

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA**



**“REMOCIÓN DE METALES PESADOS Cd Y Hg EN LODOS  
RESIDUALES DE LA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN  
SECUNDARIA EL ESPINAR – PUNO, UTILIZANDO  
VERMICOMPOSTEO”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**SERPA JULI MARGARITA SUSANA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2017**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA**

**“REMOCIÓN DE METALES PESADOS Cd Y Hg EN LODOS RESIDUALES  
DE LA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN SECUNDARIA EL ESPINAR –  
PUNO, UTILIZANDO VERMICOMPOSTEO”**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**SERPA JULI MARGARITA SUSANA**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE: INGENIERO QUIMICO**

**FECHA DE SUSTENTACION: 30 DE ENERO DEL 2017**

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:**



**PRESIDENTE**

: .....

**Mg. Higinio Alberto Zúñiga Sánchez**

**PRIMER MIEMBRO**

: .....

**Msc. Lidia Ensueño Romero Iruri**

**SEGUNDO MIEMBRO**

: .....

**Dr. Teófilo Donaires Flores**

**DIRECTOR DE TESIS**

: .....

**Dr. Nazario Villafuerte Prudencio**

**AREA: TECNOLOGÍA AMBIENTAL**

**TEMA: TRATAMIENTO DE AGUAS**

**LINEA: TECNOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**

# DEDICATORIA

**A DIOS  
A MIS PADRES  
A MIS HERMANOS**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por la oportunidad que me dio de existir, por sus enormes bendiciones, por la sabiduría que siempre me da y por ser mi guía en todo momento.

A mis padres Mateo Serpa y Valentina Juli por el apoyo incondicional a lo largo de mis estudios, por la firme confianza que pusieron en mi éxito; a mi hermana Luz y a mis hermanos Cristian y Johan que de alguna u otra forma me apoyaron en la culminación de este trabajo.

A mi director de tesis Dr. Nazario Villafuerte Prudencio, por la dirección de este proyecto, por haberme transmitido sus conocimientos y darme libertad en la toma de decisiones de la investigación.

Al Dr. Teófilo Donaires Flores, al Mg. Higinio Alberto Zúñiga Sánchez y a la Msc. Lidia Ensueño Romero Iruri, quienes contribuyeron a la realización de este proyecto, por haber confiado en mí y por proporcionarme parte de sus conocimientos y experiencias.

## INDICE

	Pág.
INDICE DE TABLAS.....	7
INDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	11
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
CAPITULO I.....	16
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES, JUSTIFICACION Y     OBJETIVOS</b> .....	16
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	16
1.1.1 Planteamiento.....	16
1.1.2 Problema general:.....	16
1.1.3 Problemas específicos:.....	17
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	18
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	21
3.1. Objetivo General:.....	21
3.2 Objetivos específicos:.....	21
<b>4. JUSTIFICACION</b> .....	22
<b>5. HIPOTESIS</b> .....	24
5.1. Hipótesis general:.....	24
5.2. Hipótesis específicos:.....	24
CAPITULO II.....	25
<b>MARCO TEORICO E HIPOTESIS</b> .....	25
<b>2.1 MARCO TEORICO</b> .....	25
2.1.1. Metales pesados.....	25
2.1.2 Toxicidad de los metales pesados.....	25
2.1.3 Tratamiento de metales pesados.....	28
2.1.4 Lodos de aguas residuales.....	29
2.1.5 Tipos de lodos.....	31
2.1.6 Clasificación de los lodos.....	32
2.1.7 Clasificación de los lodos residuales por su contenido de metales pesados según la EPA.....	33
2.1.8 Vermicomposteo.....	46
2.1.9. Clases de anélidos.....	48

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>58</b>
<b>METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....</b>	<b>58</b>
<b>3.1 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....</b>	<b>58</b>
3.1.1. Generalidades. ....	58
3.1.2. Ámbito de trabajo.....	58
3.1.3 Descripción de la metodología.....	60
3.1.4 Elaboración de los tratamientos y diseño experimental. ....	61
3.1.5 Temperatura .....	61
3.1.6 Potencial de hidrogeno (pH).....	61
3.1.7 Por ciento de humedad. ....	61
3.1.8 Aireación.....	62
3.1.9 Preparación de muestras.....	62
3.1.10 Evaluación de dinámica poblacional.....	62
3.1.11 Análisis de metales.....	63
3.1.12 Análisis del método ICP-AES.....	63
3.3. Materiales y equipos a ser utilizados.....	63
<b>CAPITULO IV.....</b>	<b>66</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSION .....</b>	<b>66</b>
4.1 RESULTADOS Y DISCUSION.....	66
4.1.1 Presentación.....	66
4.1.2. Resultados .....	66
4.1.2.2 Biomasa de lombrices. ....	70
4.1.3 Análisis estadístico de la dinámica poblacional. ....	71
4.1.4 Temperatura.....	72
4.1.5 Fluctuaciones de temperatura .....	73
4.1.6. Potencial de hidrogeno.....	73
4.1.7 Humedad relativa .....	76
4.1.8 Análisis de la remoción de metales en los lodos residuales de origen urbano. ....	79
4.1.9. Validación de la digestión acida. ....	79
4.1.20 Remoción de Cadmio en el vermicomposteo.....	87
4.1.21 Remoción del Mercurio en el vermicomposteo. ....	88
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>91</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>98</b>

## INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Características de algunos elementos considerados generalmente como metales pesados. ....	27
Tabla 2. Características de algunos metales pesados. ....	28
Tabla 3. Caracterización y composición de lodos. ....	30
Tabla 4. Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA. ....	32
Tabla 5. Límite de calidad microbiológica de lodos. ....	33
Tabla 6. Clasificación de los lodos de acuerdo al contenido de metales pesados. ....	34
Tabla 7. Concentración característica de algunos metales pesados en lodos de solidos volátiles. ....	37
Tabla 8. Concentraciones críticas de metales que permiten procesos biológicos. ....	37
Tabla 9. Límites máximos permitidos de metales pesados en lodos. ....	38
Tabla 10. Concentración máxima de microorganismos patógenos. ....	40
Tabla 11. Tratamiento de biosólidos. ....	41
Tabla 12. Valores límites por la EPA norma CFR 40 parte 503 para biosolidos. ....	42
Tabla 13. Producción de la E. fétida. ....	48
Tabla 14 . Equipos y Reactivos. ....	64
Tabla 15. Variables. ....	65
Tabla 16. E. Fétida en relación al 100% de lodo residual. ....	68
Tabla 17. Temperatura durante 90 días de la experimentación. ....	72
Tabla 18. Potencial de hidrogeno durante los 90 días de experimentación. ....	74
Tabla 19. Porciento de humedad durante los 90 días de experimentación (VER ANEXO N°3)	76
Tabla 20. Porcentaje de recuperación de metales. ....	79
Tabla 21. Concentración de los metales pesados totales al inicio y final del proceso de vermicomposteo. ....	80
Tabla 22. Límites de concentración de metales pesados. ....	82
Tabla 23. Concentraciones de cd y hg en el lodo residual. ....	83
Tabla 24. Concentraciones de cd y hg en el tejido de la lombriz ....	85
Tabla 25. Factor de bioacumulación (BFCs) en el tejido de la lombriz. ....	86
Tabla 26. Número de lombrices reproducidas durante los 90 días de experimentación para las 4 muestras. ....	99
Tabla 27. Humedad obtenida durante los 90 días para las 4 muestras. ....	99



Tabla 28. Temperaturas registradas durante los 90 días de experimentación para las 4 muestras.

.....100

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sección formación de bordos.....	44
Figura 2. Anatomía de la lombriz. Eisenia Fétida .....	50
Figura 3. Modelo corporal de un anélido .....	51
Figura 4. Aparato digestivo de oligoquetos.....	52
Figura 5. Aparato circulatorio oligoquetos.....	52
Figura 6. Aparato excretor de oligoquetos. ....	53
Figura 7. Sistema nervioso oligoquetos .....	54
Figura 8. Reproducción y desarrollo.....	55
Figura 9. Lagunas de estabilización el Espinar.....	59
Figura 10. Laguna de Estabilización Secundaria.....	59
Figura 11. Lombriz Eisenia Fétida.....	63
Figura 12. Reproducción de lombrices .....	67
Figura 13. Viabilidad de las lombrices adultas de lodos residuales (ver anexo n°2).....	69
Figura 14. Biomasa de lombrices. ....	70
Figura 15. Cantidad de metales en el lodo residual en la muestra 3. ....	70
Figura 16. Fluctuaciones de temperatura. ....	73
Figura 17. Potencial de hidrogeno. ....	75
Figura 18. Humedad Muestra 1 .....	77
Figura 19. Humedad muestra 3.....	78
Figura 20. Humedad muestra 4.....	78
Figura 21. a) Complejo de coordinación b) Quelato metálico.....	81
Figura 22. Los ligandos adoptan una orientación espacial más estable con los ángulos tetraédricos. ....	82
Figura 23. Concentraciones de metales al terminar el proceso de vermicomposteo.....	87
Figura 24. Remoción del cadmio en el vermicomposteo. ....	88
Figura 25. Remoción del mercurio en el vermicomposteo. ....	88

**ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS**

	<b>Pág.</b>
Fotografía N° 1. Sensor de pH con el interface XPLOERER GLX PASCO ps-2002.....	100
Fotografía N° 2. Análisis del pH y temperatura con el sensor.....	101
Fotografía N° 3. Muestreo del lodo residual de la laguna de estabilización secundaria.....	101
Fotografía N° 4. Toma de notas del análisis realizado pH y T°.....	102
Fotografía N° 5. Etiquetado de muestras de lodo residual. ....	102
Fotografía N° 6. Equipo de trabajo en la laguna de estabilización secundaria el espinar-puno.	103
Fotografía N° 7. Secado del lodo residual (temperatura ambiente) .....	103
Fotografía N° 8. Colocando muestra de lodo residual en la mufla.....	104
Fotografía N° 9. Medición del pH y T°.....	104
Fotografía N° 10. Lodo residual después del proceso de secado. ....	104
Fotografía N° 11. Realización del análisis de la humedad en el lodo residual. ....	105
Fotografía N° 12. Vermicomposteo obtenido de los 90 días. ....	105
Fotografía N° 13. Lombrices después del vermicomposteo .....	106

## RESUMEN

El vermicomposteo puede representar una biotecnología sustentable para la estabilización de este tipo de lodos por medio de la reducción de metales pesados. En este trabajo de investigación se propone el empleo de la técnica de vermicomposteo, utilizando la lombriz de la especie *Eisenia fétida* para la remoción de lodos residuales de origen urbano de la Laguna de Estabilización Secundaria El Espinar-Puno. Para cumplir con el objetivo planteado se elaboró un sistema de vermicomposteo con 4 muestras, cada muestra con 1 Kg de 100% lodo residual, a cada muestra se introdujo 5 lombrices adultas, en las cuales se determinó las concentraciones de Cadmio y Mercurio, mediante la técnica ICP-AES (*Espectrometría de Emisión Atómica*), inicialmente el lodo residual contenía Cadmio un promedio de 1.021 mg/kg y la reducción fue a un promedio de 0.148 mg/kg, en el caso del Mercurio inicialmente contenía un promedio de 0.512 mg/kg y la reducción fue un promedio de 0.109 mg/kg, a la vez se controló la temperatura, donde inicialmente en promedio la temperatura fue 16.5°C y se mantuvo en ese promedio hasta el día 90 con 16.7°C, se controló el pH donde inicialmente el lodo era ácido con un promedio de pH de 5.6 y en el día 90 el pH era básico se controló un promedio de pH 7.5, seguidamente se determinó la humedad, en donde el día 1 tenemos un porcentaje de humedad de 40.2% y el día 90 un porcentaje de humedad 40.5% y para obtener nuestros resultados estadísticos con más precisión utilizamos la técnica ANOVA.

