)	Kjeldahl
Coliformes totales	NMP/100g ST	SMEWW 9221B, 23 rd Ed. 2017
<i>Escherichia coli</i> (NMP)	NMP/100g ST	SMEWW 9221F, 23 rd Ed. 2017
<i>Salmonella</i>	NMP/1g ST	Nom-004-Semarnat-2002
Huevos de helminto	N/4g ST	Nom-004-Semarnat-2002

Primer ensayo: lodos residuales de la PTAR Santa Clara. El día 24 de marzo del 2021 se llevó al laboratorio el primer ensayo de lodos residuales para conocer sus características. La muestra recogida fueron 3 kg de lodos puros, los cuales serán analizados por el laboratorio SLAB. Este ensayo se efectuó con la finalidad de comparar los resultados al final del experimento.

Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA. “Decreto supremo que aprueba el Reglamento para el aprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales”.

Se tomará de referencia este decreto supremo, que indica los parámetros que deben tener los lodos para ser recuperados y reaprovechados, y de acuerdo con los resultados, se podrá determinar si el vermicompost de lodos obtenido califica para ser categorizado como Clase A o B. En las Tablas 10, 11 y 12 se presentan los parámetros del Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA.

Tabla 10. Estabilización de lodos

Concentración de materia orgánica
Materia orgánica (SV) ≤ 60 % de materia seca (ST)

Tabla 11. Parámetros de toxicidad química

Parámetro de toxicidad química en biosólidos de Clase A y de Clase B								
mg/kg ST	Zinc	Cobre	Cromo	Níquel	Plomo	Cadmio	Arsénico	Mercurio
Materia seca								
Clase A y Clase B	2400	1500	1200	400	40	40	40	17

Tabla 12. 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 spp</i> < 1 NMP/10g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, o en su defecto, mediante alguna de las
Indicador de huevos de Helminto	Huevos de Helminto <1 / 4g ST o Prueba de utilización de tecnologías	

indicadas para la higienización	tecnologías indicadas para la higienización, en la sección B del Anexo II.
---------------------------------	--

Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM. “Decreto supremo que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para suelo ECA”. De igual modo, se utilizarán los parámetros del ECA de suelo para tener como referencia la aplicación al tipo de suelo que se le puede dar al vermicompost de lodo, tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Usos del suelo

Parámetros en mg/kg Peso seco	Suelo agrícola	Suelo residencial /parques	Suelo comercial / Industrial / extractivo	Métodos de ensayo
Inorgánicos				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total	750	500	2000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	..	400	1000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060 EPA 7199 ó DIN EN 1592
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 o 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051

Cianuro	0,9	0,9	8	EPA 9013
Libre				SEMWW-AWWA- WEF 4500 CN F ó ASTM D7237 y/o ISO 17690:2015

3.5.3 Observación asistida mediante instrumentos electrónicos

Parámetros por evaluarse en el laboratorio.

Análisis de vermicompost a 7 días. El día 5 de abril se llevó el segundo ensayo del vermicompost de lodos recolectado el día 3 de abril al laboratorio. La muestra fue de 3 kg a 7 días de trabajo arduo de las lombrices en el experimento (ver Figura 13). El ensayo será analizado por SLAB Laboratorio, de ensayo e investigación; de esta forma, se sabrá la influencia que tienen las lombrices sobre los lodos residuales.



Figura 14. Vermicomposta preparada para ser trasladada al laboratorio.

Análisis a 14 días. El día 12 de abril se efectuó el tercer ensayo del vermicompost de lodo recolectado el día 10 de abril al laboratorio. Al igual que en el anterior ensayo, se llevaron 3 kg de abono a 14 días de iniciado el experimento (ver Figura 14). El ensayo se analizará por SLAB Laboratorio.



Figura 15. Vermicomposta a 14 días preparada para ser trasladada al laboratorio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

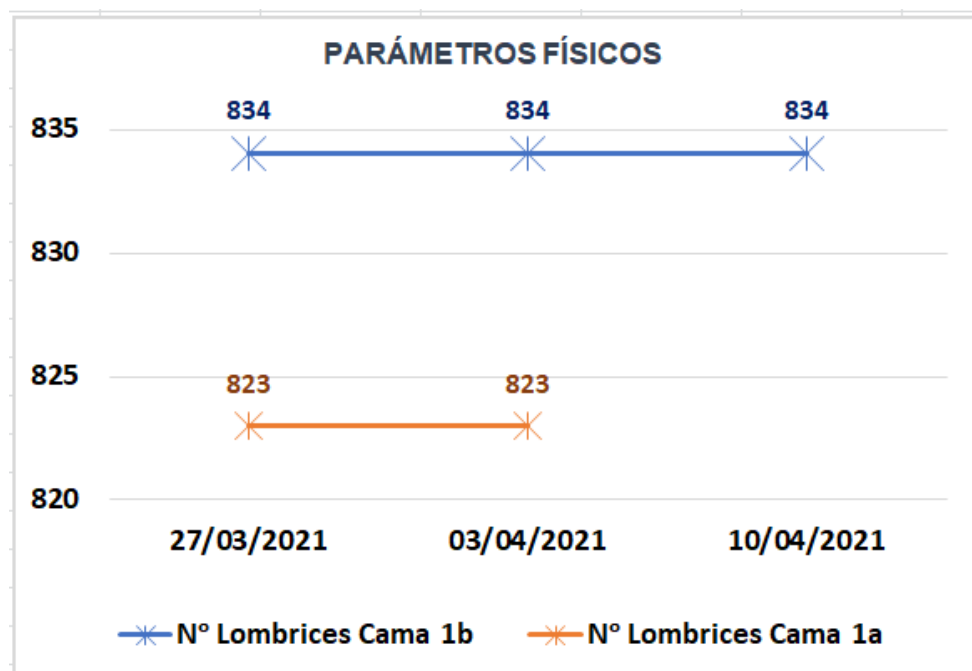
4.1 Resultados de la investigación y análisis de la información recopilada

A continuación, se consignan los resultados a los que se llegaron una vez que finalizó el experimento y se hizo uso de los instrumentos de recolección de datos.

4.1.1 Parámetros físicos

4.1.1.1 Existencia de lombrices. Una vez adquiridas las lombrices para el experimento, se procedió a contarlas al inicio y al final de los 7 días y la C1b a los 14 días. Las cantidades se pueden observar en la Gráfica 2.

Gráfica 2. Conteo de lombrices en los periodos de experimento



En la Gráfica 2 se muestran los valores que presentan al inicio y al final las dos camas. La C1a presenta 823 lombrices y la C1b= 834. Se observa que la cantidad de lombrices se mantiene constante en ambas, lo cual indica que no hubo decesos ni reproducción de los anélidos. Sin embargo, al finalizar el experimento se observó que en la C1b se encontraban en la superficie del vermicompost muchos cocones de lombriz, lo cual denota que las condiciones para la reproducción de estos anélidos fueron óptimas y permite suponer que si se hubiera extendido el tiempo del experimento se hubiese visto un aumento de lombrices dentro de los parámetros físicos.

4.1.1.2 Registro de color del vermicompost. El color se analizó utilizando la tabla Munsell 10YR, la cual contiene el color particular del humus. El análisis se realizó desde el primer día del experimento; los resultados registrados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Registro de color de acuerdo con la tabla Munsell

Días	C ₀	C _{1a}	C _{1b}
10YR Munsell			
27/03/2021	5/4 	5/4	5/4
03/04/2021	5/4	4/3 	4/3
10/04/2021	5/4	-	2/2 

Nota. La tabla Munsell es uno de los métodos colorimétricos que más se utilizan para identificar el tipo de color que posee un suelo.

En la Tabla 14 se observa el cambio que se produjo en el lodo hasta su transformación a vermicompost. Como lo mencionan muchas bibliografías, las lombrices y los microorganismos conjuntamente logran producir cambios en el color del residuo. El color oscuro del vermicompost se debe a las excretas de los anélidos y al trabajo de las poblaciones microbianas. La cama de control se mantiene constante; sin embargo, la C_{1a} presenta cambios de color pasados los 7 días debido al trabajo constante de las lombrices. En la C_{1b} el color a 14 días llega a presentarse más oscuro, pero no alcanza a llegar al rango 2/1; no obstante, se puede considerar un rango 2/2 como un color también óptimo del sustrato estabilizado.

4.1.1.3 Registro del olor del vermicompost. El cambio de olor en este experimento fue bastante apreciable al sentido olfativo desde el comienzo del experimento hasta su conclusión. Por ello, se creó una tabla de registro de olor (ver Tabla 15) para valorar los cambios paulatinos que se sucedieron en el vermicompostaje.

Tabla 15. Registro de olor

Días	C ₀	C _{1a}	C _{1b}
Olor			
27/03/2021	1	1	1
03/04/2021	1	2	2
07/04/2021	2	-	3

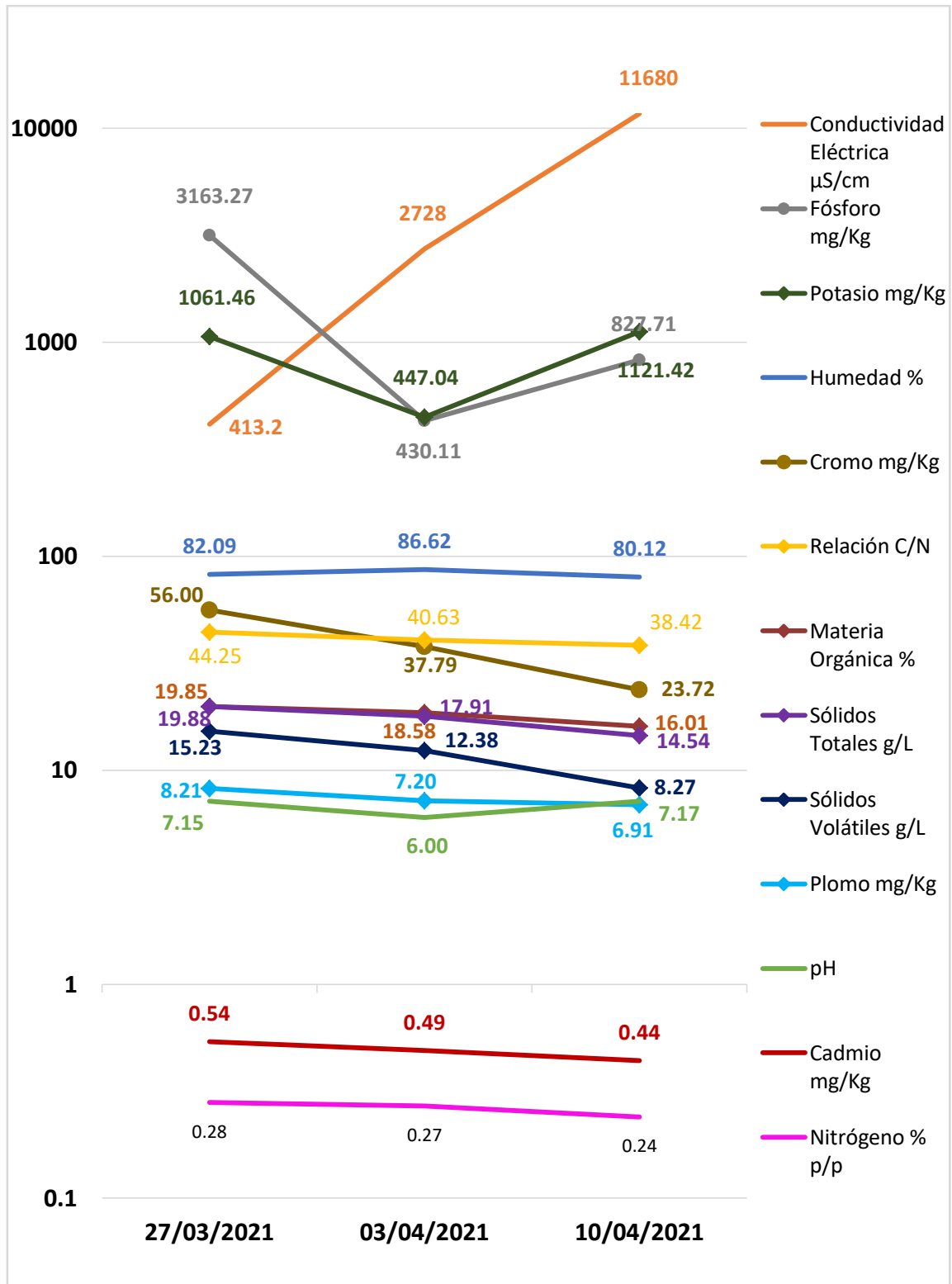
10/04/2021	2	-	4
------------	---	---	---

Nota. La categorización de olor se planteó para tener un registro del cambio que presentan los lodos residuales hasta la obtención del vermicompost.