Finalmente los resultados obtenidos indican una remoción en ambos metales Cadmio y Mercurio en las 4 muestras realizadas, se tiene un promedio inicial de 1.762 mg/kg de Cadmio y después del vermicomposteo tenemos un promedio de remoción de 0.09 mg/kg, para el Mercurio inicialmente se tuvo un promedio de 0.513 mg/kg y tuvo una remoción final de 0.037 mg/kg, el resultado final del vermicomposteo fue analizados después de los 90 días, se puede concluir que el tratamiento con mayor perspectiva para una mayor remoción de metales pesados, sin afectar la dinámica poblacional de la *Eisenia Fétida* se debe tener prioridad a la humedad, pH y temperatura para lograr más reproducción de las lombrices.

**PALABRAS CLAVE:** Laguna de Estabilización, Lodos Residuales, Metales Pesados, Remoción, Vermicomposteo.

## ABSTRACT

The vermicompost can represent a sustainable biotechnology for the stabilization of this type of sludge by means of the reduction of heavy metals. This work proposes the use of the vermicompost technique, using the worm of the *Eisenia fetida* species for the removal of residual sludge of urban origin from the El Espinar-Puno Secondary Stabilization Lagoon. In order to fulfill the objective, a vermicompost system with 4 samples, each sample with 1 kg of 100% residual sludge, was prepared to each sample, 5 adult worms were introduced, in which the concentrations of Cadmium and Mercury were determined by means of the ICP-AES (Atomic Emission Spectrometry), initially the residual sludge contained Cadmium on average 1,021 mg / kg and the reduction was on average 0.148 mg / kg, in the case of Mercury initially contained an average of 0.512 mg / Kg and the reduction was an average of 0.109 mg / kg, at the same time the temperature was controlled, where initially the average temperature was 16.5 ° C and it remained in that average until day 90 with 16.7 ° C, the pH was controlled Where initially the sludge was acid with a pH average of 5.6 and on day 90 the pH was basic an average pH of 7.5 was controlled, then the humidity was determined, where on day 1 we have a humidity percentage of 40.2% and On day 90 a Percentage of humidity 40.5% and to obtain our statistical results with more precision we use the ANOVA technique.

Finally, the results obtained indicate a removal of both cadmium and mercury in the four samples, an initial average of 1,762 mg / kg Cadmium and after vermicompost we have an average removal of 0.09 mg / kg, for Mercury initially The final result of the vermicompost was analyzed after the 90 days, it can be concluded that the treatment with greater perspective for a greater removal of heavy metals, with an average of 0.513 mg / kg and had a final removal of 0.037 mg / kg, Without affecting the population dynamics of *Eisenia fetida*, priority should be given to humidity, pH and temperature to achieve more reproduction of the worms.

**KEY WORDS:** Stabilization Lagoon, Residual Sludge, Heavy Metals, Removal, vermicompost.

## INTRODUCCIÓN

Existen muchos problemas ambientales provocados por el hombre, pero uno de los más grandes problemas ambientales que el hombre tiene que afrontar y solucionar es la gestión de los diferentes residuos que se generan con el crecimiento urbano y un ejemplo de ellos se puede observar en la Laguna de Estabilización de aguas residuales, el cual se obtiene como producto final dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo, siendo este último el que requiere una infraestructura más compleja para su estabilización. En la ciudad de Puno actualmente no existe una planta de tratamiento de aguas residuales.

La razón principal para no generar un biosólido en estas unidades de tratamiento de aguas es el costo tan elevado que representa la instalación de reactores para su estabilización, los sistemas de deshidratación y el traslado del lodo a los sitios de disposición final. **(Reynolds, 2002)**

Adicionalmente, en la mayoría de los casos, el lodo obtenido de la laguna de estabilización causa un impacto ecológico negativo debido al alto contenido de patógenos y metales pesados. A pesar de esta problemática, en el país gran parte de los lodos generados son depositados sin ningún tipo de tratamiento previo en presas, terrenos o simplemente se quedan en las lagunas. Como consecuencia de ello, se ha generado una importante contaminación en los mantos freáticos y en emisiones a la atmósfera.

Investigaciones recientes han demostrado que con un tratamiento adecuado, estos lodos pueden mejorar los nutrientes de los cultivos y suelos. **(Castrejón, 2002)**

Existen numerosos estudios sobre el tratamiento de metales pesados en donde se ha analizado el carácter tóxico de los mismos y el efecto sobre los seres vivos, enfocándose primordialmente en la modificación de la cadena alimenticia y bioacumulación entre los organismos de la cadena trófica. En los últimos años una herramienta biotecnológica que permite reconvertir desechos de naturaleza generalmente orgánica, biodegradable y que tiene un potencial aplicación en el tratamiento de lodos residuales, es el proceso de lombricultura (vermicultura), obteniéndose como resultado un producto con un alto valor fertilizante. **(López, 2007.)**

El anélido más utilizado es la especie *Eisenia fétida* (*E. fétida*), que promueve la producción de sustratos con alta calidad de nutrientes y bacterias que pueden ser utilizados en áreas como agricultura y la recuperación de suelos. La utilización de los lodos

residuales de las plantas de tratamiento es una opción para mejorar las áreas verdes y recuperar las zonas erosionadas; por otro lado, producir lombrices con estos sustratos ayudaría a disminuir costos de alimentación en actividades tales como avicultura y la piscicultura por su alto contenido proteico.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo de investigación del proceso de vermicomposteo, utilizando la lombriz de la especie *E. fétida*, como un alternativa para el tratamiento de metales pesados en lodos residuales de origen urbano, evaluando la concentración de los metales, antes y después de cada tratamiento. Por ello, se utilizaron diferentes composiciones de lodo residual. La evaluación cuantitativa de los materiales metálicos se determinó mediante el método ICP, utilizando las normas de la EPA 502 y 503. **(EPA, 2003).**

Para cumplir con este objetivo se elaboró un Sistema de vermicomposteo con cuatro tratamientos o muestras, en los cuales se controló la temperatura y pH. Una importante característica de este anélido es su adaptación a su nuevo hábitat (sustrato), por lo que tal adaptación en los sistemas analizados se realizó por medio de la biomasa de los anélidos, los índices de reproducción y mortandad en los distintos sistemas durante los días 1, 30, 50,70 y 90, respectivamente. Los resultados obtenidos en este estudio fueron analizados por el método estadístico a través de regresión lineal.

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES, JUSTIFICACION Y OBJETIVOS

#### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

##### 1.1.1 Planteamiento

Los metales pesados contenidos en los lodos de las plantas de tratamientos de agua residual de origen urbano son el producto de una amplia variedad de fuentes tales como: baterías, cerámicas, tuberías y productos químicos. En la actualidad existen diversas técnicas para remoción de metales en lodos residuales, como procesos electroquímicos y resinas de intercambio iónico, sin olvidar el tratamiento previo como la estabilización alcalina la digestión anaerobia o aerobia.

El lodo obtenido de la laguna de Estabilización Secundaria causa un impacto ecológico negativo debido al alto contenido de patógeno y metales pesados. A pesar de esta problemática en la ciudad de Puno, los lodos que se generan están depositados en la laguna de estabilización, como consecuencia de ello se ha generado una importante contaminación en los mantos freáticos y en emisiones a la atmosfera. Investigaciones recientes han demostrado que con un adecuado tratamiento estos lodos pueden mejorar los nutrientes de los cultivos y suelos. En este contexto el vermicomposteo puede representar una biotecnología sustentable para la estabilización de este tipo de lodos por medio de la reducción de metales pesados. En este trabajo de investigación se propone el empleo de la técnica de vermicomposteo, utilizando la lombriz de la especie *Eisenia fétida* para el tratamiento de lodos residuales de origen urbano de la región Puno. El presente proyecto de investigación en esta premisa está definido por la siguiente interrogante:

##### 1.1.2 Problema general:

¿Cuál es el porcentaje de reducción de metales pesados con la aplicación de vermicomposteo a los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar-Puno?

**1.1.3 Problemas específicos:**

- ❖ ¿Cuál es la concentración de metales pesados en los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria del Espinar-Puno?
- ❖ ¿Cuál es el contenido de humedad y pH en los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria del Espinar-Puno?
- ❖ ¿Cuál es la concentración de metales pesados Cd y Hg en el vermicompostaje obtenido?

## 2. ANTECEDENTES

**Sánchez (2009)**, explica su investigación, realizó 4 tratamientos de lodo residual elaboró un sistema de vermicomposteo con la adición de metales a diferentes relaciones lodo residual: estiércol (1:1, 1:3, 3:1) y 4 repeticiones de cada uno, en los cuales controló la temperatura, pH y determinó las concentraciones de Cadmio, Cobre, Níquel y Zinc, mediante la técnica de absorción atómica. Los resultados que obtuvo le indican una máxima remoción de Cobre, Níquel y Zinc, indica también que depende de la relación de lodo/estiércol. Así mismo, determinó que el Níquel fue el elemento que más influye en la formación de capullos, la reproducción, la biomasa y la reproducción de la lombriz. En comparación con el proyecto de **Sánchez** y el realizado en el presente podemos destacar que nuestra relación de lodo residual en las 4 muestras realizadas es de un 100% no contiene estiércol y a diferencia del proyecto del autor no adicionamos metales al lodo residual y determinamos las concentraciones de Cd y Hg.

**Rodríguez (2004)**, explica sus estudios y observaciones sobre el papel que desempeña las lombrices en el proceso de vermicomposteo. Explica que la lombriz más usada y estudiada para realizar vermicomposteo es *Eisenia fétida*. Este organismo tolera un rango amplio de pH que va desde 5,5 a 8,5, posee una temperatura óptima entre 15 y 25°C y tolera temperaturas entre 0 y 35°C.

**Molina (2001)**, informa que la factibilidad de hacer crecer lombrices en lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales y de obtener un vermicomposteo de buena calidad agronómica ha sido verificada por varios autores.

**Eastman (2001)**, explica en su investigación que vermicompostean lodo mezclado con pasto y lodo mezclado con pasto y viruta. Utilizan un lecho de 15 cm de altura e inoculan 2.400 lombrices/m<sup>2</sup>. Luego de 80 días de vermicomposteo en la mezcla lodo-pasto-viruta el número más probable (NMP) de coliformes fecales por gramo se reduce en 4 unidades logarítmicas; en la mezcla lodo-pasto el NMP de coliformes fecales por gramo se reduce en 5 unidades logarítmicas.