4.1.1.4 Parámetros organolépticos. Si bien estos parámetros no son cuantificables, no pueden dejar de mencionarse, ya que en el transcurso de las dos semanas del experimento se observaron algunos cambios significativos con respecto a la textura del lodo vermicompostado, pues fue cambiando paulatinamente llegándose a obtener finalmente un residuo mucho más granulado, suelto, con un olor y color diferentes a los iniciales (ver Anexo 2).

4.1.2 Parámetros químicos

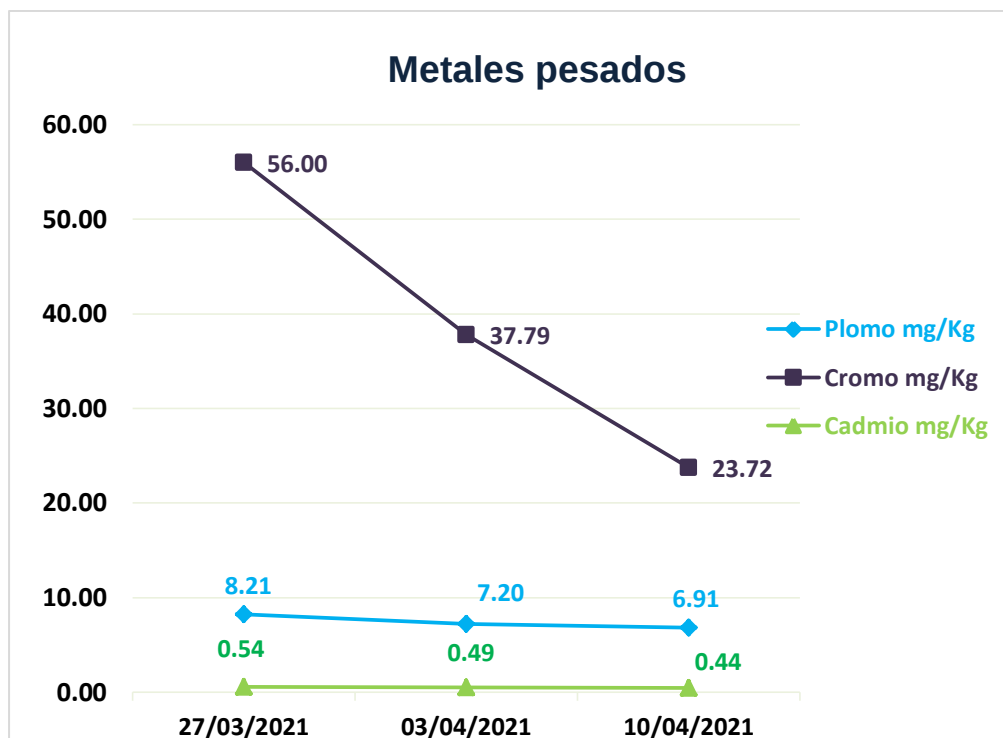
Gráfica 3. Parámetros químicos



Nota: Resultados obtenidos del laboratorio SLAB Sistema de Servicio y Análisis Químico S.A.C.

4.1.2.1 Presencia de metales pesados.

Gráfica 4. Resultados de laboratorio



Nota: mg/kg= miligramo/kilogramo.

De acuerdo con la Gráfica 4, los lodos de la PTAR que se enviaron a analizar en el primer análisis muestran la presencia de metales pesados, aunque es bastante bajo, lo cual sorprende, puesto que se esperaban concentraciones más elevadas. Aun así, esta presencia se puede deber a la proveniencia de los efluentes que, por lo general, son descargas de hogares domésticos, e industrias de todo tipo tales como lavanderías, farmacéuticas, curtido, etc. Sin embargo, en el transcurso del experimento se ve una moderada disminución en las concentraciones de los metales, el Pb muestra una reducción del 16 % y el Cd del 19 %. Los parámetros de metales pesados están dentro de lo que menciona el DS-N°015-2017-VIVIENDA. Ahora bien, en el ECA de suelos en cuanto a cromo, el primer ensayo muestra una concentración superior a la permitida para su aplicación a suelos agrícolas, aunque en el último ensayo se observa que ha habido una disminución del 58 %.

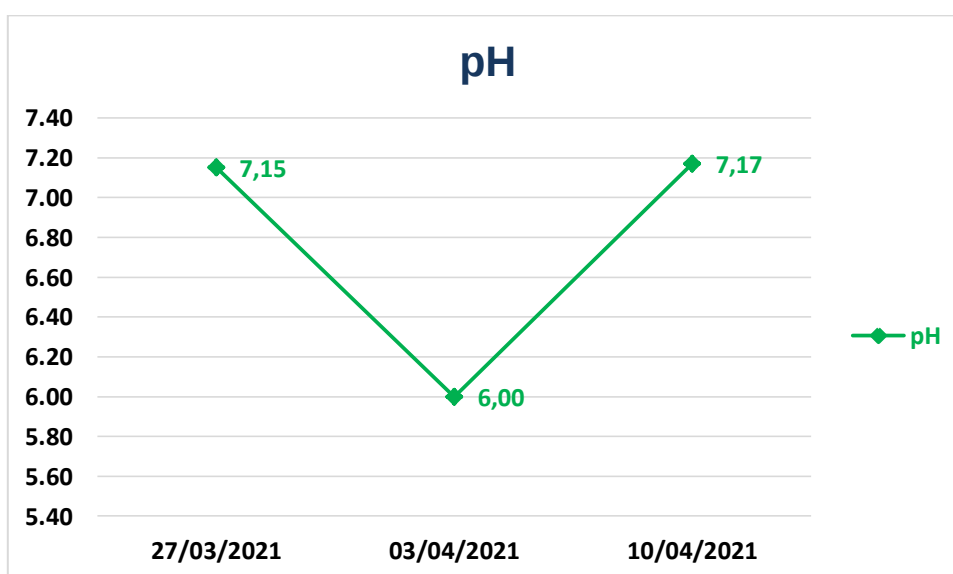
Tabla 16. Parámetros de toxicidad química

Comparación de resultados		Parámetros de toxicidad química mg/kg ST		
		Pb	Cd	Cr
Decreto Supremo N°015-2017-VIVIENDA		400	40	1500
Decreto Supremo N°011-2017-MINAM ECA para suelo agrícola.		70	1.4	-
Ensayo de lodos residuales IE-230321-02	C ₀	8,21	0,54	56
Ensayo de vermicompost 7 días IE-200421-02	C _{1a}	7,20	0,49	37,79
Ensayo de vermicompost 14 días IE-200422-03	C _{1b}	6,81	0,44	23,72

El experimento realizado muestra que los metales pesados analizados se encuentran dentro de los parámetros que menciona el Decreto Supremo N°015-2017-VIVIENDA. Ahora bien, para los *ECA de suelo*, si se desea aplicar el vermicompost a suelos agrícolas, solo el Pb y el Cd se encuentran dentro del rango; no sucede así con el Cr, que excede los límites. No obstante, el Cr presenta una reducción del 58 % a comparación del ensayo inicial.

4.1.2.2 Comparativa del pH

Gráfica 5. Resultados de laboratorio de pH



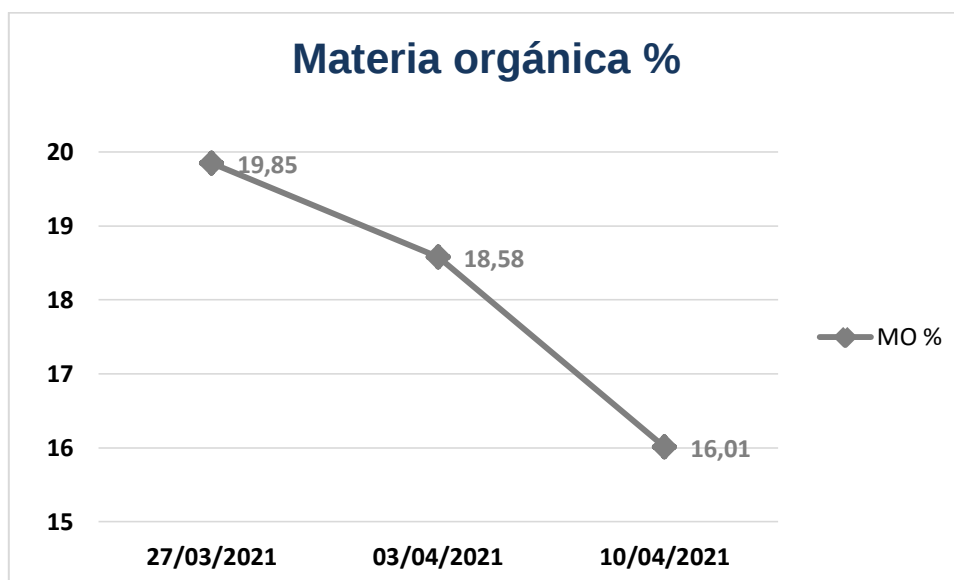
Como se puede ver en la Gráfica 5, el pH presenta un valor inicial de 7,15, lo cual muestra que el lodo residual era un lodo básico o alcalino, que, justamente para el desarrollo de las lombrices, son las condiciones ideales.

Sin embargo, a 7 días este resultado cambió y bajó hasta 6. Esto pudo haber sucedido por la formación de ácidos orgánicos por degradación de la materia orgánica. Aun presentándose esta situación en el sustrato, no se observó algún tipo de cambio en el desarrollo de los anélidos, pues de acuerdo con la bibliografía, un pH entre 6-8 en el sustrato es apto para el desarrollo de los anélidos.

A 14 días, el pH volvió a subir en la vermicomposta arrojando un resultado de 7,17, lo cual es indicativo de la descomposición constante de ácidos orgánicos y de la mineralización del nitrógeno por parte de las lombrices, puesto que al pasar el sustrato por el tracto digestivo de los anélidos, el pH va modificándose.

4.1.2.3 Comparativa de la Materia Orgánica.

Gráfica 6. Resultados de laboratorio de la MO



El porcentaje que se encuentra en la materia orgánica en el primer ensayo revela un 19,58, lo cual indica el contenido de materia orgánica del lodo residual inicial. En los procesos de vermicompostaje se observa frecuentemente la disminución de estos valores.

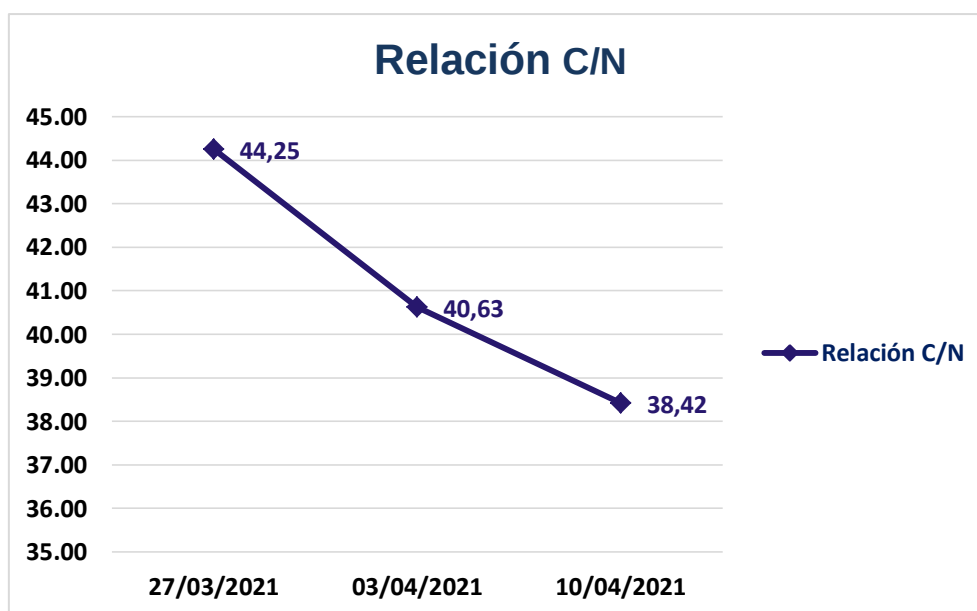
A 7 días, la MO presenta un porcentaje de 18,81, el cual denota una pequeña variabilidad porcentual.

A 14 días se observa un porcentaje de 16,81 determinándose una disminución del 19 % con respecto a la MO inicial. La disminución de MO indica que hubo un mayor grado de mineralización del sustrato, el cual se da por la capacidad degradante que tiene la *E. foetida* sobre la materia orgánica.

Con todo lo antes mencionado, se puede notar la poca MO que contiene el lodo residual desde la etapa inicial, lo que puede mejorarse si se mezcla el lodo con algún otro residuo, como viruta de madera, residuos de jardinería, heces de ganado vacuno, etc.