Este autor no mezcla el lodo con otro sustrato, y utiliza una concentración inicial de lombrices muy alta, 1 kg de éstas por cada kg de lodo. Luego de 144 horas de vermicomposteo logra un 100% de remoción equivalente a una reducción de 6,4 unidades logarítmicas. En Estados Unidos, por primera vez en el 2006 una instalación logra la autorización para generar lodos clase A mediante vermicomposteo.

**Cardoso y Ramírez (2000)**, detallan que existen estudios escasos de cómo la concentración inicial de lombrices afecta el proceso de higienización de lodos. Estos autores logran luego de 45 días, generar lodo Clase A (una reducción de 1,4 unidades logarítmicas) gracias al vermicomposteo de lodo mezclado con lirio acuático. Usan concentraciones iniciales de lombrices entre 2,5 y 15 kg/m<sup>2</sup> y las alimentan semanalmente (altura de lecho no informada). Logran una mayor reducción de patógenos a 5 kg de lombrices/m<sup>2</sup>, Esto último lo atribuyen a la menor competencia existente tanto por espacio físico como por alimento. Mediante esta investigación se busca demostrar la factibilidad de remover coliformes fecales mediante vermicomposteo de un lodo sin mezclar y la relevancia de la concentración inicial de lombrices en este proceso.

**Manna, (2003)**, realizó comparaciones con tres lombrices de tierra *Eisenia fétida* (*savingny*), *Perionyx Cavatus* (*Perrier*) y *Dicogaster Bolau* (*Michaelsen*), encontrando que las tasas de crecimiento y a dinámica poblacional que superior cuando se utilizó la especie *E. fétida* en el tratamiento de descomposición de la hojarasca. Estos resultados se atribuyeron a las características de esta especie (epigea). Sin embargo, el ciclo reproductivo se ve influido a consecuencia de las condiciones ambientales y localidad de los alimentos materiales disponibles.

Adicionalmente, durante el desarrollo de este trabajo, los autores evaluaron la aplicación del vermicomposteo en la transformación de lodos de origen urbano, estimándose la capacidad de adaptación de la lombriz *E. Fétida* a distintas mezclas de lodos con otros residuos orgánicos, así como la calidad agronómica de los productos resultantes. En este caso, los resultados obtenidos muestran que el número de lombrices disminuye cuando el porcentaje de lodo es mayor del 50%. Asimismo, los autores reportan características agronómicas mejoradas en el humus cuando se utiliza a la especie *E. fétida* comparado con el humus de la especie *Eudrilus eugeniae*.

**Kurien (2006)**, trabajó con dos lombrices de tierra; *E. fétida*, *E. eugeniae*, para evaluar la eficiencia de producción de humus en sustrato de lirio cuántico y estiércol de ganado vacuno. Colocaron 20 lombrices en 60g del nuevo sustrato en una relación de 6:1 (lirio-estiércol) en 30 días, obteniendo como resultado un incremento en la biomasa y una reproducción aceptable de lombrices en ambas especies, pero siendo la *E. Fétida* la que produjo un 32.71% más de lombrices con un 54% de humedad. En este trabajo, se destaca

la reutilización del desecho (lirio acuático) en un producto con alto valor de nutrientes a través del proceso de vermicomposteo.

**Silroba y col (2007)**, presentan este proceso como una alternativa viable en la transformación de los lodos residuales de origen urbano, en este trabajo los autores estiman la capacidad de adaptación de la *E. fétida* en distintas relaciones de lodo: materia orgánica, así como la calidad agronómica del producto final, el cual reporta una mortalidad en el número de lombrices cuando el porcentaje de lodo rebasa la relación de 50% en peso. Con respecto a la evaluación de los metales pesados totales del vermicomposteo, analizados por espectroscopia de absorción atómica, obtienen una disminución importante de las concentraciones de Zn y Cd. Finalmente, en el 2007 efectuaron un estudio molecular de ADN para abrir paso a una posible clonación de la lombriz *E. fétida*, que permitiría mejorar la estructura del ADN para ampliar las aplicaciones de la lombriz en el tratamiento de estos residuos. Por estos daños ecológicos que se siguen causando con la acumulación de metales en el subsuelo, en este trabajo se propone el uso de la lombriz *E. fétida* para el tratamiento de lodos residuales en la Laguna de estabilización secundaria El Espinar-Puno (eliminación de metales) y transformarlos en un material con elato valor nutritivo para su uso como bio-abono. Con ellos se espera obtener un doble beneficio, ya que por un lado se obtendrá una disminución en el impacto ambiental al eliminar los lodos con bajo valor de nutrientes que son en muchas ocasiones depositados en tiraderos a cielo abierto o cuerpos de agua y por otro, aprovechar los nutrientes como la materia orgánica, carbón y nitrógeno, procesados en el humus de lombriz para el enriquecimiento de los suelos.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo General:

Aplicar el vermicompostaje a los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar-Puno para reducir el contenido de metales pesados.

#### 3.2 Objetivos específicos:

- ❖ Cuantificar la concentración de metales Cd y Hg, en el lodo residual.
- ❖ Determinar la humedad y pH del lodo residual.
- ❖ Cuantificar la concentración de los metales pesados Cd y Hg en el vermicompostaje.

#### 4. JUSTIFICACION

El tratamiento de lodos residuales viene siendo investigado en todo el mundo por muchos años, y hace algunos años los países desarrollados optan por este método el vermicomposteo para el tratamiento de metales pesados ya que el vermicompostaje es un método para transformar residuos es un rico acondicionador del suelo.

Debido a la contaminación excesiva al medio ambiente (aire y suelo), e indirectamente al lago Titicaca de la ciudad de Puno con metales pesados es que nos hemos visto en la necesidad de plantear una alternativa para solucionar alguno de los problemas como son las descargas de aguas residuales (de los hospitales, de laboratorios de universidades, aguas urbanas, etc.).

Los lodos contienen el mismo tipo de microorganismos patógenos que el agua residual, pero en una mayor concentración debido a la reducción del contenido de agua por espesamiento o deshidratación, su aplicación directa a cualquier receptor (suelo, fuentes superficiales) sin tratamiento previo representa un riesgo para la salud humana y biótica, por lo cual la concentración de coliformes y huevos de helmintos encontradas en los lodos implica procesos de estabilización y restricciones en su uso. La peligrosidad de los metales pesados reside en que no pueden ser degradados (ni química ni biológicamente) y, además tienden a bioacumularse y a biomagnificarse, se acumulan en los organismos vivos alcanzando concentraciones mayores que la que alcanza en los alimentos o medioambiente, y que estas concentraciones aumentan a medida que ascendemos en la cadena trófica.

Este estudio abarca el tratamiento de los metales pesados que se encuentra en la laguna de estabilización El Espinar- Puno, en este caso el presente proyecto se realizó el tratamiento para la laguna de estabilización secundaria, se utilizó el método de vermicomposteo para el tratamiento de metales pesados los cuales son Cd y Hg, el cual con este proyecto gracias al vermicomposteo los agricultores cerca a esta zona son los beneficiados ya que esta laguna tendrá menos cantidad de metales pesados y los productos que estos siembran estarán libres de contaminación (sin metales pesados), por las zonas aledañas a la laguna también hay algunos animales (ovejas, vacas, cerdos) los cuales se alimentan de totora que crecen por las orillas de la laguna, estos animales también tendrán en mejor condición su alimento.

Este proyecto de investigación también permite generar conocimientos sobre el proceso del vermicomposteo ya que se realizó a más de 3800 m.s.n.m.

Esta investigación fue realizada directamente en la Laguna de Estabilización Secundaria el Espinar Puno y para sus análisis respectivos se realizó en el laboratorio de control de calidad de la facultad de ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano-Puno y en los Laboratorios Analíticos del Sur de la ciudad de Arequipa.

## 5. HIPOTESIS

### 5.1. Hipótesis general:

La aplicación del vermicomposteo a los lodos residuales demuestra la eficacia de remoción de metales pesados.

### 5.2. Hipótesis específicas:

- ❖ Los metales pesados tales como Hg y Cd en los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria el Espinar-Puno determinan diferentes concentraciones dentro de los parámetros comparados por la EPA.
- ❖ La tecnología propuesta definirá los parámetros en los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar-Puno determinando la humedad aproximada entre los rangos de 50-85% de humedad y pH entre los rangos de 6-9.
- ❖ El proceso propuesto definirá la concentración de los metales pesados obtenidos en el vermicomposteo, los cuales están dentro de los parámetros límites según la EPA Norma CFR 40.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO E HIPOTESIS

#### 2.1 MARCO TEORICO

##### 2.1.1. Metales pesados.

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros. **(Lucho, 2005).**

Los metales pesados se clasifican en dos grupos:

- a) **Oligoelementos o micronutrientes**, son los requeridos en pequeñas cantidades, por plantas y animales, disponibles para que los organismos completen su ciclo vital. Dentro de este grupo están: As, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Fe, Se y Zn.
- b) **Metales pesados sin función biológica**, cuya presencia de determinadas cantidades en seres vivos produce difusiones en el funcionamiento de su organismo. Entre estos se encuentran el Cd, Hg, Pb, Bi, Sn, Tl.

La toxicidad de una sustancia representa su capacidad para causar una lesión en un organismo vivo, en este sentido, los metales pesados son de reconocido riesgo tanto para la salud así como para el medio ambiente.

Todos los metales mencionados anteriormente pueden absorberse por inhalación de compuestos derivados de estos de forma de gases en la atmósfera, o inhalarse cuando se encuentran adheridos a partículas de polvo o tierra muy fina, que pueda ser movilizada por corrientes bajas de aire. **(García y Dorronsoro, 2009.)**

##### 2.1.2 Toxicidad de los metales pesados.

Los metales son quizás las sustancias tóxicas, más antiguas que haya conocido el ser humano, la toxicidad de algunos de ellos, tales como plomo y arsénico ha sido conocida

desde hace muchos años, a diferencia otros metales como al cadmio y talio cuya toxicidad ha sido recién reconocida. La acción negativa de estos metales sobre la salud es ocasionada al menos por dos vías, transporte medio-ambiente en el aire, agua, polvo y comida, la segunda por alterar la forma bioquímica de los elementos.

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para los seres humanos.

El término “metal pesado” no está bien definido. A veces se emplea el criterio de densidad. Por ejemplo, metales de densidad mayor que  $4,5\text{g/cm}^3$ , pero los valores en la bibliografía pueden ir desde  $4\text{g/cm}^3$  hasta  $7\text{g/cm}^3$ . Otros criterios empleados son el número atómico y el peso atómico. Además, el término siempre suele estar relacionado con la toxicidad que presentan, aunque en este caso también se emplea el término "elemento tóxico" o "metal tóxico".

Muchos de los metales que tienen una densidad alta no son especialmente tóxicos y algunos son elementos esenciales en el ser humano, independientemente de que a determinadas concentraciones puedan ser tóxicos. Sin embargo, hay una serie de elementos que en alguna de sus formas pueden representar un serio problema medioambiental y es común referirse a ellos con el término genérico de “metales pesados” (Pérez, 2011).