4.1.2.4 Comparativa de la relación Carbono/Nitrógeno

Gráfica 7. Resultados del C/N

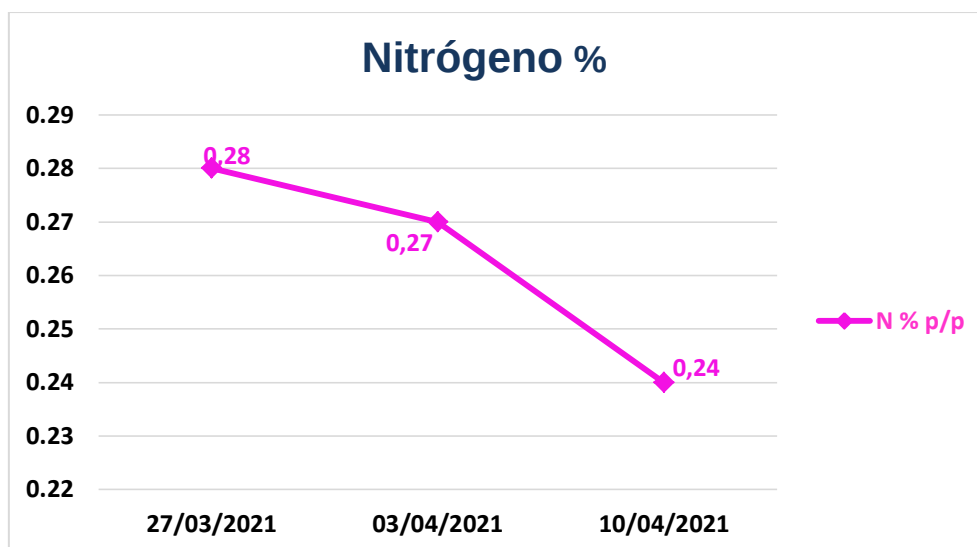


Nota: Carbono/Nitrógeno.

La relación C/N en la Gráfica 7 muestra un descenso continuo en los tres ensayos, llegándose a presentar una reducción del 13 %. Es normal que se presenten reducciones de C/N en el vermicompostaje, puesto que es el indicativo de la estabilización y madurez que se va produciendo en la MO. Ahora bien, con una relación C/N de 38,42 no se ha alcanzado el rango de algunas normas internacionales para humus de lombriz, pues relaciones $C/N > 30$ como en el presente caso pueden causar la inmovilización microbiana del N en el suelo.

4.1.2.5 Comparativa del Nitrógeno.

Gráfica 8. Resultados del nitrógeno

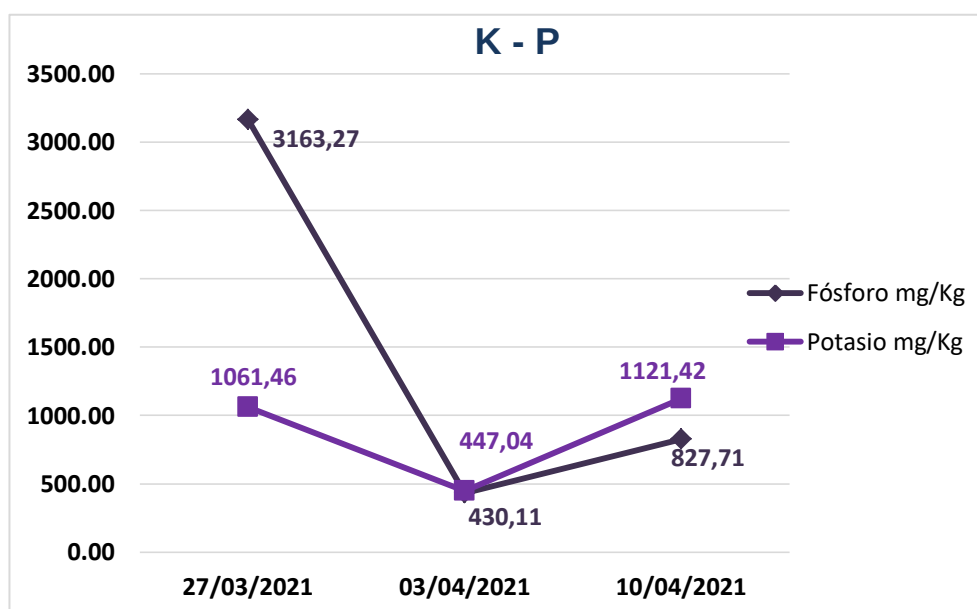


Nota. p/p = peso del soluto/peso de la disolución.

La cantidad de N total presenta una mínima disminución durante el proceso experimental, finalizando con una reducción del 14 %. La bibliografía indica muchos experimentos donde este parámetro tiende a subir o a bajar dependiendo del tipo de residuo o las condiciones en las cuales se realiza el proceso. Se debe tener en cuenta, también, que las lombrices asimilan la mayor parte de este elemento para llevar a cabo sus procesos fisiológicos, lo cual, por consecuencia, disminuye la concentración del nitrógeno en el producto final, por otro lado, la mineralización del N se acelera por la descomposición paulatina que se va dando por parte de las lombrices hacia los materiales orgánicos.

4.1.2.6 Comparativa del Potasio y Fósforo.

Gráfica 9. Resultados del K - P

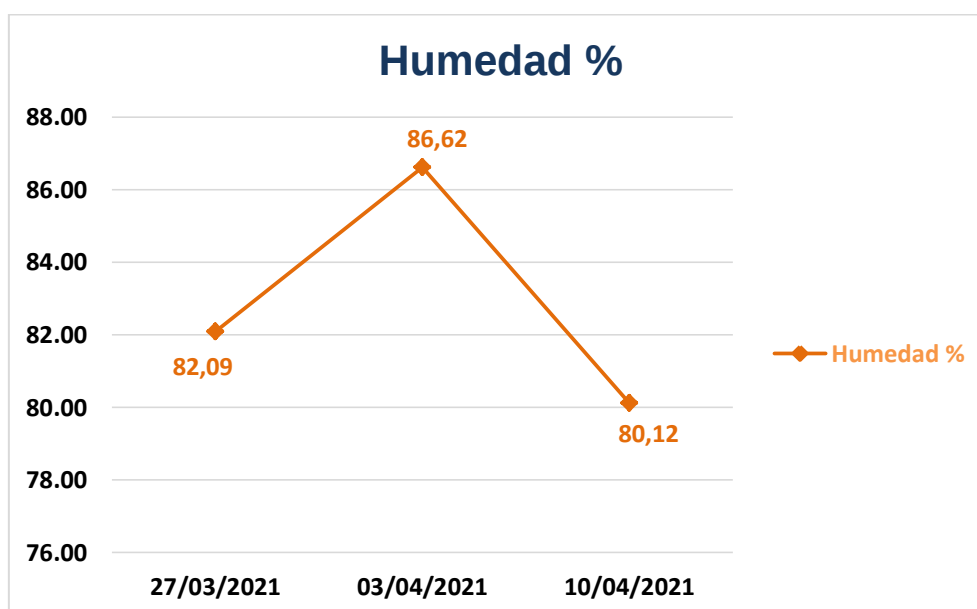


El potasio muestra una reducción a mitad del proceso y vuelve a subir pronunciadamente en el último resultado analizado. En la cama 1b con respecto a la cama 1a hay un incremento del 150 %; sin embargo, se aprecia que la cama 0 con respecto a la cama 1b tuvo un incremento de 5,7 %. Esto se le puede atribuir a los microbios presentes en el intestino de la *Eisenia f.*, pues de acuerdo con Premuzic et al. (73), la producción de ácido por los microorganismos es el mecanismo principal para solubilizar el K insoluble en los desechos orgánicos.

El fósforo, en la cama 1b, muestra una tendencia a incrementarse en un 95 % con respecto a la cama 1a. Este incremento se debe a que las lombrices producen fosfatasa dentro de sí; por ello, los microorganismos pueden producir una mayor liberación de P en sus moldes después de la excreción, lo cual muestra que el vermicompostaje puede proveer fósforo biodegradable para las plantas en lugar de utilizar fósforo sintetizado químicamente. Además, Ghosh et al. (74) menciona que si los materiales orgánicos pasan a través del intestino de los anélidos, una parte del fósforo se convierte en formas asimilables para las plantas.

4.1.2.7 Comparativa de la humedad.

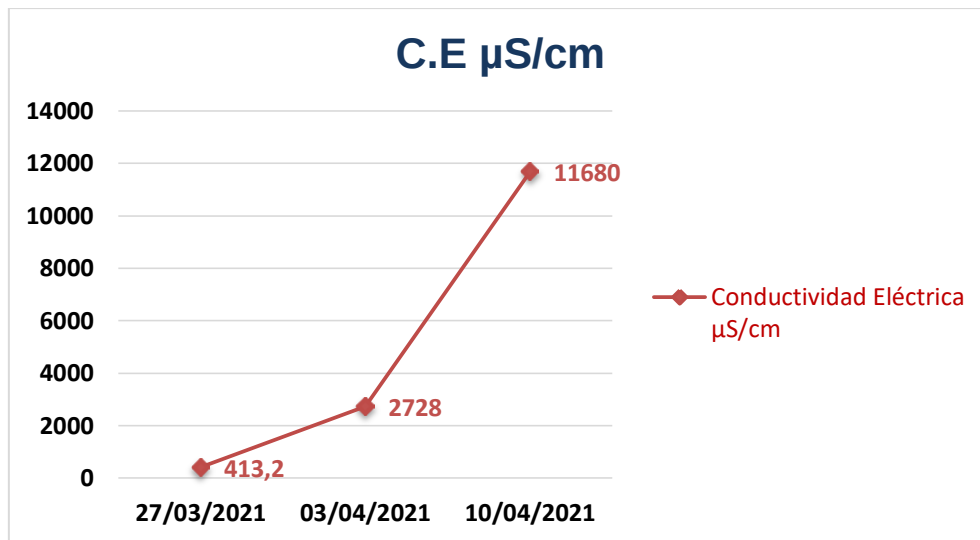
Gráfica 10. Resultados de humedad



La humedad presentó valores de entre 86,62 a 80,12, observándose un pequeño descenso del 7,5 %, lo cual es aceptable tomando en consideración que este porcentaje final de humedad sigue manteniendo los parámetros ideales de entre 70 y 90 % para el adecuado desarrollo de las lombrices (38).

4.1.2.8 Comparativa de la Conductividad Eléctrica.

Gráfica 11. Resultados de la C.E

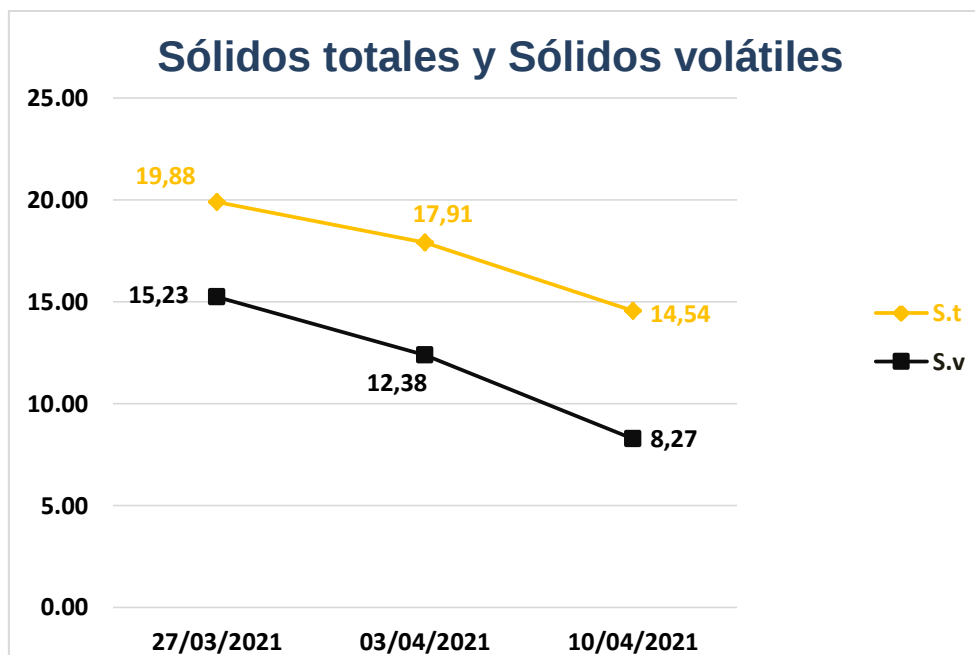


Nota. $\mu\text{S/cm}$ = micro Siemens/ centímetro.

La conductividad eléctrica tuvo un incremento bastante elevado en el último ensayo; esto puede deberse al material que se ha utilizado. De acuerdo con la Gráfica 11, se alcanzó un máximo de 11680 $\mu\text{S/cm}$ o 11,68 dS/m, lo cual es indicativo de presencia de salinidad. Romero et al. (75) registraron en sus experimentos rangos de entre 3,02 dS/cm y 13,53 dS/cm, lo cual coloca al experimento entre esos límites. Por otro lado, el incremento de K en el último ensayo estaría asociado al efecto de la mineralización de la materia orgánica.

4.1.2.9 Comparativa de sólidos totales y sólidos volátiles.

Gráfica 12. Resultados de S.t y S.v



En ambos parámetros, en la Gráfica 12 se observa una disminución constante de acuerdo con los análisis recolectados. Los sólidos totales presentaron en el último ensayo una disminución de 27 % y los sólidos volátiles, de 46 %, lo cual indica la estabilización que ha tenido el sustrato, puesto que la capacidad degradadora de las lombrices provoca este tipo de cambios favorables en el material.

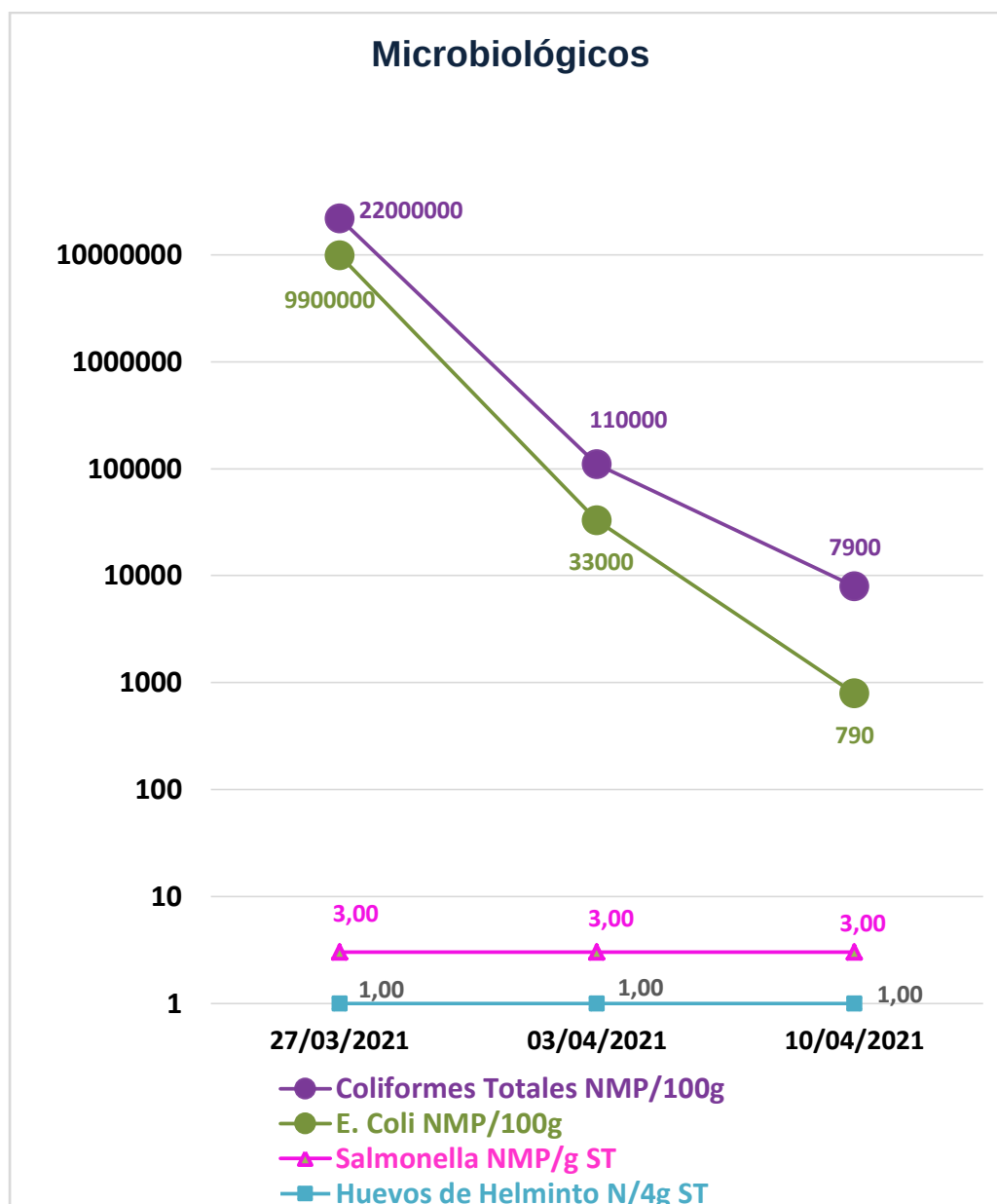
Tabla 17. Resultados para ser comparados

Comparación de resultados			Parámetros de estabilización		
			SV	ST	(SV/ST)
Decreto	Supremo	N°015-2017-VIVIENDA			≤0,6
C ₀	Control		15,23	19,88	0,77
C1 _a	7 días		12,38	17,91	0,69
C1 _b	14 días		8,27	14,54	0,57

De acuerdo con la Tabla 17, se aprecia que la C1_b a 14 días de vermicompostado cae en el rango que manda el Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA, y alcanza el parámetro de estabilización.

4.1.3 Parámetros microbiológicos

Gráfica 13. Resultados de parámetros microbiológicos



Nota. NMP = Número más probable; g = Gramo; N= Número; ST= Sólidos totales.

Tabla 18. Resultados comparativos de los parámetros microbiológicos

Comparación de resultados	Parámetros de higienización			
	Coliformes totales	<i>Escherichia coli</i>	<i>Salmonella</i>	Huevos de helminto
Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA	-	<1000 NPM/g	<1 NMP/10 g	<1 /4g

C₀ Control	22 000 000	9 900 000	0,3	<1
C1_a 7 días	110 000	33 000	0,3	<1
C1_b 14 días	7900	790	0,3	<1

De acuerdo con la Gráfica 13, hay una reducción bastante progresiva de los parámetros biológicos en las coliformes totales y la *Escherichia coli*; sin embargo, se mantienen constantes los parámetros de *salmonella* y huevos de helminto. En muchos estudios, se demuestra la efectividad de la *Eisenia f.* para reducir o eliminar coliformes totales, *salmonella* y huevos de helmintos; la lombriz destruye los microorganismos patógenos por digestión enzimática cuando el desecho recorre el tracto digestivo y también se le atribuye esta reducción de patógenos a la acción de las lombrices que provocan el aumento de determinadas especies microbianas en el vermicompost que compiten o fagocitan microorganismos patógenos que se encuentran inicialmente en el residuo.

Así mismo, comparando los resultados, se observa que la *Echerichia coli* logra alcanzar los parámetros del Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA a 14 días; sin embargo, la *salmonella* y los huevos de helminto se encontraban dentro de los parámetros de higienización desde la prueba de control.

4.2 Comprobación de las hipótesis específicas

Para la comprobación de las características físicas no se realizó ningún análisis estadístico; sin embargo, sí se utilizó la prueba T Student para los parámetros químicos y microbiológicos analizados con un nivel significativo de $p < 0,05$, y de los cuales solo unos cuantos parámetros químicos y microbiológicos muestran significancia. Tales parámetros se mencionan a continuación.

4.2.1 Análisis de parámetros físicos

Entre los parámetros físicos están la cantidad de lombrices, el color y el olor del residuo después de realizado el proceso de vermicompostaje, el cual duró dos semanas.

La cantidad de lombrices se mantuvo constante, no hubo ninguna pérdida en el proceso, lo cual es signo de una adaptación favorable al residuo.

Por otro lado, el color del residuo, al final del proceso, muestra cambios significativos en apariencia con respecto al residuo inicial. La comparación con la tabla de Munsell 10 YR para humus arroja un cambio favorable entre el 2/2 obtenido con respecto al 5/4 inicial, lo que demuestra que existe gran significancia debido a la acción de las lombrices.

El olor también presentó cambios de acuerdo con la tabla de categorización; se obtuvo un 4 como resultado final, el cual lo colocó con un olor a tierra húmeda.

No se hizo análisis estadístico sobre los parámetros físicos, pues la cantidad de lombrices se mantuvo constante. En cuanto al color, de acuerdo con los datos recopilados por medio de la tabla de Munsell, sí existe variación en el color del vermicompost con respecto al residuo inicial. El olor también cambió radicalmente.

Por tanto, se determina el rechazo de la hipótesis nula H_0 (La influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021 *no* es significativa).

Y se acepta la hipótesis alterna H_1 (La influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021 *sí* es significativa).

4.2.2 Análisis estadísticos de parámetros químicos

Los parámetros químicos analizados en el laboratorio, estadísticamente no muestran significancia alguna (ver Anexo 6), a excepción de cuatro parámetros como son el fósforo, plomo, los sólidos volátiles y los sólidos totales.

Tabla 19. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de fósforo

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	3163,27	628.855
Varianza	0	79086,62205
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	

Estadístico t	12,74478892	
P(T<=t) una cola	0,024924623	Sí sig.
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,049849247	Sí sig.
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

El fósforo es de suma importancia, ya que contribuye a la formación de compuestos celulares ricos en energía, y es fundamental para el metabolismo microbiano, y, de acuerdo con otros estudios, este parámetro aumenta en procesos de vermicompostaje.

Se observa que para el fósforo hay cambios estadísticamente significativos en el proceso de vermicompost con un $p < 0,05$ lo cual demuestra que el vermicompostaje tiene influencia significativa sobre este parámetro químico.

Tabla 20. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de plomo

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	8,21	7,055
Varianza	0	0,04205
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	7,620689655	
P(T<=t) una cola	0,021531874	Sí sig.
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,042063749	Sí sig.
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Lo mismo sucede con el plomo, pues estadísticamente presenta cambios significativos con un $p < 0,05$ demostrándose que el vermicompostaje tiene influencia significativa sobre este parámetro químico.

Tabla 21. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de sólidos totales

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	19,88	16,225
Varianza	0	5,67845
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	2,139465875	
P(T<=t) una cola	0,139176037	NO sig.
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,278352075	NO sig.
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Estadísticamente, los sólidos totales no tienen significancia, pues muestra un $p > 0,05$, lo cual prueba que el vermicompostaje no tiene influencia en este parámetro químico.

Tabla 22. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de sólidos volátiles

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	15,23	10,325
Varianza	0	8,44605
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	2,362530414	
P(T<=t) una cola	0,013454025	Sí sig.
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,026908050	Sí sig.
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Los sólidos volátiles estadísticamente tienen un $p < 0,05$, lo que muestra ser significativo. Esto indica la influencia del vermicompostaje en este parámetro químico.

Para lograr alcanzar los parámetros que dictamina el Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA sobre reaprovechamiento de lodos residuales, este estudio logra alcanzar los objetivos propuestos, pues se observa que los sólidos volátiles y sólidos totales en la Gráfica 12 y en el respectivo análisis estadístico tienen significancia y, además, logran entrar en el rango colocándose por debajo de lo que manda el decreto supremo en las dos semanas que dura el experimento.

Por otro lado, con respecto a los parámetros de toxicidad química, si bien no se obtuvo significancia estadísticamente con los metales pesados en el Cr y Cd, sí se obtuvo significancia con respecto al Pb, aunque debe anotarse que para el reaprovechamiento de los lodos sí se cumplió y se entró dentro del rango que establece el decreto supremo. Sin embargo, para los ECA de suelo solo se puede aplicar el lodo vermicompostado a suelos residenciales, parques, suelo comercial, industrial y extractivo, mas no puede ser utilizado para suelo agrícola.

Con los datos obtenidos de los parámetros químicos, se puede determinar el rechazo de la hipótesis nula H_0 (La influencia del vermicompostaje en las características químicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021 *no* es significativa).

Y se acepta la hipótesis alterna H_1 (La influencia del vermicompostaje en las características químicas de los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara – Lima 2021 *sí* es significativa).

4.2.3 Análisis estadísticos de parámetros microbiológicos

Entre los parámetros microbiológicos, se ha encontrado enorme significancia entre las coliformes totales y la *Escherichia coli*. Los otros dos parámetros como *salmonella* y huevos de helminto no muestran significancia, pues se mantuvieron constantes en todo el proceso de vermicompostaje.

Tabla 23. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de coliformes totales

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	22000000	58950
Varianza	0	5212205000
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	

Grados de libertad	1	
Estadístico t	429.7952977	
P(T<=t) una cola	0,000740607	Sí sig.
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,001481214	Sí sig.
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Las coliformes totales presentan una gran significancia, pues muestran un $p < 0,05$ y están por debajo del margen de error con un 0,0014, lo que prueba que el vermicompostaje influye significativamente en este parámetro microbiológico.

Tabla 24. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de *Escherichia coli*

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	9900000	16895
Varianza	0	518742050
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	613.6668705	
P(T<=t) una cola	0,000518701	Sí sig.
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,001037402	Sí sig.
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Lo mismo sucede con la *Escherichia c.*, que también presenta un $p < 0,05$ y está por debajo del margen de error con un 0,0010, demostrando la importancia del vermicompostaje sobre este parámetro microbiológico.