En términos generales se dice que la toxicidad de una sustancia representa su capacidad para causar una lesión en un organismo vivo, en este sentido, los metales pesados son de reconocido riesgo tanto para la salud así como para el medio ambiente.

Todos los metales mencionados anteriormente pueden absorberse por inhalación de compuestos derivados de estos de forma de gases en la atmósfera, o inhalarse cuando se encuentran adheridos a partículas de polvo o tierra muy fina, que pueda ser movilizadas por corrientes bajas de aire (García y Dorronsoro, 2009).

**Tabla 1. Características de algunos elementos considerados generalmente como metales pesados.**

<b>METAL</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>
<b>Arsénico</b>	Metaloide de amplia distribución, se emplea como conservador de la madera, en plaguicidas y en la fabricación de algunos medicamentos. En los cuerpos de agua se acumula en la cadena trófica, su ingestión, aun en dosis bajas, produce desórdenes gastrointestinales, afectación del tejido dérmico y alteraciones del sistema nervioso central.
<b>Plomo</b>	Elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, las actividades humanas como la fabricación de pinturas, insecticidas, vidrios y baterías eléctricas, además como antidetonante de la gasolina, provocan emisiones peligrosas al ambiente. El plomo afecta a los microorganismos retardando la degradación de la materia orgánica. En los animales superiores afectan los glóbulos rojos, hígado y riñones, causando gran diversidad de padecimientos.
<b>Níquel</b>	Se utiliza como catalizador en la industria metalúrgica y en la fabricación de cerámica. Inhibe la actividad biológica de los microorganismos. En el hombre afecta el pulmón y produce
<b>Zinc</b>	Se usa en la metalúrgica como recubrimiento de otros metales; no es muy tóxico.
<b>Cadmio</b>	Subproducto de la explotación de otros metales como el cobre, zinc y plomo. Se utiliza en el electro plateado, fabricación de pinturas y plásticos y, en la fabricación de baterías. Su forma tóxica es el ion $Cd^{2+}$ su acumulación afecta hígado y riñones.
<b>Cobre</b>	Elemento muy abundante en la naturaleza, es un micronutriente esencial, en dosis.
<b>Cromo</b>	Se utiliza en la industria del cromado, fabricación de acero y curtido de pieles.
<b>Mercurio</b>	Es uno de los metales más peligrosos, se usa en la fabricación de componentes eléctricos y electrónicos en la industria del papel y en la agricultura. Su ingestión altera el sistema nervioso
<b>Selenio</b>	Se considera un no metal. Normalmente se produce durante el refinamiento del cobre o la creación de ácido sulfúrico. A pesar de que es tóxico en grandes dosis, es un micronutriente esencial en el cuerpo.

**Fuente. (Martínez, 2003)**

Los metales pesados pueden llegar a ser potencialmente tóxicos para los animales y los seres humanos, por lo que su concentración en los lodos no debe sobrepasar valores límites admisibles según las normatividades.

se presentan las disposiciones existentes en Estados Unidos (EPA) sobre límites máximos de metales contaminantes en el compost a partir de Residuos Sólidos Urbanos; al igual que los límites en lo relacionado con contenidos de metales pesados para los compost a

partir de residuos sólidos urbanos (RSU) de acuerdo al Decreto 822 de 1998 de la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico, por esta razón, debe buscarse que los materiales orgánicos sean aprovechados de una manera segura y eficiente.

**Tabla 2. Características de algunos metales pesados.**

Metal	Tierras agrícolas y forestales, sitios públicos, recuperación de suelos*		Límites máximos permitidos en compost**(mg/kg - peso seco)
	Concentración máxima (mg/kg)	Aplicación máxima (kg/ha)	
Arsénico	75	41	54
Cadmio	85	39	18
Cromo	3000	3000	1200
Cobre	4300	1500	1200
Plomo	840	300	300
Mercurio	57	17	300
Molibdeno	75	18	20
Níquel	420	420	180
Selenio	100	100	14
Zinc	7000	2800	1800

**Fuente: Norma 503 EPA, Decreto 822/98 Ministerio de Desarrollo.**

### 2.1.3 Tratamiento de metales pesados.

En la actualidad el tratamiento de aguas residuales es un proceso que a su vez incorpora etapas físicas, químicas y biológicas, los cuales tratan y remueven contaminantes, en lo que corresponde al tratamiento de metales pesados en lodos residuales, no existe un sistema que resulte atractivo, debido al alto costo que este genera. (Oropeza, 2006)

Entre los tratamientos químicos más utilizados para la remoción de metales en los lodos de origen urbano se encuentran:

- a) La formación de pro-quelato metálico la cual consiste en la mezcla del sustrato (lodo residual) con compuestos de sulfuro con el fin de formar compuestos complejos de hierro (quelatos) en una forma coloidal.

b) La neutralización de la solución o sustrato por adición de un ácido hasta provocar la precipitación de sulfuros alcalino-térreos e hidróxidos de los iones metálicos.

c) La separación por centrifugación de las fases líquida y sólida.

#### **2.1.4 Lodos de aguas residuales.**

Lodo residual, es aquel que no ha sido tratado ni estabilizado, que puede extraerse de plantas de tratamiento de aguas residuales. Tiene a producir la acidificación en la digestión y produce olor.

Son un subproducto del tratamiento de las aguas residuales, se pueden generar durante los tratamientos primario (físico y/o químico), secundario (biológico) y terciario; representan un residuo acuoso, más o menos diluido, con una amplia variedad de coloides y otras partículas en diferentes formas; pueden existir también varios contaminantes peligrosos, como sales, contaminantes orgánicos y metales pesados. La cantidad de lodo producida depende de la eficiencia, del tipo de tratamiento (los fisicoquímicos y los biológicos aerobios producen más lodo que los biológicos anaerobios) y de la carga contaminante inicial del agua residual **(Colomer, 2010)**.

Se denomina aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua; se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen, y cloacales porque son transportadas mediante cloacas nombre que se le da habitualmente al colector; están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno **(Martínez, 2007)**.

Las diferentes actividades productivas y domésticas producen grandes cantidades de aguas residuales, las cuales contienen una diversidad amplia de contaminantes; estas aguas deben ser procesadas en las Plantas de Tratamiento de Aguas residuales PTAR para su reuso o disposición con una calidad mayor **(Trejos, 2012)**.

En el tratamiento de aguas residuales, se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos:

**Tabla 3. Caracterización y composición de lodos.**

<i>Parámetros</i>	<i>Lodos primarios</i>	<i>Lodos secundarios (mezcla)</i>	<i>Lodos digeridos</i>
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7-6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
ssv (%ss)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%ss)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%ss)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%ss)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%ss)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%ss)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>	100-1000	10-100
Metales pesados (%ss) (Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

Fuente: Hernández M. A, 2002.

**Tratamiento preliminar**, de acuerdo con **Martínez, (2007)** menciona que debe realizarse por medio de procesos físicos y/o mecánicos, como rejillas, desarenadores y trampas de grasa, dispuestos convencionalmente de modo que permitan la retención y remoción del material extraño presente en las aguas negras y que pueda interferir los procesos de tratamiento. Debe cumplir dos funciones:

Medir y regular el caudal de agua que ingresa al sistema, con estructuras como canaletas Parshall, vertederos, piezómetros, etc.

. Extraer los sólidos flotantes grandes y la arena, a través de tamices o cribas.

**Tratamiento primario**, que comprende procesos de sedimentación y tamizado.

Tiene como objetivo remover los sólidos en suspensión por medio de un proceso de sedimentación simple. Para complementar este proceso se pueden agregar compuestos químicos con el objeto de precipitar el fósforo, los sólidos en suspensión muy finos o aquellos en estado de coloide (**Martínez, 2007**).

**Tratamiento secundario**, que comprende procesos biológicos aerobios, anaerobios y fisicoquímicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO

(Demanda Biológica de Oxígeno), según (**Martínez, 2007**). Tiene como objetivo remover los sólidos en solución y en estado coloidal mediante un proceso de naturaleza biológica seguido de sedimentación. Este proceso biológico es un proceso natural controlado en el cual participan los microorganismos presentes en el agua servida más los que se desarrollan en el estanque secundario. Estos microorganismos, principalmente

bacterias, se alimentan de los sólidos en suspensión y estado coloidal produciendo en su degradación en anhídrido carbónico y agua, originándose una biomasa bacteriana que precipita en el estanque secundario (**Martínez, 2007**).

**Tratamiento terciario** o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos. El objetivo remover algunos contaminantes específicos presentes en el agua servida tales como los fosfatos que provienen del uso de detergentes domésticos e industriales y cuya descarga en curso de agua favorece la eutrofización, es decir, un desarrollo incontrolado y acelerado de la vegetación acuática la que agota el oxígeno, mata la fauna existente en el sector.

Dentro del tratamiento de las aguas de desecho para la eliminación de los nutrientes están la precipitación, la sedimentación y la filtración. No todas las plantas tienen esta etapa ya que dependerá de la composición del agua servida y el destino que se le dará. (**Martínez, 2007**).

### 2.1.5 Tipos de lodos

Depende del nivel de tratamiento de las aguas residuales:

- **Lodos de decantación primaria:** provenientes de decantación primaria son generalmente de consistencia limosa y color de marrón a gris, volviéndose sépticos y dando mal olor con gran facilidad.
- **Lodos de precipitación química:** son generalmente de color negro y su olor, aunque puede llegar a ser desagradable, es menor que los de decantación primaria típica y la velocidad de descomposición de los lodos es mucho menor.
- **Lodos de tratamiento secundario:** son de color marrón, relativamente ligeros, y por estar bien aireados en el caso general, no suelen producir olor con tanta rapidez como los fangos primarios; por no estar suficientemente aireados, su color se oscurece y producen un olor tan fuerte como el lodo primario.
- **Lodos provenientes de lechos bacterianos:** color marrón y no producen olores molestos si están frescos; se degradan a una velocidad menor que los lodos procedentes del sistema secundario de lodos activados, salvo en el caso de que contengan una preponderancia de organismos superiores (por ejemplo, gusanos), en cuyo caso pueden llegar a dar malos olores muy rápidamente.
- **Lodos digeridos:** color entre marrón oscuro y negro, y contienen cantidades relativamente grandes de gas, si está bien digerido prácticamente no produce olor o produce un olor relativamente débil que no es desagradable.

### 2.1.6 Clasificación de los lodos

Los lodos se clasifican principalmente de acuerdo al contenido de metales pesados y a su calidad microbiológica:

- **Lodo peligroso:** presencia de contaminantes tóxicos de acuerdo a lo establecido por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) en sus apartados 260 y 261.
- **Lodo no peligroso:** las concentraciones de sus componentes son inferiores a los valores establecidos por la EPA en sus apartados 260 y 261.

Los lodos no peligrosos pueden ser de Buena Calidad o de Mala Calidad según su contenido de metales pesados en forma más rigurosa según la normatividad propuesta por la EPA.