Asimismo, se puede determinar con seguridad la influencia que ejerce el vermicompostaje en los parámetros microbiológicos, pues de acuerdo con el Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA, siempre se estuvo por debajo del rango en *salmonella* y huevos de helminto, mas no sucedía así con las coliformes totales y la *Escherichia coli*. Luego de efectuarse el experimento, el resultado de laboratorio arrojó un descenso bastante notable y el análisis estadístico mostró significancia en ese descenso, lo cual hace que el

vermicompost de lodos residuales entre también en el rango por debajo de lo que manda la normativa.

Determinándose de esta forma la negación de la hipótesis nula H_0 y la H_a (La influencia del vermicompostaje en las características microbiológicas de los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara – Lima 2021 *no* es significativa o es *poco* significativa).

En consecuencia, se toma la hipótesis alterna H_1 para esta tesis (La influencia del vermicompostaje en las características microbiológicas de los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara – Lima 2021 *sí* es significativa).

Esta tesis tenía como objetivo determinar la influencia del vermicompostaje en los lodos residuales y recuperarlos de alguna manera de su regular destino. El objetivo se logra, pues el vermicompostaje sí influye significativamente en la recuperación de estos residuos y sí se puede reutilizar bajo la normativa peruana.

4.3 Discusión de resultados

4.3.1 Parámetros físicos

Partiendo de los resultados previamente obtenidos, se puede corroborar el cambio que presenta los parámetros físicos del lodo residual en esta investigación, pues de forma progresiva el color del vermicompostaje fue variando en las dos semanas de experimento, lo cual coincide con otros experimentos; el cambio de color es el resultado de la desintegración del material vermicompostado. Por tanto, este cambio de color desde el inicio representa la paulatina estabilización que va ocurriendo en los lodos hasta finalizado el experimento con la obtención de un color que cae en el 2/2, de acuerdo con la tabla de Munsell para humus. Otro trabajo de tesis también demuestra el cambio de color que presentó el lodo residual mixteado vermicompostado de la PTAR San Antonio de Carapongo Lima-Perú; sin embargo, ellos lograron alcanzar el rango de 2/1, color característico del humus plenamente estabilizado, para uno de sus experimentos.

Por otro lado, este experimento también presentó cambios en sus parámetros organolépticos; aunque no son cuantificables, se deben mencionar porque son indicio también de la progresiva transformación del lodo residual. Entre estos parámetros, el más significativo fue el olor, pues a medida que las

lombrices realizaban los procesos de desintegración, se fue disipando hasta no presentar olor alguno.

La textura del material fue otro parámetro que presentó cambios visibles al término del experimento; la textura era granulada, muy suelta, suave, tal como lo señalaron Vásquez y Ballesteros (76).

La cantidad de lombrices se mantuvo constante a los 7 días y 14 días; no hubo decesos entre los anélidos, por el contrario, se observó en la superficie del residuo la aparición de muchos cocones, los cuales, al término de este experimento, aún no habían eclosionado. Sin embargo, días después hubo un aumento de lombrices debido a la eclosión de cocones.

4.3.2 Parámetros químicos

De acuerdo con los ensayos obtenidos, se determina que ciertos parámetros químicos paulatinamente presentaron un descenso, unos más notables que otros, como es el caso del cromo, que después del vermicompost presentó una reducción del 58 % de su valor inicial. El plomo y el cadmio también presentaron reducciones en sus niveles con respecto de la muestra inicial, aunque el Cd y el Cr tuvieron un nivel de significancia por encima del margen de error, no siendo así con el Pb, que sí mostro significancia. Estos resultados pueden revelar la influencia que ejerce el vermicompostaje en los metales que se encuentran en los lodos residuales. Respecto a este tema, los estudios muestran resultados contradictorios; en algunos estudios se ha encontrado un aumento en las concentraciones y en otros el efecto contrario, como es el presente caso. Sin embargo, de forma general, se ha demostrado que el proceso de vermicompost tiende a disminuir las concentraciones de metales pesados asimilables. Probablemente, se debe a la acumulación de estos metales en el cuerpo de las lombrices y a la pérdida de masa de las camas durante el proceso. Además, otro estudio menciona que después de 10 días de iniciado el proceso de vermicompostaje con la *Eisenia f.*, el Cr y el Cd disminuyeron, y fue mayor aún a los 31 días (77).

La materia orgánica y la relación C/N también presentaron disminuciones, aunque relativamente poca, del 19 % y 13 %, respectivamente; sin embargo, no fueron estadísticamente significativas estas reducciones. Como lo mencionaron algunos autores con respecto a los procesos de vermicompostaje, existe una disminución de estos parámetros, lo cual se puede dar en diferentes grados (entre 10 y un 55 %). Obviamente, esta

disminución depende de factores como la especie de lombriz utilizada, la naturaleza del residuo, su biodegradabilidad, etc.

Los macronutrientes como el N, P, K, presentaron cambios con respecto al ensayo inicial, aunque estadísticamente esta reducción no fue significativa para el N y K, a diferencia del P, que sí presentó un cambio significativo.

En el caso del N total se observa una ligera disminución del 14 %. Esta reducción se debe al residuo utilizado, a la capacidad de consumo de los anélidos inoculados, y de capturar y retener el N en sus cuerpos, incluso esta disminución del N se debe a la mineralización del sustrato por descomposición de los materiales orgánicos. También a posibles pérdidas por evaporación de este elemento en forma de amonio 45. El estudio realizado por Castañeda (20) muestra valores descendentes en cuanto al N total en procesos de vermicompostaje; estos valores van bajando paulatinamente, mostrando estadísticamente significancia entre ellos y efectividad entre los tratamientos realizados.

El fósforo, como se observa en la Gráfica 9 y en la Tabla 19, sí alcanza el nivel de significancia estadístico, y en la Gráfica 9 se aprecia un aumento del 95 % con respecto a la cama 1a. Este resultado concuerda con el estudio realizado por Zularisam et al. en que el P tiende a aumentar en un 14 % mediante el proceso de vermicompostaje para lodos residuales. El vermicompostaje libera contenido de P de los desechos orgánicos debido a la actividad de la fosfatasa de las lombrices. Por otro lado, la liberación adicional de P se atribuye a los microorganismos solubilizadores de fósforo que se encuentran presentes en el intestino de los anélidos, y una parte de este fósforo una vez que pasa por el intestino de las lombrices se convierte en formas que estarán disponibles para las plantas.

Los sólidos volátiles y los sólidos totales presentaron una disminución paulatina en sus porcentajes; así mismo, el análisis estadístico muestra significancia en uno de los parámetros. La disminución paulatina de estos niveles se le puede atribuir a la estabilización de la materia orgánica producto de la acción de las lombrices sobre el residuo. Igualmente, otro estudio muestra descensos de estos parámetros, los cuales estarían asociados al tipo de lombrices que se empleó y a la alta carga orgánica que presenta el lodo residual mezclado (77).

4.3.3 Parámetros microbiológicos

Entre los parámetros microbiológicos, la *salmonella* y los huevos de helminto no presentaron variación alguna, siempre se mantuvieron constantes en los tres ensayos y no tuvo mayor significancia para esta investigación. Sin embargo, los descensos más notables se pudieron apreciar en las coliformes totales y la *Escherichia coli*, parámetros muy importantes para lograr entrar dentro de los niveles que marca la normativa peruana. Estadísticamente también muestran significancia la *Escherichia coli* y los coliformes totales, lo que denota la gran influencia que ejerce la *Eisenia foetida* sobre estos parámetros y lo efectivo que resulta este experimento para la eliminación de patógenos altamente dañinos. Así mismo, el estudio de Droppelmann et al. (14) reveló que al día 20 de iniciado el experimento, los lodos vermicompostados entran dentro de la clasificación clase A según la United States Environmental Protection Agency (USEPA), pues se logra la eliminación del 100 % de coliformes totales y *Escherichia coli*. Igualmente, en otro estudio, la *E. coli* logra ser removida en un 99 % en un experimento para tratar agua residual doméstica. La remoción de patógenos está asociada a la ingestión de estos patógenos por parte de las lombrices (77).

Por su parte, Eastman et al. (56) ha demostrado con certeza la capacidad de las lombrices para remover patógenos del lodo, lodo sin ningún tipo de mezcla con otro sustrato, y al cabo de 144 horas de realizado el proceso de vermicompostaje se encuentra una reducción del 100 % de patógenos.

Teniendo en cuenta todos los datos recabados de este experimento se puede determinar que el vermicompostaje logra que ciertos parámetros que se encontraban fuera del reglamento peruano para el reaprovechamiento de lodos residuales generados en las PTAR, finalmente logren el objetivo. Bajo esta consideración, los lodos vermicompostados pueden ser recuperados y reaprovechados como biosólidos de clase A.

CONCLUSIONES

1. La técnica del vermicompostaje aplicada a lodos residuales comprueba que este residuo puede ser recuperado bajo la normativa peruana, puesto que se encontraron datos iniciales de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, que fueron variando en el transcurso del experimento. Con respecto al color del residuo inicial, de acuerdo con la tabla de Munsell, se encontró en el rango de color entre el 5/4, obteniéndose luego un 2/2 cercano al color característico del humus.
2. Los metales pesados Cd, Pb, Cr, mostraron descensos paulatinos de niveles de toxicidad entre 19 % y 16 %, respectivamente, sobre todo el cromo, que se redujo hasta un 58 % respecto de su nivel inicial. Estadísticamente, estos descensos no fueron significativos, pero sí lo fue para el Pb. Las lombrices muestran efectividad reduciendo metales tóxicos, como se demuestra en esta tesis; sin embargo, nunca se rebasaron los límites máximos permisibles de la normativa para toxicidad química.

Los macronutrientes como el P y K presentaron cambios mediante el proceso de vermicompostaje, incrementando sus niveles entre 95 % y 150 %, respectivamente. Lo contrario sucedió con el N total, que presentó un descenso del 14 %. Sin embargo, estos parámetros no tienen significancia estadísticamente. Los sólidos volátiles y los sólidos totales presentaron reducciones del 46 % y 27 %, siendo significativo y alcanzado el objetivo para ser considerado como lodo estabilizado dentro del Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA.

La MO y la relación C/N con respecto a sus niveles iniciales mostraron reducciones de entre 19 % y 13 %, respectivamente. Sin embargo, la materia orgánica presente en el vermicompost podría mejorarse mediante la mezcla con otro residuo que le proporcione un aumento de materia orgánica. Lo óptimo sería $MO \geq 30\%$. Por otro lado, el C/N si bien es cierto disminuyó en su valor inicial, aún fue elevado en el último ensayo con 38,42. Para otras normas internacionales este valor debe ser de $C/N < 20$.

3. El vermicompostaje resultó ser una excelente técnica para remover organismos patógenos altamente tóxicos como la *Escherichia coli* y los coliformes totales. En dos semanas se pudo disminuir de 22 000 000 a 7 900 NMP/100g de coliformes, y de 9 900 000 a 790 NMP/100 g de *Escherichia c.*, logrando alcanzar los límites máximos permisibles de la norma peruana para parámetros

de higienización. Por otro lado, la *Salmonella spp.* y los H.H nunca rebasaron los límites y siempre se mantuvieron constantes en el experimento.