**Tabla 4. Concentración de metales y tasas de carga según la regulación 503 de la EPA.**

ELEMENTOS	Valores límite (mg/kg mat. seca)	Tasa de carga acumulativa del elemento (kg/Ha)	Concentración del componente para una calidad excepcional, (mg/kg)	Tasa de carga anual del elemento (kg/Ha/año)
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	-	-	-	-
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21

Fuente: EPA 2003

De acuerdo con los límites de calidad microbiológica de la EPA presentados en la Tabla 2.4 un lodo de buena calidad, se clasifica como Lodo Clase A o Lodo Clase B:

**Lodo Clase A:** no contienen niveles detectables de agentes patógenos, satisfacen los requerimientos estrictos de reducción de atracción de vectores y niveles bajos de contenido de metales y sólo tienen que solicitar permisos para garantizar que estas normas tan estrictas han sido cumplidas.

**Lodo Clase B:** reciben tratamiento, pero aún contienen niveles detectables de agentes patógenos; estos tienen restricciones al acceso público. La planeación del manejo de nutrientes garantiza que se apliquen biosólidos a la tierra agrícola en las cantidades y las calidades apropiadas.

**Tabla 5. Límite de calidad microbiológica de lodos.**

PARÁMETRO	LODO CLASE A	LODO CLASE B
Coliformes Fecales o Salmonella	<1000 NMP/g o UFC/g <3 NMP/4g	<2000000 NMP/g o UFC/g
Huevos de helminto	1 huevo viable/4 g	-

Fuente: EPA 2003

La EPA (Agencia de Protección Ambiental) de Estados Unidos) publicó la reglamentación concerniente a los sólidos biológicos, su uso y disposición bajo el Code of Federal Regulations (CFR), 40 CFR parte 503 de 1993. Para la aplicación en suelo, la reglamentación ofrece límites numéricos a 10 metales, guía en la práctica de manejo, requerimientos para el monitoreo, almacenamiento de registros y su publicación.

Aspectos:

Límite de metales.

Prácticas de manejo.

Alternativas para la reducción de organismos patógenos.

Reducción de vectores.

Restricciones para su disposición en suelos.

**2.1.7 Clasificación de los lodos residuales por su contenido de metales pesados según la EPA.**

El contenido de metales pesados en lodos residuales típicamente se establece en dos parámetros de clasificación. El contenido de estos metales le confiere a los lodos una clasificación 1 y 2.

Si las concentraciones de metales son menores a los clasificados como nivel 1, estos pueden ser manejados, distribuidos y aun comercializados en bolsas. Estos podrán aplicarse a cualquier medio tal como: jardines de casa, invernadero, campos de golf, parques recreativos, etc., y no es necesario un inventario de su aplicación.

Si los niveles o concentraciones de uno o más de los metales regulados excede los valores límites establecidos en el nivel 1, el criterio que se sigue es clasificarlos como biosólidos clase 2. Estos biosólidos pueden aplicarse en sitios específicos y deberán cumplir con las restricciones en lo referente a límite anual y límite acumulativo.

Un ejemplo de acuerdo a esta tabla, el límite anual establece que con relación al cobre únicamente se podrán agregar 75 Kg por hectárea por año de este metal, mientras que al considerar el límite acumulativo, lo máximo que se podrá aplicar a este suelo serán 1500 Kg por hectárea y una vez alcanzado este límite ya no se podrá aplicar biosólidos en este suelo.

De acuerdo al criterio mencionado con anterioridad, la dosificación de biosólidos estará determinada por:

- ⇒ La tasa agronómica
- ⇒ La dosificación anual de metales contenidos en los lodos
- ⇒ El límite acumulativo de un metal en particular.

**Tabla 6. Clasificación de los lodos de acuerdo al contenido de metales pesados.**

METAL	CLASE 1 mg/kg	CLASE 2 mg/kg
As	41	75
Cd	39	85
Cu	1200	3000
Pb	300	840
Hg	17	57
Ni	420	420
Se	36	100
Zn	2800	7500

Fuente: EPA 2003

#### 2.1.7.1 Mecanismos para tratamiento de lodos

La reglamentación que propone una clasificación de los lodos según su caracterización microbiológica, plantea mecanismos de tratamiento de los mismos para mejorar su calidad microbiológica, proporciona información sobre métodos analíticos y procedimientos de muestreo es el Control de patógenos y atracción de vectores en los lodos residuales. (EPA 2003). Los procesos de tratamiento del lodo son clasificados en cuanto a su capacidad de remoción de organismos patógenos en Procesos de Reducción Avanzada de Patógenos

(PFRP) y Procesos de Significativa Reducción de Patógenos (PSRP).

Los procesos reconocidos por la EPA como Procesos de Significativa Reducción de Patógenos PRSP son:

- **Secado:** el lodo de agua residual es secado al aire, durante un mínimo tres meses.

Dos de los tres meses a una temperatura media diaria ambiente superiora 0°C.

- **Estabilización térmica:** un lodo resultante de estos procesos de tratamiento, es denominado tipo A, según las condiciones especificadas por la norma EPA 40, el contenido de bacterias patogénicas, virus entéricos y huevos viables de helmintos son reducidos a los niveles detectables indicados en la normatividad. Estos lodos pueden ser aplicados en suelo para uso agrícola sin restricciones. Este lodo debe ser monitoreado para parámetros de huevos de helminto, coliformes fecales, *Salmonellas.*, asegurando que no ocurra recrecimiento.
- **Compostaje:** constituye una forma viable de estabilización de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales - PTAR; es un proceso en el cual la materia orgánica se degrada biológicamente hasta lograr un producto final estable.

Aproximadamente del 20 al 30% de los sólidos volátiles son convertidos a dióxido de carbono y agua; adicionalmente las temperaturas alcanzadas pueden llegar a valores entre 50 y 60 °C que destruyen los organismos patógenos. El proceso de compostaje facilita su disposición final al poderlos aplicar directamente en áreas de cultivo para incrementar la producción y enriquecer o mejorar la calidad y estructura del suelo, mejorando el aporte de carbono, nitrógeno, azufre, potasio y fósforo y algunos micronutrientes como zinc, hierro y cobre que propician una situación favorable para el desarrollo de las plantas, sin embargo, su aplicación puede verse limitada por la presencia de algunos compuestos como los metales pesados presentes en los lodos (Torres, 2008).

**Digestión aerobia:** el lodo de agua residual es agitado con una cantidad de oxígeno necesaria para mantener las condiciones aerobias, el tiempo medio de retención es de 40 días a 20°C y de 60 días a 15°C.

**Digestión anaerobia:** realizada en ausencia de oxígeno con tiempo medio de retención de 15 días, entre 35°C - 55°C y 60 días a 20°C. En este proceso se propicia la degradación de la materia orgánica contenida en el en ausencia de oxígeno molecular; la materia orgánica contenida en la mezcla de lodos primarios y secundarios se convierte en metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) principalmente. El proceso se lleva a cabo en un reactor

completamente cerrado, los lodos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen dentro de estos tanques durante períodos de tiempo considerables; el lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos. (Metcalf y Eddy, 2005).

Los dos tipos de digestores más empleados son los de alta y baja carga; en el proceso de digestión de baja carga, no se suele calentar ni mezclar el contenido del digestor, y los tiempos de retención varían entre 30 y 60 días. En los procesos de digestión de alta carga el contenido del digestor se calienta y mezcla completamente; el lodo se mezcla mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración, y se calienta para optimizar la velocidad de digestión, el tiempo de retención generalmente es menor a 15 días. La combinación de estos dos procesos se conoce como proceso de doble etapa, el primer tanque se utiliza para la digestión, y se equipa con dispositivos para el mezclado. El segundo tanque se utiliza para el almacenamiento y concentración del lodo digerido, y para la formación de un sobrenadante relativamente clarificado.

**Tratamiento químico:** se adiciona cal al lodo para elevar el pH, la cal es el reactivo que más se utiliza por su reducido costo y alcalinidad, realiza principalmente una acción bactericida, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas; la estabilización alcalina pretende aumentar el pH por encima de 12 unidades y mantenerlo durante 72 horas como mínimo, para lograr la reducción significativa de patógenos y la estabilización del lodo; adicionalmente, este valor de pH sobrepasa los límites de tolerancia para el crecimiento y supervivencia de organismos tan resistentes como los huevos de helmintos (EPA, 2003).

Los criterios de selección de la cal viva  $\text{CaO}$  o la cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  están en función también de aspectos específicos relacionados con el sitio de aplicación y aspectos técnicos y económicos; dentro de los primeros se encuentran la facilidad de adquisición, calidad del material, riesgos y requisitos de manipulación y dentro de los segundos están los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, costos del producto y costos asociados a su manipulación. El propósito principal de la estabilización alcalina es la reducción de patógenos a niveles por debajo del límite de la norma, que permitan su disposición segura o su uso en la agricultura sin restricciones. (Torres, 2008)

Los lodos generados por estos procesos, son clasificados según las condiciones especificadas por la norma EPA 40; la selección de alguno de estos procesos para la estabilización de un lodo en particular depende de varios factores tales como: la cantidad y

calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y, la situación financiera en cada caso (Oropeza, 2006).

### 2.1.7.2 Factores limitantes en los lodos

#### La concentración de metales pesados

Entre los metales pesados existentes, algunos son micronutrientes esenciales para las plantas como el Cu y el Zn, pero otros como Cd, Pb, Cr, Ni, Hg y Co, no lo son y pueden, a partir de una determinada concentración, resultar tóxicos para algún componente de la cadena trófica suelo-planta-animal-hombre (Acosta *et al.*, 2003).

Algunas de las características de los metales pesados resumidas por Martínez, (2003)

**Tabla 7. Concentración característica de algunos metales pesados en lodos de sólidos volátiles.**

METAL	CONCENTRACION (mg/g)
Cr	$3.37 \times 10^{-3}$
Cu	$13.48 \times 10^{-3}$
Zn	$3.37 \times 10^{-3}$
Ni	$7.27 \times 10^{-3}$
Cd	$9.00 \times 10^{-3}$

Fuente: Martínez, (2003)

La producción de gas disminuye el contenido de materia orgánica que permanece sin digerir, cuando la concentración de ácidos grasos volátiles y de sólidos volátiles aumenta en el licor mezcla del digestor. En la Tabla 8 se muestran concentraciones típicas de metales pesados que permiten procesos biológicos en el caso de lodos activados.

**Tabla 8. Concentraciones críticas de metales que permiten procesos biológicos.**

LODOS ACTIVADOS	METALES			
	Cr	Cu	Ni	Zn
Concentración en continuo en agua (mg/kg)	10	1	1-2.5	0.08-1.0
Dosis en agua residual (mg/kg)	500	75	50<200	160

Fuente: Martínez, (2003)

Los metales pesados pueden llegar a ser potencialmente tóxicos para los animales y lo seres humanos, por lo que su concentración en los lodos no debe sobrepasar valores límites admisibles según las normatividades.