RECOMENDACIONES

1. Debido a la situación de pandemia, las restricciones sanitarias y los altos costos de laboratorios particulares, se recomienda hacer un estudio detallado con más ensayos, para determinar con mayor certeza cuán eficiente puede ser la técnica de vermicompostaje en lodos residuales, sin ningún tipo de mezclas en todos sus parámetros.
2. Se debe tener en cuenta que el experimento se llevó a cabo en momentos en que la cuarentena estaba impuesta en el país, puesto que muchas industrias, comercios, entre otros, no estaban en funcionamiento, lo cual puede haber tenido influencia en las características de los lodos, ya que parámetros como los metales pesados estuvieron muy bajos, hecho que no coincide con la caracterización de lodo residual de otras investigaciones en tiempos normales.
3. La conductividad eléctrica presentó valores altos en esta tesis. Se recomienda tener en cuenta este parámetro, pues valores altos afectan la capacidad de sobrevivencia de la *Eisenia f.* Además, la salinidad elevada afecta a las plantas de cultivo si es que se quiera usar para dicho propósito.
4. Otra recomendación es que se analice con detalle a la *Eisenia foetida* para saber su contenido de patógenos y metales pesados en su biomasa, ya que estos parámetros tienden a afectar el ciclo de vida de estos oligoquetos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CANDELA, G. *Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica*. Tesis (Título de Ingeniera Ambiental). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2020. 167 pp. [fecha de consulta: 08 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4422>
2. CONSORCIO, G. Planta de tratamiento de aguas residuales Santa Clara Lima, Perú. Sedapal, Lima, Perú, 2 de febrero de 2010. p. 30.
3. VALDERRAMA, M. *Factibilidad de aprovechamiento de los lodos residuales de la PTAR del Municipio de Chinavita (Boyacá)*. Tesis (Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente). Manizales (Colombia): Universidad de Manizales, 2013. 74 pp. [fecha de consulta: 25 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/944>
4. GONZALES, I. Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR. Tesis (Doctora en Ciencias). Córdoba (España): Universidad de Córdoba, 2015. 356 pp. [fecha de consulta: 27 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10396/13199>
5. BENITEZ, E., et al. Enzyme activities as indicators of the stabilization of sewage sludge's composting with *Eisenia foetida*. *Bioresouce Technology* [en línea]. 1999, 67(3), 297-303 [fecha de consulta: 27 de febrero de 2021]. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(98\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00117-5)
6. VERAS, L., y POVINELLI, J. A vermicompostagem do lodo de lagoas de tratamento de efluentes industriais consorciada com composto de lixo urbano. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* [en línea]. Julio-setiembre de 2004, 9(3), 218-224 [fecha de consulta: 10 de febrero de 2021]. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522004000300008>
7. SCHULD, M. *Lombricultura: teoría y práctica*. Madrid: Mundi-Prensa, 2006. 308 pp. ISBN: 9788484762966.
8. VANEGAS, D. *Utilización de compostaje tradicional y vermicompostaje como estrategia para la implementación de agricultura urbana en Altos del Pino, Cazucá*. Tesis (Título de Ingeniera Ambiental y Sanitaria). Bogotá: Universidad de La Salle, 2018. 55 pp. [fecha de consulta: 25 de febrero de 2021]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/800/

9. CASTREJÓN, A., et al. Evaluación de la calidad de lodos residuales de México [en línea]. En: Congreso Nacional de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (13.^{er}: 2000: México). Conferencia [fecha de consulta: 27 de febrero de 2021]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/228368946_Evaluacion_de_la_calidad_de_lodos_residuales_de_Mexico
10. LUGO, J., et al. Abono orgánico elaborado con lodo residual y estiércol equino a través de vermicomposteo: una propuesta como mejorador de suelos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* [en línea], 2017, 33(3), 475-484 [fecha de consulta: 15 de marzo de 2021]. ISSN: 01884999.
<https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.10>
11. RAMÓN, J., LEÓN, J, y CASTILLO, N. Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis* [en línea]. Enero-junio, 2015, 5(1), 46-54 [fecha de consulta: 15 de marzo de 2021]. ISSN: 22561498.
<https://doi.org/10.21789/22561498.1018>
12. TREJOS, M. y N. AGUDELO. *Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa "Comestibles La Rosa" como alternativa para la generación de biosólidos*. Tesis (Título de Administrador Ambiental). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2012. 104 pp. [fecha de consulta: 16 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11059/2775>
13. ZULARISAM, A., et al. Production of biofertilizer from vermicomposting process of municipal sewage sludge. *Journal of Applied Sciences* [en línea]. 2010, 10(7), 580-584 [fecha de consulta: 20 de marzo de 2021]. ISSN: 18125654.
<https://doi.org/10.3923/jas.2010.580.584>
14. DROPPPELMANN, C., GAETE, C. y MIRANDA, P. Remoción mediante vermicompostaje de los coliformes fecales en lodos biológicos. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* [en línea]. Julio-setiembre, 2009, (49), 124-128 [fecha de consulta: 20 de marzo de 2021]. ISSN: 01206230. Disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/15966>

15. SERPA, M. *Remoción de metales pesados Cd y Hg en lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar - Puno, utilizando vermicomposteo*. Tesis (Título de Ingeniera Química). Puno (Perú): Universidad Nacional del Altiplano, 2017. 105 pp. [fecha de consulta: 27 de marzo de 2021]. Disponible en: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5070>
16. POMALAZA, J. y J. RAMOS. *Vermiestabilización de lodos activados para la obtención de compost y su efecto en el índice de calidad de plántulas de Pinus radiata D. Don. – San Pedro de Saño*. Tesis (Título de Ingeniero Forestal y Ambiental). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2016. 176 pp. [fecha de consulta: 12 de marzo de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3479>
17. MARQUINA, L. y J. MARTÍNEZ. *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 (Título de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales). Callao (Perú): Universidad Nacional del Callao, 2016. 177 pp. [fecha de consulta: 27 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12952/1745>
18. FRANCISCO, J., RAMOS, P. y AGUIRRE, G. Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Lima. *Revista de la Sociedad Química del Perú* [en línea]. Enero-marzo, 2011, 77(1), 75-85 [fecha de consulta: 27 de febrero de 2021]. ISSN: 1810634X. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v77n1/a08v77n1.pdf>
19. DELGADO, I. y C. CHIMA. *Producción de compost empleando pilas aireadas por volteo, como un método de tratamiento de lodo residual de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional de Ingeniería "UNITRAR"; y su evaluación en el mejoramiento de suelos*. Tesis (Título de Ingeniero Sanitario). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2007 [fecha de consulta: 13 de marzo de 2021]. Disponible en: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/497>
20. CASTAÑEDA, W. *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 (Título de Ingeniera Ambiental). Lima: Universidad César Vallejo, 2018. 101 pp. [fecha de consulta 12 de marzo de 2021] Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/34590>

21. GARRIDO, D. *Nuevas tecnologías en el manejo de aguas residuales domésticas e industriales en Río de Janeiro - Brasil*. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2017. 69 pp. [fecha de consulta: 20 de febrero de 2021]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10983/14544>
22. MINISTERIO del Ambiente (MINAM). Normas y documentos legales. 2017 [fecha de consulta: 2 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3693-011-2017-minam>
<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/3677-015-2017-vivienda> .
23. MIHELIC, J. y ZIMMERMAN, J. *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. México: Alfaomega Grupo Editor, 2011 [fecha de consulta: 13 de marzo de 2021]. Disponible en: http://marina.geologia.uson.mx/academicos/iminjare/ICA/REFERENCIAS/220588573_Ingenieria_ambiental_fundament.pdf
24. KIELY, G. *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. España: Mc Graw Hill, 1999. 1309 pp. ISBN: 8448121511.
25. MASTERS, G. y ELA, W. *Introducción a la ingeniería medioambiental*. España: Pearson Educación, 2008. 752 pp. ISBN: 9788483224441.
26. AMADOR, A., VELIZ, E., y BATALLER, M. Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas* [en línea]. 2015, 46, 1-10 [fecha de consulta: 21 de febrero de 2022]. ISSN: 1018553. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181642434003>
27. VALDEZ, E. y A. VÁZQUEZ. *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. México: Fundación ICA, 2003. 341 pp. ISBN: 9687508054.
28. BUSTAMANTE, M. *Diseño conceptual de la disposición de lodos y biosólidos provenientes de plantas de tratamientos de aguas servidas*. Tesis (Título de Ingeniero Civil Químico). Santiago: Universidad de Chile, 1999. 42 pp.
29. NANNING, J. Modelación de lodos activados por aireación extendida. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Santiago: Universidad de Chile, 2001. 142 pp.
30. RAMALHO, R. *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: Reverté, 1996. 705 pp. ISBN: 8429179755.
31. GRAY, N. *Water technology: an introduction for environmental scientist and engineers*. England: Oxford: A Butterworth-Heinemann, 2009. 768 pp. ISBN: 978-1856177054.
32. DE LAS HERAS, A. Producción y características de los fangos. Sistemas de espesamiento. En: *XXVII Curso sobre tratamiento de aguas residuales y*

- explotación de estaciones depuradoras*. Tomo 2. Madrid: CEDEX, 2009. ISBN: 9788477905042.
33. NOYOLA, A., et al. *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*. 3^a. ed. México: IMTA, 2000. Módulo 5, 1-55 pp. ISBN: 9687417366. Disponible en: <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1625>
 34. MAHAMUD, M., GUTIÉRREZ, A., y SASTRE, H. Biosólidos generados en la depuración de aguas (II): métodos de tratamiento. *Ingeniería del Agua* [en línea]. Setiembre, 1996, 3(3), 45-54 [fecha de consulta: 4 de abril de 2021]. <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2703>
 35. LEBLANC, R., MATTHEWS, P. y RICHARD, R. *Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource* [en línea]. Riverview (Canadá): United Nations Human Settlements Programmed (Un-habitat), 2008. Disponible en: <https://unhabitat.org/global-atlas-of-excreta-wastewater-sludge-and-biosolids-management>
 36. HOLGUÍN, E., et al. Lodos residuales: métodos de tratamiento, estabilización y aprovechamiento. *Vidsupra* [en línea]. Julio-diciembre, 2014, 6(2), 61-66 [fecha de consulta: 5 de abril de 2021]. ISSN: 20073127. Disponible en: <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/24059>
 37. KHWAIRAKPAM, M. y R. BHARGAVA. Bioconversion of filter mud using vermicomposting employing two exotic and one local earthworm species. *Bioresource Technology* [en línea]. Diciembre, 2009, 100(23), 5846-5852 [fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.038>
 38. EDWARDS, C. Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. En: EDWARDS, C. y NEUHAUSER, E. *Earthworms in waste and environmental management*. SPB Academic Publishing, 1998, pp 21-31.
 39. EDWARDS, C. y P. BOHLEN. *Biology and ecology of earthworms*. 3.^a ed. London Springer Science & Business Media, 1996. 426 pp. ISBN: 9780412561603.
 40. NOGALES, R., DOMÍNGUEZ, J., y MATO, S. Vermicompostaje. En: MORENO, J. y R. MORAL (Eds. científicos). *Compostaje*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2008, pp. 187-208.
 41. NOGALES, R., ROMERO, E., y FERNÁNDEZ, M. *Vermicompostaje: procesos, productos y aplicaciones III.5*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 2014, 172 pp. ISBN: 97884766933.
 42. BARNES, R. *Zoología de los invertebrados*. 3.^a ed. México: Interamericana, 1977, 957 pp. ISBN: 9682500947.

43. SANCHEZ, J. *Vermicompostaje de residuos orgánicos con lombrices del género Eisenia. Caracterización del producto*. Trabajo (Grado en Ingeniería Agrícola). Sevilla: Universidad de Sevilla, 2017. 45 pp. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11441/64332>
44. ELVIRA, C., et al. Bioconversión of solid paper-pulp mill sludge by earthworms. *Bioresource Technology* [en línea]. Agosto, 1996, 57(2), 173-177 [fecha de consulta: 22 de abril de 2021]. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00065-X](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00065-X)
45. FERRUZZI, C. *Manual de lombricultura*. Madrid: Mundi-Prensa, 1986. 138 pp. ISBN: 9788471141613.
46. ZHU, N. Composting of high moisture content swine manure with corncob in a pilot-scale aerated static bin system. *Bioresource Technology* [en línea], 97(15), 2006, 1870-1875 [fecha de consulta: 23 de abril de 2021]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.08.011>
47. FERNÁNDEZ, M., et al. Continuous feeding vermicomposting as a recycling management method to revalue tomato-fruit waste from greenhouse crops. *Waste Management* [en línea]. Diciembre, 2010, 30(12), 2461-2468 [fecha de consulta: 23 de abril de 2021]. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.005>
48. DOMÍNGUEZ, J., AIRA, M., y GÓMEZ, M. Vermicomposting: earthworms enhance the work of microbes. En: INSAN, H., FRANKE-WHITTLE, I., y GOBERNA, M. (eds.). *Microbes at work*. Berlín: Springer, 2010. 93-114 pp.
49. PARTHASARATHI, K., y L. RANGANATHAN. Longevity of microbial and enzyme activity and their influence on NPK content in pressmud vermicasts. *European Journal of Soil Biology* [en línea]. Julio-setiembre, 1999, 35(3), 107-113 [fecha de consulta: 25 de abril de 2021]. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(00\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(00)00114-X)
50. DOMÍNGUEZ, J. State-of-the-art and new perspectives on vermicomposting research. En: EDWARDS, C. *Earthworm ecology*. 2.^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2004, pp. 401-424. Disponible en: <http://jdguez.webs.uvigo.es/wp-content/uploads/2011/10/ewecologychapter.pdf>
51. RIGGLE, D. y H. HOLMES. New horizons for commercial vermiculture. *BioCycle* [en línea]. Octubre, 1994, 35(10), 58-62 [fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/3095241/New_Horizons_for_Commercial_Vermiculture
52. NDEGWA, P. y S. THOMPSON. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. *Bioresource Technology* [en línea]. Octubre, 2000, 75(1), 7-12 [fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00038-9)
53. HARTENSTEIN, R. y F. HARTENSTEIN. Physicochemical changes effected in activated sludge by the earthworm *Eisenia foetida*. *Journal of Environmental*

- Quality* [en línea]. 1981, 10, 377-381 [fecha de consulta: 1 de mayo de 2021]. <https://doi.org/10.2134/jeq1981.00472425001000030027x>
54. Environmental Protection Agency (EPA). Folletos informativos de biosólidos de la EPA. 2000 [fecha de consulta: 1 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.epa.gov/>
 55. CONDER, J., LANNO, R., y BASTA, N. Assessment of metal availability in smelter soil using earthworms and chemical extractions. *Journal of Environmental Quality* [en línea]. 2001, 30, 1231-1237 [fecha de consulta: 2 de mayo de 2021]. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.3041231x>
 56. EASTMAN, B., et al. The effectiveness of vermiculture in human pathogen reduction for USEPA biosolids stabilization. *Compost Science & Utilization* [en línea]. 2001, 9(1), 38-49 [fecha de consulta: 03 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2001.10702015>
 57. DONADO, R. Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta. Tesis (Magister en Gestión Ambiental). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2013. 87 pp. [fecha de consulta: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/>
 58. BARBADO, J. *Cría de lombrices: su empresa de lombricultura*. Buenos Aires: Albatros, 2003. 124 pp. ISBN: 9502410319.
 59. NOM-004-SEMARNAT-2002SEMARNAT. Protección ambiental, lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2002.
 60. 40 CFR Part 503. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. Code of Federal Regulations.
 61. Directiva 86/278/CEE. Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y en particular, de suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31986L0278&from=EN>
 62. LOPÉZ, C., et al. (eds.). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño* [en línea]. Reino Unido: IWA Publishing, 2017 [fecha de consulta: 15 de febrero de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
 63. CARRILLO, L. Glosario. En: *Manual de microbiología agrícola*. San Salvador: Editorial de la Universidad Nacional de Jujuy, 2013. 14 pp. ISBN: 9789507214653.

64. MIKOLIC, C. (coord.). *Manual de vermicompostaje: cómo reciclar nuestros residuos orgánicos* [en línea]. Montevideo: Ambiente, 2018. 72 pp. Disponible en: <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/imvermicompostajeinterior.pdf>
65. BIOMASA. En: *Diccionario de la lengua española* [en línea]. Madrid: Real Academia Española, 2014 [fecha de consulta 30 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/biomasa>
66. HERNÁNDEZ, M. y GONZALES, N. Recursos hídricos y ambiente. En *Elementos de política ambiental*. Editorial de la Honorable Cámara de Diputados. Buenos Aires, 1993.
67. Antropogénico. En: *Diccionario panhispánico del español jurídico* [en línea]. Madrid: Real Academia Española, 2018 [fecha de consulta 30 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://dpej.rae.es/lema/antropogénico-ca>
68. RESIDUO. En: *Diccionario de la lengua española* [en línea]. Madrid: Real Academia Española, 2014 [fecha de consulta 30 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/residuo>
69. MUÑOZ, M. *Biotecnología* [en línea]. 2.^a ed. Bernal (Argentina): Universidad Nacional de Quilmes, 2012 [fecha de consulta: 29 de marzo de 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/41573632/Biotecnologia_2ed_esp_Maria_Antonia_Munoz_Malajovich
70. VERMIFORME. En: *Diccionario de la lengua* [en línea]. Madrid: Real Academia Española, 2014 [fecha de consulta: 30 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/vermiforme>
71. BAENA, G. *Metodología de la Investigación* [en línea]. 3.^a ed. México: Grupo Editorial Patria, 2017 [fecha de consulta: 1 de abril del 2021]. Disponible en: [http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/metodologia %20de%20la%20investigacion.pdf](http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf)
72. HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C., y BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill, 1998. 497 pp. ISBN: 9684229313
73. PREMUZIC, Z., et al. Calcium, iron, potassium, phosphorus and vitamin C content of organic and hydroponic tomatoes. *HortScience* [en línea]. Abril, 1998, 33(2), 255-257 [fecha de consulta: 2 de mayo de 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/277847905_Calcium_Iron_Potassium_Phosphorus_and_Vitamin_C_Content_of_Organic_and_Hydroponic_Tomatoes

74. GHOSH, M., et al. Transformation of phosphorus during vermicomposting. *Bioresource Technology* [en línea]. Agosto, 69(2), 1999, 149-154 [fecha de consulta: 3 de mayo de 2021]. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)80001-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)80001-7).
75. ROMERO, M., et al. Caracterización y evaluación física, química y microbiológica de composta y lombricomposta. En: *Memoria del Seminario de Avances de investigación 2000*. México: Universidad Autónoma Chapingo. 2000, 179-186 pp.
76. VÁSQUEZ, R. y H. BALLESTEROS. *Manual de lombricultura: crianza de lombriz roja californiana (Eisenia foetida)*. Colombia: Produmedios, 2008.
77. SULEIMAN, H., et al. Determination of the performance of vermicomposting process applied to sewage sludge by monitoring of the compost quality and immune responses in three earthworm species: *Eisenia foetida*, *Eisenia andrei* and *Dendrobaena veneta*. *Bioresource Technology* [en línea]. Octubre, 2017, 241, 103-112 [fecha de consulta: 7 de mayo de 2021]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.104>
78. DALZELL, W., et al. *Manejo del suelo, producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales*. Volumen 56 de Boletín de suelos de la FAO. Roma: Organización para las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 1991 [fecha de consulta: 10 de marzo de 2021]. Disponible en: books.google.es/books?isbn=9253025530

ANEXOS

1. MATRIZ DE CONSISTENCIA

INFLUENCIA DEL VERMICOMPOSTAJE EN LA RECUPERACIÓN DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SANTA CLARA – LIMA 2021

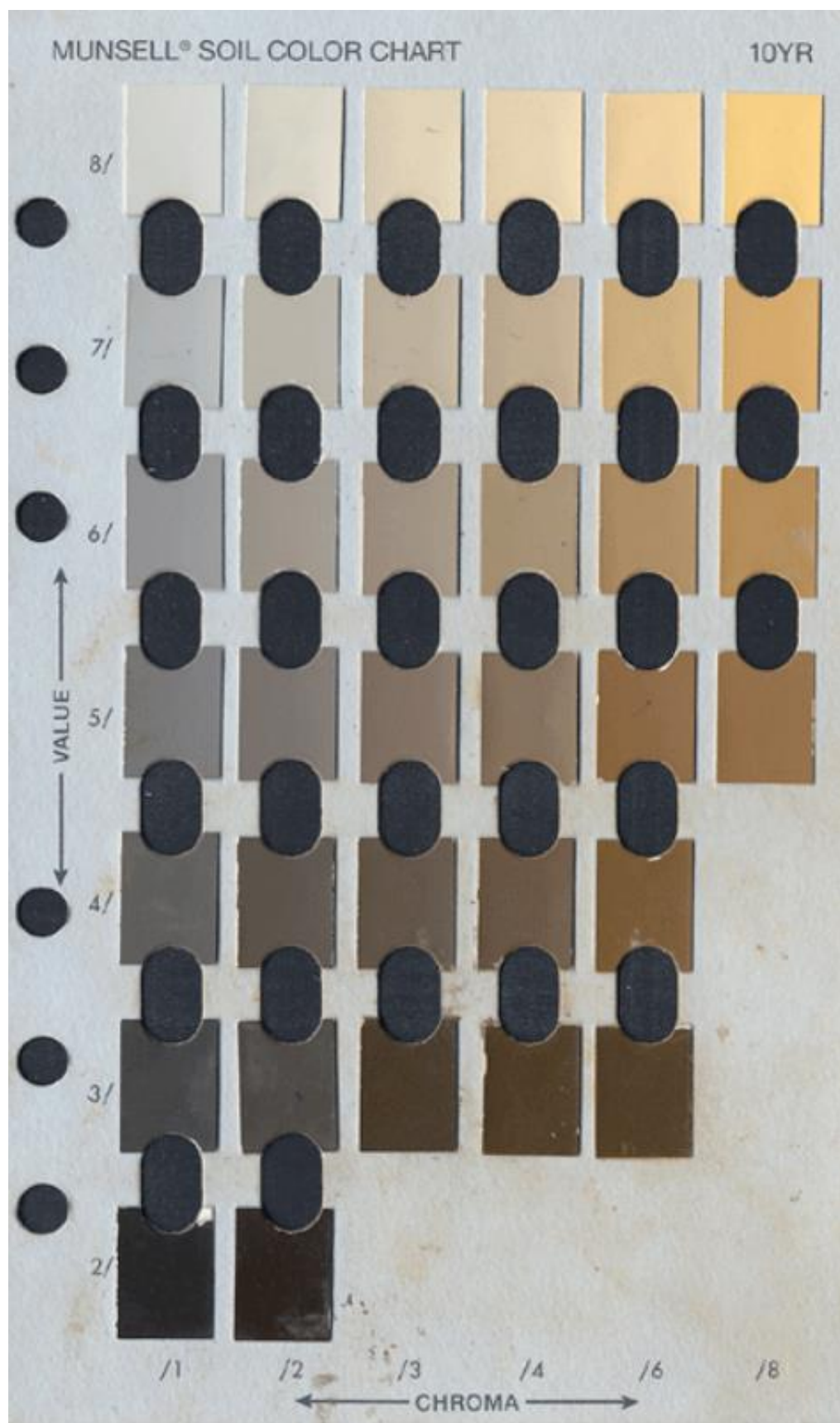
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
GENERAL ¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara – Lima 2021?	GENERAL Determinar la influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara – Lima 2021.	GENERAL La influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara – Lima 2021 es significativa.	INDEPENDIENTE: Vermicompostaje de lodos residuales de la PTAR Santa Clara.	Características físicas de los lodos residuales.	Color, # de lombrices	GENERAL: Cuantitativa con un alcance descriptivo, correlacional.
				Características químicas de los lodos residuales.	C.E (uS/cm), M.O (%), metales pesados (Pb, Cr, Cd) mg/kg, (P, K, N, C/N) % Humedad (%), pH, SV/ST g/l	
ESPECÍFICOS ¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021?	ESPECÍFICOS Determinar la influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021.	ESPECÍFICAS La influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021 es significativa.	DEPENDIENTE: Recuperación de lodos residuales de la PTAR Santa Clara.	Características microbiológicas de los lodos residuales.	Coliformes totales (NMP/g), <i>salmonella</i> (NMP/g), huevos de helminto (N/4g), <i>E. coli</i> (NMP/g).	ESPECÍFICA: Experimental
¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en las características químicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara–Lima 2021?	Determinar la influencia del vermicompostaje en las características químicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021.	La influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021 es significativa.		C _{1a} = Vermicompost		
¿Cuál es la influencia del vermicompostaje en las características microbiológicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021?	Determinar la influencia del vermicompostaje en las características microbiológicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara– Lima 2021.	La influencia del vermicompostaje en las características físicas de los lodos residuales de la PTAR Santa Clara – Lima 2021 es significativa.		C _{1b} = Vermicompost		

2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	SUBDIMENSIONES	INDICADORES
Independiente: Vermicompostaje de lodos de la PTAR Santa Clara.	El vermicompostaje es una técnica que se emplea para transformar material orgánico a través del tratamiento de lombrices (<i>Eisenia foetida</i>) por medio de mecanismos de digestión y así obtener humus (78). El lodo que se utilizará para este experimento es el lodo final que se genera en la PTAR; la muestra será recogida de la centrífuga de lodos, la cual es deshidratada para facilitar su manejo al sitio de su disposición final.	Inmediatamente después de que se proceda al recojo de los lodos de la PTAR Santa Clara y se tengan habilitadas las 3 composteras, se aplicarán lodos a cada una de ellas. A dos de ellas se les introducirán las lombrices; la cantidad de sustrato será de 5 kg para 1 kg de lombrices y, por último, la compostera restante será de control.	C_0= 5kg lodo residual puro	Características físicas Características químicas Características microbiológicas	Color: tabla Munsell, olor. C.E (uS/cm), M.O (%), metales pesados (Pb, Cr, Cd) mg/kg, (P, K, N, C/N) % humedad (%), pH, SV g/l, ST g/l Coliformes totales (NMP/g), <i>salmonella</i> (NMP/10 g ST), huevos de helminto (N/4g), <i>E. coli</i> (NMP/g ST).
			C_{1a}= 5kg lodo residual + 1 kg de lombrices	Características físicas a 7 días Características químicas a 7 días Características microbiológicas a 7 días	Color: tabla Munsell, # de lombrices, olor. C.E (uS/cm), M.O (%), metales pesados (Pb, Cr, Cd) mg/kg, (P, K, N, C/N) % Humedad (%), pH, SV g/l, ST g/l Coliformes totales (NMP/g), <i>salmonella</i> (NMP/10 g ST), huevos de helminto (N/4g), <i>E. coli</i> (NMP/g ST).
			C_{1b}= 5kg lodo residual + 1 kg de lombrices	Características físicas a 14 días Características químicas a 14 días Características microbiológicas a 14 días	Color: tabla Munsell, # de lombrices, olor. C.E. (uS/cm), M.O (%), metales pesados (Pb, Cr, Cd) mg/kg, (P, K, N, C/N) % humedad (%), pH, SV g/l, ST g/l. Coliformes totales (NMP/g), <i>salmonella</i> (NMP/10 g ST), huevos de helminto (N/4g), <i>E. coli</i> (NMP/g ST).
Dependiente: Recuperación de lodos residuales de la PTAR Santa Clara.	Lodo residual es un residuo sólido, semisólido o líquido que se genera por el tratamiento de las aguas residuales. Uno de los problemas para el uso y manejo de los lodos es su alto contenido de patógenos, por lo que se requiere su estabilización (57).	Cuando se obtenga el vermicompost de lodos de las camas a 7 y 14 días, se procederá a analizarlos para identificar el cambio, si lo hubiera.	C_{1a}= Vermicompost C_{1b}= Vermicompost		