En la Tabla 9 se presentan las disposiciones existentes en Estados Unidos (EPA) sobre límites máximos de metales contaminantes en el compost a partir de Residuos Sólidos Urbanos; al igual que los límites en lo relacionado con contenidos de metales pesados para los compost a partir de residuos sólidos urbanos (RSU), por esta razón, debe buscarse que los materiales orgánicos sean aprovechados de una manera segura y eficiente.

**Tabla 9. Límites máximos permitidos de metales pesados en lodos.**

Metales	Tierras agrícolas y forestales, sitios públicos, recuperación de suelos.		Límites máximos permitidos en compost (mg/kg- peso seco)
	Concentración máxima (mg/kg)	Aplicación máxima (kg/ha)	
Arsénico	75	41	54
Cadmio	85	39	18
Cromo	3000	3000	1200
Cobre	4300	1500	1200
Plomo	840	300	300
Mercurio	57	17	300
Molibdeno	75	18	20
Níquel	420	420	180
Selenio	100	100	14
Zinc	7000	2800	1800

Fuente: \*Norma 503 EPA, \*\* Decreto 822/98 Ministerio de Desarrollo.

La importancia de regular la concentración de metales en los biosólidos radica en la posibilidad de incrementar la disponibilidad de algunos de ellos que pueden causar problemas de fitotoxicidad o acumulación en los cultivos, sin embargo, el riesgo de lixiviación de metales a los acuíferos es poco probable siempre y cuando los biosólidos no contengan altas concentraciones de ellos. A pesar de esto, los registros de numerosos sitios con aplicaciones agrícolas de biosólidos demuestran que la asimilación de los metales por las plantas es mínima. Además, el incremento en la concentración de metales en el suelo no será significativo sino hasta después de diversas aplicaciones de biosólidos, (John, 2002).

### 2.1.7.3 Tratamiento de lodos residuales.

La tecnología de tratamiento para lodos residuales generados en las PTAR en Estados Unidos y Europa se realiza utilizando alguno de los siguientes cuatro procesos:

- **Digestión anaerobia:** Comprende dos fases, en la primera se forman ácidos volátiles y en la segunda las bacterias anaerobias producen gas metano a partir de dichos ácidos, todo esto en ausencia de oxígeno molecular (O<sub>2</sub>).
- **Digestión aerobia:** Proceso de aireación prolongada (dotando al sistema de O<sub>2</sub>) para provocar el desarrollo de microorganismos aerobios hasta sobrepasar el periodo de síntesis de las células y llevar a cabo su propia auto-oxidación, reduciendo así el material celular.
- **Tratamiento químico:** Realiza principalmente una acción bactericida, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas. Por su reducido costo y alcalinidad, la cal es el reactivo que más se utiliza.
- **Incineración:** Conduce a la combustión de materias orgánicas de los lodos, y es el proceso con el que se consigue un producto residual de menor masa, las cenizas constituidas únicamente por materias minerales del lodo. **(Oropeza, 2006).**

Por otro lado, existen tratamientos biológicos como la biorremediación que se divide en bioacumulación y adsorción, las cuales en investigaciones actuales ha presentado excelentes resultados para la remoción de compuestos metálicos. Los microorganismos utilizados para este método han permitido recuperar hasta el 100% de metales como el Plomo, Mercurio, Cobre, Níquel, Cobalto, Oro, Plata y Cadmio, a partir de soluciones diluidas. **(Ruiz, 2005.)**

Otro de los tratamientos biológicos importantes, es el proceso de vermicomposteo, el cual será descrito con mayor detalle a continuación en conjunto con la biología de la especie *Eisenia fétida* por ser de interés principal para el desarrollo de esta investigación. **(Harris, 2001.)**

Según las concentraciones de microorganismos patógenos, la norma EPA 40 CFR 503 limita las rutas de exposición de una comunidad a los patógenos presentes en los lodos.

Para esto, las concentraciones finales no deben sobrepasar las máximas admitidas por la EPA. Los lodos deben examinarse las concentraciones de coliformes fecales o *Salmonella*, ya que las bacterias pueden presentar recrecimiento, aun después de aplicados los tratamientos de desinfección. Esto no ocurre con los virus, ni con los parásitos, ya que estos microorganismos requieren de un huésped para llegar a su estado infectivo.

Las bacterias pueden reproducirse si las condiciones ambientales, como humedad y temperatura, lo permiten. (Araque, 2006)

**Tabla 10. Concentración máxima de microorganismos patógenos.**

<b>Parámetro</b>	<b>EPA 40 CFR 503</b>
Coliformes fecales	< 1.0E+03 UFC/g Base Seca
Salmonella	< 3.0 NMP/4g Base Seca
Enterovirus	< 1 PFP/4g Base Seca
Huevos de helminto	< 1 huevo viable/4g Base Seca

**Fuente:** EPA\*UFC: unidades formadoras de colonia, NMP: número más probable, PFP: partículas formadoras de placa.

Según la EPA, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, los biosólidos son materiales orgánicos producidos a partir del tratamiento de aguas residuales, los cuales pueden aportar beneficios al suelo, con el fin de abastecer de nutrientes y renovar la materia orgánica en el terreno.

Los biosólidos se obtienen a partir de dos etapas mediante el proceso de depuración convencional: la decantación primaria, mediante la cual la gravedad separa las partículas que están suspendida en el agua y la decantación secundaria, en donde se separan del efluente los flóculos (grupos de materiales orgánicos) formado a partir un líquido existente en el reactor biológico, una parte de esto es recirculado para mantener la biomasa necesaria y el resto es extraído, como lodos secundarios.

Existen diferentes procesos proceso físicos usados para la separación, reducción de volumen y el peso de los biosólidos; proceso químico como la adición de químicos para transformar las características de los biosólidos; y proceso biológico, adición de biomasa para la estabilización de los biosólidos; proceso térmico, destrucción y detoxificación.

**Tabla 11. Tratamiento de biosólidos**

PROCESOS		
FISICOS		QUIMICOS
Espeamiento	Desaguado	
Decantación	Filtración	Acondicionamiento
Flotación	Centrifugación	Neutralización
Centrifugación	Secado	Extracción
	Evaporación	Oxido-reducción
	Prensado	Estabilización
		Solidificación

**Fuente: Araque, 2006.**

El proceso físico en donde se logra el espeamiento y el desaguado de biosólidos: Espeamiento, se utiliza para reunir el contenido solido a través de la eliminación en partes de fracción liquida, disminuyendo así su volumen, lo que conlleva a utilizar equipos de menor densidad, la operación es llevada a cabo a partir de la flotación, centrifugación y filtrado de banda por gravedad; proceso físico a partir de desaguado, reside en la exclusión de agua de lodo tanto como sea posible, es usada puesto que disminuye el costo de transporte, fácil manipulación, no genera olores. Basada en operaciones de filtración, centrifugación, secado, evaporación y prensado. La elección de alguno de los dos métodos depende de las características del lodo, del espacio disponible para la realización de dicha actividad.

En el proceso químico se adhieren elementos químicos a los lodos para generar estabilidad, se encuentran dos alternativas, la primera de ellas es el acondicionamiento químico el cual permite reducir la humedad del lodo entre 90-99% a un 65-85% según la naturaleza del solido a tratar y como resultado de ello da una coagulación del sólido y la liberación del agua absorbida, entre los productos más utilizados se encuentran: cloruro férrico, la cal, la alúmina y polímeros orgánicos, los factores que afectan esta alternativa son sus propiedades (concentración de sólidos, edad, pH y alcalinidad), y el tipo de quipo que se utiliza en el mezclado y la deshidratación; la segundo alternativa es la estabilidad con cal, se usa con el fin de aumentar y mantener el pH 12 a partir de la adición de cal el beneficio de este método es que no se degrada la materia orgánica, no generan olores y se elimina los microorganismos patógenos existentes.

De acuerdo a la norma 40 CFR Part 503 de la EPA, los biosólidos se clasifican según el contenido de patógenos y el nivel de clases pesados en Clase A o Clase B. La primera se denomina biosólidos con calidad excepcional donde la densidad presentada en los

coliformes fecales debe ser menor a 1000 NMP (número más probable) g de solido total o también la densidad de *Salmonella sp.* Es menor a 3 NMP /4g de solido total; los virus entéricos deben tener una densidad de menor o igual a 1UFC (Unidad formadora de colonia) /4g de solido total y los huevos viables de helmintos deben ser menor a 1/ 4g de solido total. Estos biosólidos no tienen ninguna restricción para su aplicación en cultivos agrícola y solo es necesario solicitar permiso para avalar la norma. La segunda clase debe tener una densidad de coliformes fecales inferior a 2 x NMP/ gramo de solido total, esto se debe tener un tratamiento posterior para su estabilización y son los de mayor restricción para uso en suelos. La tabla 2.12 muestra las características mencionadas.

**Tabla 12. Valores límites por la EPA norma CFR 40 parte 503 para biosolidos.**

Constituyentes	Concentración Máxima (mg/Kg)	Calidad microbiológica Tipo A <sup>+</sup>	Calidad microbiológica Tipo B <sup>++</sup>
Arsénico	75		
Cadmio	85		
Cobre	4300		
Plomo	840		
Mercurio	57		
Molibdeno	75		
Níquel	420		
Selenio	100		
Zinc	7500		
Microbiológico			
Coliformes fecales (UCF/g)		< 10 <sup>3</sup>	< 2x10 <sup>5</sup>
Salmonella (UCF/g)		3/4	-
Huevos de helmintos/g		1/4	-

**Fuente: EPA 2003**

#### 2.1.7.4 Factores ambientales del lodo.

Actualmente se generan grandes volúmenes de lodos, que contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmosfera, de las aguas y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde son depositados. (Oropeza, 2006)

Los lodos generados en el tratamiento del agua residual son considerados residuos peligrosos en la laguna de estabilización El Espinar-Puno el principal problema que afecta a los lodos es el alto contenido microbiológico y de metales pesados que presentan.

El interés en procesos de descontaminación se debe a que los metales pesados son considerados perjudiciales para el medio ambiente. Los valores límite para las emisiones

de metales se van reduciendo de forma constante según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Actualmente en lo que respecta a bioremediación existen parámetros que indican cuales son los valores de límite máximo permisibles de estos contaminantes en el agua potable, según la OMS los valores límite para los metales pesados de las aguas residuales puede variar de acuerdo a los sectores industriales y a las regulaciones nacionales.

El mercurio y el cadmio se consideran de la clase I de materiales perjudiciales según la normativa 76/464 de la comunidad europea.