ANEXO: 1

3. TABLA MUNSELL



ANEXO 2

4. Registro de color y olor

Fechas	Muestras	1₀	1_a	1_b
27/03/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	5/4	5/4
	Olor	1	1	1
28/03/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	5/4	5/4
	Olor	1	1	1
29/03/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	5/4	5/4
	Olor	1	1	1
30/03/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	5/3	5/3
	Olor	1	1	1
31/03/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	5/3	5/3
	Olor	1	2	2
01/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	4/4	4/4
	Olor	1	2	2
02/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	4/4	4/3
	Olor	1	2	2
03/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	4/3	4/3
	Olor	1	3	2
04/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	-	4/3
	Olor	2	-	3
05/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	-	4/3
	Olor	2	-	3
06/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	-	4/3
	Olor	2	-	3
07/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	-	3/3
	Olor	2	-	3
08/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	-	3/3
	Olor	2	-	4
09/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	-	2/2
	Olor	2	-	4
10/04/21	Color (Tabla Munsell)	5/4	-	2/2
	Olor	2	-	4

ANEXO 3

5. Análisis de lodos residuales



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS
QUÍMICOS S.A.C. SLAB

INFORME DE ENSAYO

IE-230321-02

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : MARLY TITO SANCHEZ
1.2 RUC/DNI : 41231121

2. FECHAS

2.1 Inicio : 24 de Marzo de 2021
2.2 Fin : 05 de Abril de 2021
2.3 Emisión de informe : 05 de Abril de 2021

3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

3.1 Temperatura : 20.8 °C
3.2 Humedad Relativa : 51 %

4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

4.1 Ensayo solicitado : Ver Punto 6
4.2 Método utilizado : Ver Punto 6

5. DATOS DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS

5.1 Código de Lab. : S-1117
5.2 Código del Cliente : LODO RESIDUAL
5.3 Muestreo : Realizado por el cliente

6. RESULTADOS

6.1. Resultado Fisicoquímico LODO RESIDUAL

Tabla N°1: Resultado Fisicoquímico

Código Laboratorio	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	RESULTADO
S-1117	Plomo	mg/kg	ICP-MS	8.21
	Cromo	mg/kg		56.00
	Cadmio	mg/kg		0.54
	Materia Orgánica	%	NOM-021-RECNAT-2000	19.65
	Conductividad	uS/cm	NOM-021-RECNAT-2000	413.20
	pH	U.pH	EPA SW-846, Method 9045D, Revisión 4	7.15
	Nitrógeno total	% p/p	Kjeldahl	0.28
	Fósforo	mg/kg	UV-VIS	3163.27
	Potasio	mg/kg	Absorción Atómica-Llama	1061.46
	Humedad	%	Gravimetría	82.09
	Relación C/N	-	Cálculo	44.25
	Sólidos totales	g/l	Gravimetría	19.88
	Sólidos volátiles	g/l	Gravimetría	15.23

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

Página 1 de 2



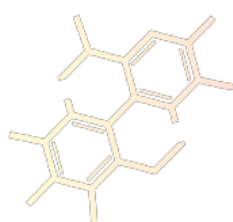
SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS
QUÍMICOS S.A.C. SLAB

6.2. Resultado Microbiológico LODO RESIDUAL

Tabla N°2: Resultado Microbiológico

Código Laboratorio	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	RESULTADO
S-1117	Coliformes Totales (NMP)	NMP/100g	SMEWW 9221 B, 23 rd Ed. 2017	22 000 000,0
	Escherichia coli (NMP)	NMP/100g	SMEWW 9221 F, 23 rd Ed. 2017	9 900 000, 0
	Huevos de Helminthos	Huevos /AgST	NOM-004-SEMARINAT-2002	<1
	Salmonella spp (NMP)	NMP/gST	NOM-004-SEMARINAT-2002	<3,0

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.



"FIN DEL DOCUMENTO"

SLab
Laboratorio de ensayo e investigación

Anexo 4

6. Análisis de vermicompost 7 días



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS
QUÍMICOS S.A.C. SLAB

INFORME DE ENSAYO IE-200421-02

1. DATOS DEL CLIENTE
 - 1.1 Cliente : MARLY TITO SANCHEZ
 - 1.2 RUC/DNI : 41231121
2. FECHAS
 - 2.1 Inicio : 05 de Abril de 2021
 - 2.2 Fin : 13 de Abril de 2021
 - 2.3 Emisión de informe : 13 de Abril de 2021
3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO
 - 3.1 Temperatura : 20.5°C
 - 3.2 Humedad Relativa : 49 %
4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA
 - 4.1 Ensayo solicitado : Ver Punto 6
 - 4.2 Método utilizado : Ver Punto 6
5. DATOS DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS
 - 5.1 Código de Lab. : S-1276
 - 5.2 Código del Cliente : C1a-VERMICOMPOST DE LODO RESIDUAL
 - 5.3 Muestreo : Realizado por el cliente

6. RESULTADOS 6.1. Resultado Físicoquímico C1A

Tabla N°1: Resultado Físicoquímico

Código Laboratorio	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	RESULTADO
S-1276	Piomo	mg/kg	ICP-MS	7.20
	Cromo	mg/kg		37.79
	Cadmio	mg/kg		0.49
	Materia Orgánica	%	NOM-021-RECNAT-2000	18.58
	Conductividad	uS/cm	NOM-021-RECNAT-2000	2728
	pH	U.pH	EPA SW-846, Method 9045D, Revisión 4	6.00
	Nitrógeno total	% p/p	Kjeldahl	0.27
	Fósforo	mg/kg	UV-VIS	430.11
	Potasio	mg/kg	Absorción Atómica-Llama	447.04
	Humedad	%	Gravimetría	86.62
	Relación C/N	-	Cálculo	40.63
	Sólidos totales	g/l	Gravimetría	17.91
	Sólidos volátiles	g/l	Gravimetría	12.38

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

Diego Román Vergaray D'Arrigo
QUÍMICO
C.R.P. 1337

Página 1 de 2



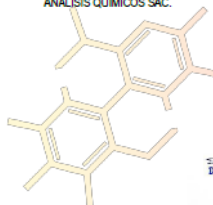
SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS
QUÍMICOS S.A.C. SLAB

6.2. Resultado Microbiológico VERMICOMPOST DE LODO RESIDUAL

Tabla N°2: Resultado Microbiológico

Código Laboratorio	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	RESULTADO
S-1276	Coliformes Totales (NMP)	NMP/100g	SMEWW 9221 B, 23 ml Ed. 2017	110 000,0
	Escherichia coli (NMP)	NMP/100g	SMEWW 9221 F, 23 ml Ed. 2017	33 000,0
	Huevos de Helminthos	Huevos /AgST	NOM-004-SEMARNAT-2002	<1
	Salmonella spp (NMP)	NMP/gST	NOM-004-SEMARNAT-2002	<3,0

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.



"FIN DEL DOCUMENTO"

Diego Román Vergaray D'Arrigo
QUÍMICO
C.R.P. 1337

isayo e investigación

Anexo 5

7. Análisis de vermicompost 14 días



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS
QUÍMICOS S.A.C. SLAB

INFORME DE ENSAYO

IE-200422-03

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : MARLY TITO SANCHEZ
1.2 RUC/DNI : 41231121

2. FECHAS

2.1 Inicio : 12 de Abril de 2021
2.2 Fin : 22 de Abril de 2021
2.3 Emisión de informe : 22 de Abril de 2021

3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

3.1 Temperatura : 20.2 °C
3.2 Humedad Relativa : 49 %

4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

4.1 Ensayo solicitado : Ver Punto 6
4.2 Método utilizado : Ver Punto 6

5. DATOS DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS

5.1 Código de Lab. : S-1275
5.2 Código del Cliente : C1b - VERMICOMPOST DE LODO RESIDUAL
5.3 Muestreo : Realizado por el cliente

6. RESULTADOS

6.1. Resultado Fisicoquímico C1B

Tabla N°1: Resultado Fisicoquímico

Código Laboratorio	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	RESULTADO
S-1275	Plomo	mg/kg	ICP-MS	6.91
	Cromo	mg/kg		23.72
	Cadmio	mg/kg		0.44
	Materia Orgánica	%	NOM-021-RECNAT-2000	16.01
	Conductividad	uS/cm	NOM-021-RECNAT-2000	11680
	pH	U pH	EPA SW-846, Method 9045D, Revisión 4	7.17
	Nitrógeno total	% p/p	Kjeldahl	0.24
	Fósforo	mg/kg	UV-VIS	827.71
	Potasio	mg/kg	Absorción Atómica-Llama	1121.42
	Humedad	%	Gravimetría	80.12
	Relación C/N	-	Cálculo	38.42
	Sólidos totales	g/l	Gravimetría	14.54
	Sólidos volátiles	g/l	Gravimetría	8.27

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.

Diego Romano Vergaray D'Arrigo
DIEGO ROMANO VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

Página 1 de 2



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS
QUÍMICOS S.A.C. SLAB

6.2. Resultado Microbiológico VERMICOMPOST DE LODO RESIDUAL

Tabla N°2: Resultado Microbiológico

Código Laboratorio	PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	RESULTADO
S-1275	Coliformes Totales (NMP)	NMP/100g	SMEWW 9221 B, 23 rd Ed. 2017	7 900,0
	Escherichia coli (NMP)	NMP/100g	SMEWW 9221 F, 23 rd Ed. 2017	790,0
	Huevos de Helminths	Huevos /4gST	NOM-004-SEMARNAT-2002	<1
	Salmonella spp (NMP)	NMP/gST	NOM-004-SEMARNAT-2002	<3,0

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C.



Anexo 6

8. Análisis estadístico de parámetros

Tabla 24. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de cromo

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	56	30,755
Varianza	0	98,98245
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	3,58137882	
P(T<=t) una cola	0,086671702	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,173343403	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla 25. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de cadmio

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	0,54	0,465
Varianza	0	0,00125
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	1	
P(T<=t) una cola	0,25	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,5	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla 26. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de pH

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	7,15	6,585
Varianza	0	0,68445
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	0,88034188	
P(T<=t) una cola	0,270228807	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,540457614	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla27. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de MO

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	19,85	17,295
Varianza	0	3,30245
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	1,949416342	
P(T<=t) una cola	0,150870259	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,301740518	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla28. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de C/N

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	44,25	39,525
Varianza	0	2,44205
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	4,230769231	
P(T<=t) una cola	0,073880946	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,147761893	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla 29. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de nitrógeno

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	0,28	0,255
Varianza	0	0,00045
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	-1,666666667	
P(T<=t) una cola	0,17202087	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,344041739	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla30. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de

potasio

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	1061,46	784,23
Varianza	0	227394,19
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	0,822029123	
P(T<=t) una cola	0,280993331	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,561986661	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla31. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de humedad

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	82,09	81,105
Varianza	0	1,94045
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	0,949238579	
P(T<=t) una cola	0,258287447	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,516574894	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

Tabla 32. Prueba T para medias de dos muestras emparejadas con diferente varianza de conductividad eléctrica

	<i>Cama 0</i>	<i>Cama 1a-1b</i>
Media	413,2	7204
Varianza	0	40069152
Observaciones	2	2
Diferencia hipotética de los medios	0,05	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	-1,517169348	
P(T<=t) una cola	0,185498686	NO
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,370997372	NO
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

ANEXOS 7

9. Fotos del experimento



Figura 16. Cama de madera forrada con costalillo; en ellas se realizará el experimento. En total serán tres.



Figura 17. Cama (C_0) que contiene el lodo residual de la PTAR Santa Clara.



Figura 18. Imagen del lodo residual siendo vermicompostado por la *Eisenia foetida*.



Figura 19. Avance continuo de las lombrices hacia todo el sustrato a vermicompostar.



Figura 20. Sustrato cada vez más granulado por acción de las lombrices a 7 días del experimento.



Figura 21. Sustrato a 10 días, las lombrices están en todo el espacio, se aprecia cambio de color, textura, olor.



Figura 22. Sustrato a 12 días del continuo proceso de degradación por parte de las lombrices.



Figura 23. Finalmente, a 14 días de vermicompostado completamente el lodo residual, se aprecia un cambio más marcado del color y la textura, además de sentirse un olor a tierra húmeda.