Es decir, estos materiales perjudiciales no tendrían que llegar a ser posible, al medio ambiente de manera que aquí también se tiene que tener en cuenta una nueva reducción del valor límite de las aguas residuales. **(Gavilán, 2004).**

#### **2.1.7.5 Tratamiento térmico de lodos residuales**

El tratamiento térmico ejerce un efecto sobre las características fisicoquímicas del biosólido, generando reducciones importantes en variables como carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, entre otros. Sin embargo, los valores residuales posteriores al tratamiento térmico resultan ser comparables a los presentes en abonos orgánicos, por lo que se consideran aprovechables de manera efectiva en reúso agrícola. **(Giraldo, 2006).**

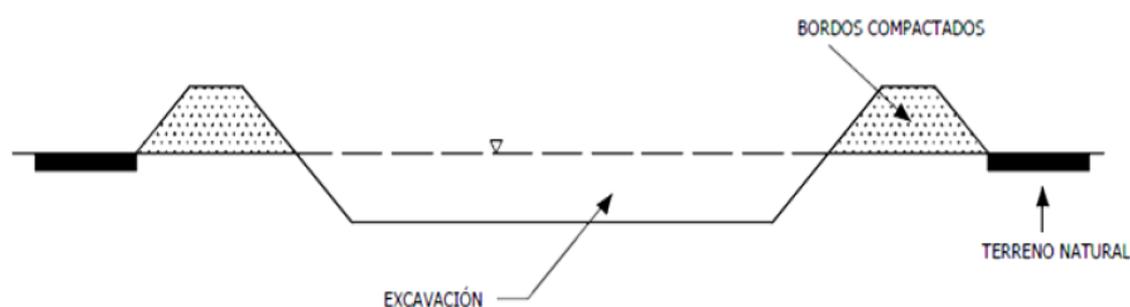
Las principales recomendaciones por diversos autores sobre el proceso de secado térmico reportan rangos de temperatura predominante entre 50-75 °C y los periodos de tiempo pueden variar entre 3 min y 13 días dependiendo del tipo de microorganismo que se quiera eliminar. **(Araque, 2006).**

En el secado térmico puede controlarse de manera muy efectiva la temperatura y el tiempo de exposición, presentando un potencial de higienización alto como complemento a la modesta eficiencia en la remoción de patógenos de la digestión anaerobia. Se ha encontrado que con temperaturas mayores a 45 °C, es posible eliminar de manera considerable bacterias formadoras de esporas como *Clostridium perfringens*, *Bacillus spp* y sulfito reductoras, además de eliminar microorganismos de alta persistencia y patogenicidad como los huevos de helmintos. **(Almeida, 2006)**

#### **2.1.7.6 Lagunas de estabilización**

Excavación en el suelo donde el agua residual se almacena para su tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de las algas y otros organismos.

Las lagunas se construyen generalmente por excavación del terreno natural, formando un bordo perimetral con el fin de encerrar el área de tratamiento, evitar la aportación de escurrimientos superficiales y, en ocasiones, aumentar la capacidad de almacenamiento (Figura 1). Con frecuencia, se sobreexcava a mayor profundidad que la requerida por el proyecto ya que los depósitos naturales de suelo normalmente no tienen las características adecuadas para un desplante directo, y se debe sustituir el material sobreexcavado por uno de relleno seleccionado y bien compactado. La profundidad de la laguna deberá encontrarse entre 1,5 a 2,5 m, en el caso de una laguna primaria se deberá tener en cuenta una profundidad adicional para la acumulación de los lodos entre periodos de limpieza de 5 a 10 años. **Martínez (2003).**



**Figura 1. Sección formación de bordos**

**Fuente: Martínez, (2003)**

La selección del sitio para la construcción de una laguna debe tomar en cuenta:

La capacidad de tratamiento y de almacenamiento requerida.

La necesidad de elevación (presión).

La disponibilidad y costo del terreno.

Un factor determinante en la localización de las lagunas

Información geotécnica preliminar.

Topografía y geología.

Estudios de impacto ambiental.

Aun cuando la forma superficial de la laguna puede ser cualquiera, lo común es que sea de una geometría simple (rectangular o cuadrada permitir el uso de maquinaria pesada y facilitar la construcción. Lo ideal es que la relación ancho/largo de la laguna sea lo mayor posible para asegurar que el funcionamiento hidráulico corresponda a un régimen de flujo serie, además de evitar los cortos circuitos o las zonas muertas. La forma rectangular con una relación de 3:1 (3 metros de largo por 1 metro de ancho) es la más común, debido a la

dificultad que existe para construir una la deben construir con su mayor dimensión paralela a la dirección del viento predominante, de tal forma que se aproveche el mezclado

Para evitar la contaminación de acuíferos se debe evitar que el agua se infiltre al subsuelo, por lo cual es necesario seleccionar el sitio buscando que tenga un suelo de preferencia arcilloso, evitar áreas con fallas geológicas y lechos de río debido a los riesgos de infiltración. Las técnicas para impermeabilización son tres:

Suelos naturales (arcillas compactadas).

Suelos locales mejorados con estabilizantes químicos

Revestimientos sintéticos (geomembranas o liners).

La operación y mantenimiento de las lagunas son acciones relativamente sencillas que se deben realizar para que ninguna laguna funcione en el momento de su arranque con la eficiencia de diseño, se requiere un periodo de aclimatación que depende de la temperatura, características del agua residual y, sobre todo factores. Este proceso puede llevar de semanas a meses, y la habilidad del operador transversal típica de una laguna construida por excavación y es la disponibilidad de terreno cuadrada) con las esquinas redondeadas para tipo pistón o “j” reactores en laguna muy larga. (Martínez, 2003).

Las lagunas producen un buen efluente. Como cualquier proceso biológico, todo, del buen desarrollo de la población biológica, entre otros consiste en tratar de reducirlo al mínimo. También debe establecerse un equilibrio hidráulico, dependiendo del gasto, la permeabilidad del fondo, la evaporación, entre otros. Las lagunas de estabilización se pueden usar casi en cualquier parte, variando la velocidad a que pueden operarse, con la temperatura, la energía luminosa y otras condiciones locales (Martínez, 2003).

De acuerdo con Martínez, (2007) cuando el agua residual es descargada en una laguna de estabilización se realiza en forma espontánea un proceso de autopurificación o estabilización natural, en el que tienen lugar fenómenos de tipo físico, químico y biológico. En esta simple descripción se establecen los aspectos fundamentales del proceso de tratamiento del agua que se lleva a cabo en las lagunas de estabilización:

- Es un proceso natural de autodepuración
- La estabilización de materia orgánica se realiza mediante la acción simbiótica de bacterias, algas, y otros organismos superiores.
- Se presentan, procesos físicos de remoción de materia suspendida.
- Se efectúan cambios químicos en la calidad del agua que, entre otros aspectos, mantienen las condiciones adecuadas para que los organismos puedan realizar la

estabilización, transformación, y remoción de contaminantes orgánicos biodegradables y, en algunos casos, nutrientes.

- Se establecen cadenas tróficas y redes de competencia que permiten la eliminación de gran cantidad de microorganismos patógenos que se encuentran presentes en las aguas, residuales. Por lo tanto, las lagunas de estabilización se consideran y se pueden proyectarse como un método de tratamiento de la materia orgánica y de remoción de los patógenos presentes en el agua residual.

Dependiendo, de las condiciones del problema por resolver las lagunas de estabilización pueden utilizarse solas, combinadas con otros procesos de tratamiento biológico, o bien, entre ellas mismas (sistemas lagunares de tratamiento), (**Martínez, 2007**).

### **2.1.8 Vermicomposteo.**

El vermicomposteo es el método de procesamiento de materia orgánica, utilizando diferentes especies de lombriz de tierra.

El vermicomposteo, es el producto de la descomposición de la materia orgánica realizado por la actividad de ciertas especies de lombrices, principalmente las del género *Eisenia*. La más utilizada es la lombriz roja de California (*Eisenia Fétida*), pues facilita que el proceso se realice más rápidamente. El vermicompostaje puede desarrollarse en cualquier domicilio o centro educativo, utilizando los residuos orgánicos procedentes de restos vegetales frescos, es decir que no hayan sido cocinados. Las lombrices rojas, a través de sus tubos digestivos, y con la acción combinada de microorganismos, transforman la materia orgánica en un producto llamado vermicompost o humus de lombriz. Éste es un compost con una mejor estructura y un mayor contenido de nutrientes, con respecto al compost obtenido sin la intervención de las lombrices.

La presencia de este humus en los suelos garantiza la reserva de sustancias nutritivas para las plantas, favorece la absorción y retención del agua, facilita la circulación del aire, limita los cambios bruscos de temperatura y humedad, bloquea a muchos compuestos tóxicos y provee alimentos a incontables y minúsculos animales que son la base de la cadena alimenticia.

La vida y el crecimiento de las plantas y animales, es posible gracias al trabajo secreto de los descomponedores, de forma que sin ellos no habría vida sobre la Tierra. (**Schuldt, 2008**)

El método de vermicomposteo consiste en la crianza intensiva de lombrices que se alimentan de los desechos que contienen los lodos, y es tal la depuración, que los convierten en biosólidos, y como consecuencia, en excelentes mejoradores de suelos.

Cumpliendo con la NOM004-SEMARNAT2002 y la NMX-FF109-SCFI-2007(HUMUS de Lombriz), “pueden ser utilizados para la agricultura o jardinería, como abono, ya que contienen nutrientes valiosos para las plantas y son inofensivos al contacto humano”, Durante el proceso de vermicomposteo existe la principal de la lombriz de tierra y la más utilizada es la *Eisenia fétida* ya que favorece la producción de fertilizantes al vivir sobre el suelo. **(Schuldt, 2008)**

vermicompostaje o lombricultura, este, es un proceso que utiliza el uso de lombrices dirigido a convertir el material orgánico y los agregados de suelos (16) Se inició en EEUU en la década de los 50, se extendió a Europa y finalmente hacia el resto del mundo. En el proceso se aplican diferentes normas y técnicas específicas para la producción, en esta de aconseja el uso de la especie *Eisenia foetida*. **(Díaz, 2002)**

Aproximadamente en el mundo existen 8000 especies de lombrices, de las cuales solo se conoce un 50%, y muy pocas son utilizadas para actividades económicas como la especie *Eisen foetida* (lombriz roja californiana) siendo la más usada para el proceso de Vermicompostaje, debido a que tiene una capacidad extraordinaria de reproducción y permite al lombricultor amortizar el capital invertido en un plazo razonable. **(Almedia, 2007)**

Se pueden usar diferentes sustratos para el desarrollo de la lombriz. El estiércol, ya que funciona como una fuente de microorganismos y promoviendo reducción en el tiempo de maduración del compostaje, favorecer la descomposición de los residuos. **(Campana, 2007).**

Además constituye una opción de bajo costo y accesible un ejemplo de esto es: Santo Angelo Agricultor brasilero comenta lo siguiente “suspendí el uso de abono químico, cuando vi que el humus, además de ser natural, presenta un costo menor de producción, porque la materia prima se da en abundancia” **(Renato, 2003).**

El objetivo es lograr que los individuos de *E. fétida* puedan desarrollarse y transformar los residuos en algunos casos se realizan cambios en la estructura para que los individuos pasen de una cama a otra cama a medida que consuma el alimento. En la tabla 7 se muestra la producción de *E. fétida*. **(Díaz. E. 2002)**

La especie *E. fétida* o lombriz Roja Californiana es la más utilizada en Colombia. La temperatura optima es de 25 °C, pero si esta temperatura fue precedida de un período de crecimiento normal a 25-28 °C durante un mes o más el desarrollo puede continuar a 32 °C.

La temperatura crítica a la cual se produce su muerte es de 33,3 °C, El contenido de humedad óptimo de estas especies es del 80-85%. (**Dominguez, 2010**)

En condiciones óptimas su ciclo de vida es de 45 a 51 días, Los juveniles alcanzan la madurez en 21-30 días. Las cópulas ocurren cerca de la superficie y la puesta comienza en torno a las 48 h después de la cópula. La tasa de producción es de 0,35-0,5 capullos por día. La viabilidad de eclosión es del 72-82%, y el tiempo de incubación oscila entre 18 y 26 días. El número de descendientes por capullo varía entre 2,5-3,8 dependiendo de la temperatura. La máxima esperanza de vida se sitúa en 4,5-5 años. (**Díaz, 2002**)

**Tabla 13. Producción de la E. fétida.**

<b>0 MESES</b>	<b>A LOS 3 MESES</b>	<b>A LOS 6 MESES</b>	<b>A LOS 9 MESES</b>	<b>A LOS 12 MESES</b>
<b>Población inicial de lombrices</b>	<b>1° generación</b>	<b>2° generación</b>	<b>3° generación</b>	<b>4° generación</b>
1000	10.000	100.000	1.000.000	10.000.000
Lombrices 1 kg	10	100	1000	10.000
Alimento 1 kg/día	10	100	1000	10.000
Lombricompuesto 0.6 kg/día	6	60	600	6.000
Proteína 0.04 kg/día	0.4	4	40	400

**Fuente: (Díaz, 2002)**

La *E. fétida* no es la única especie de lombriz, pertenece al grupo de los anélidos en el cual existen más de 8000 especies de invertebrados en forma de gusanos con segmentación bien desarrollada. Las tres grandes clases de anélidos son:

### **2.1.9. Clases de anélidos.**

#### **2.1.9.1 Hirudíneos.**

Se conocen popularmente como sanguijuelas y la mayoría vive en entornos de agua salada. Son depredadores de invertebrados menores que ellos, aunque algunas especies se alimentan de la sangre de los vertebrados.

Las sanguijuelas se encuentran predominantemente en hábitat dulciacuícolas, pero unas pocas son marinas y algunas incluso se han adaptado a la vida en lugares terrestres cálidos y húmedos.

Las sanguijuelas tienen un número fijo de segmentos y por lo general son aplanadas, han perdido las sedas. Lo septos han desaparecido en todas las especies y la cavidad celomática está ocupada por tejido conjuntivo y un sistema de espacios llamados lagunas.

El soporte del cuerpo en las sanguijuelas está proporcionado por la estructura más o menos maciza del cuerpo, el tejido conjuntivo fibroso y los paquetes musculares incluidos en él, y por las características hidrostáticas de los canales celomáticos. Estos animales pueden desplazarse mediante movimientos o volteretas para lo cual fijan primero una ventosa y llevan el cuerpo hacia arriba y luego fijan la otra, poseen musculatura para realizar estos movimientos. (Gil, 2016).

#### **2.1.9.2 Poliquetos.**

La clase Poliquetos son el grupo de anélidos más numerosos con más de 10000 especies descritas. La mayoría de ellos son marinos y una de sus características más llamativas es que en cada segmento incluyen dos paradios con múltiples quetas, lo que da nombre a esta clase. La mayoría de ellos son carnívoros y viven en fondos arenosos, mientras que otros se alimentan de ciertos sedimentos, un ejemplo tipo es el ya mencionado con anterioridad, el gusano árbol de navidad, *Spirobranchus giganteus*. (Gil, 2016).

#### **2.1.9.3 Oligoquetos**

Hay más de 3.000 especies encontrándose en una gran variedad de hábitat. La mayoría son formas terrestres o dulciacuícolas. Los oligoquetos llevan sedas casi sin excepción, pueden ser de diversas formas.

Las Lombrices de tierra son las más familiares, viven en suelos ricos y húmedos. Miden de 12 a 30 centímetro pero las tropicales pueden llegar a medir 4 metros y tener unos 250 segmentos. Generalmente viven en túneles ramificados. (Díaz, 2002).

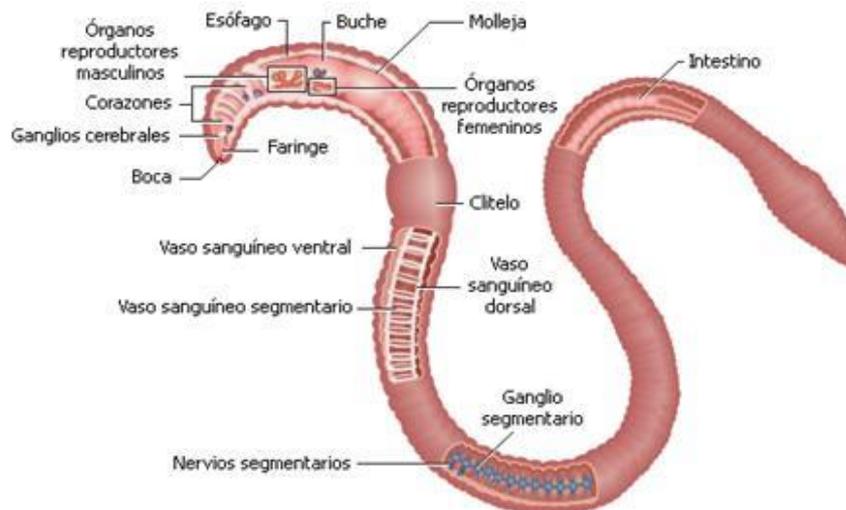
#### **2.1.9.4 Anatomía de la *Eisenia fétida*.**

La lombriz de tierra es un organismo biológicamente simple, siendo el agua su principal constituyente (80 a 90 %) de su peso total. Tiene diferentes colores variando de pálidos, rosados, negros, marrones y rojos intensos con franjas amarillentas entre los segmentos, su forma es cilíndrica con secciones cuadrangulares, el tamaño varía de acuerdo a las especies de 5 a 30 cm de largo y su diámetro oscila entre 5 a 25 mm el número de segmento es de acuerdo a la especie, variando de 80 a 175 anillos. (Díaz, 2002).

Si nos centramos en nuestra amiga la californiana o roja por su color, su taxonomía es la siguiente:

Reino: Animal Phylum: Annelida Clase: Oligoqueta

Familia: Lumbricidae Género: Eisenia Especie: Fétida



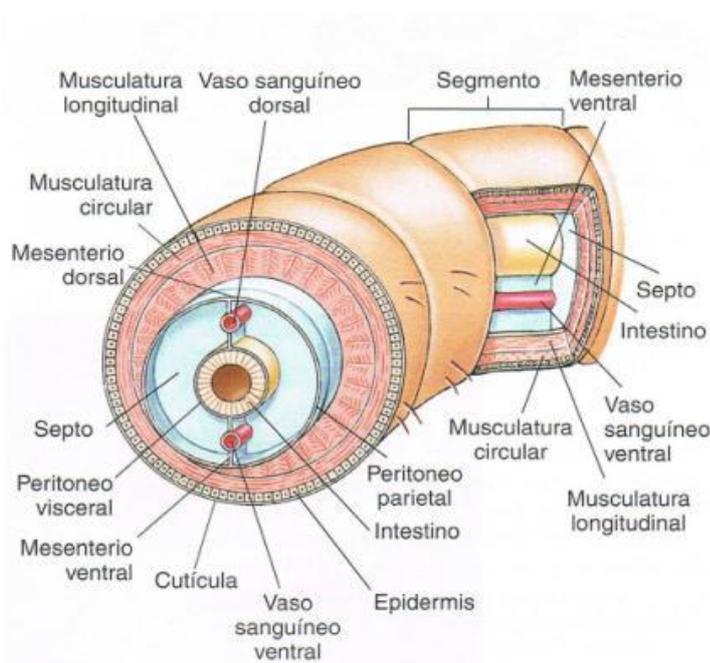
**Figura 2. Anatomía de la lombriz. Eisenia Fétida**

**Fuente: Hickman, 2009**

Como hemos comentado, la lombriz de tierra vive normalmente en climas templados. Su temperatura corporal oscila entre los 19-20°C. Centrándonos en la Eisenia Fétida, es de color rojo oscuro, y su cuerpo, como el resto de lombrices de tierra, está “metamerizado”, es decir, dividido en anillos o metámeros, que son apreciables a simple vista. Mide entre 8-10 cm de longitud, y unos 3-5 mm de diámetro. (Hickman, 2009).

### 2.1.9.5 Forma y función

En el extremo anterior se encuentra la boca que posee un prostómio carnoso que la cubre y en el extremo posterior se encuentra el ano. Cada segmento metamérico lleva cuatro pares de sedas quitinosas aunque pueden ser hasta 100. Tiene unos músculos diminutos que son los encargados de mover las sedas. Salen al exterior por unos pequeños poros en la cutícula. Participan en la locomoción y excavación, en donde las sedas fijan una parte del cuerpo para impedir su desplazamiento. Se desplaza con movimientos peristálticos, las contracciones de los músculos circulares del extremo anterior alargan el cuerpo y empujan dicha región hacia delante, donde es fijada al sustrato por la sedas, luego las contracciones de músculos longitudinales acortan el cuerpo y así se mueve gradualmente hacia delante. (Hickman, 2009).



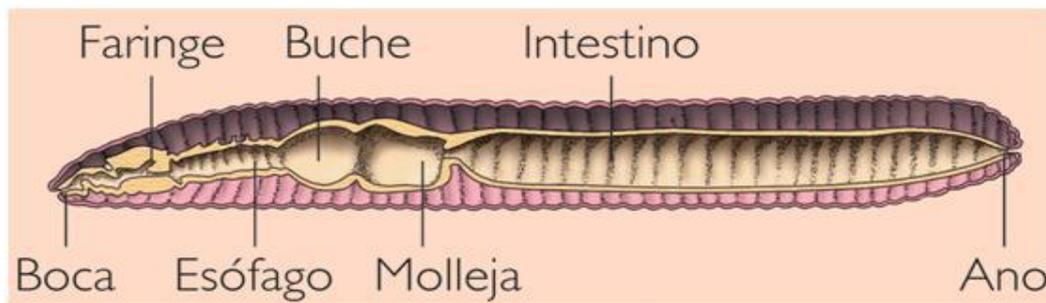
**Figura 3. Modelo corporal de un anélido**

**Fuente: Hickman, 2009**

### 2.1.9.6 Nutrición

La mayoría de oligoquetos son detritívoros (basureros). El alimento de las lombrices de tierra está constituido por materia orgánica en descomposición, que son mezclados con secreciones bucales y engullidas por la acción ductora de la faringe. El prostomio, con forma de labio, contribuye a la colocación del alimento. En el esófago tiene glándulas calcíferas que son las encargadas de reducir la concentración de calcio en sangre. Se produce un almacenamiento temporal del alimento en el buche, luego se desmenuza el

alimento en la molleja. En el intestino se lleva a cabo la digestión y absorción de los nutrientes y se realiza mejor gracias al tiflosol. El tejido cloragógeno que rodea al intestino y al tiflosol es un centro de síntesis de glucógeno y grasa, ayudan a la regeneración. Intervienen también en la excreción. (Hickman, 2009).

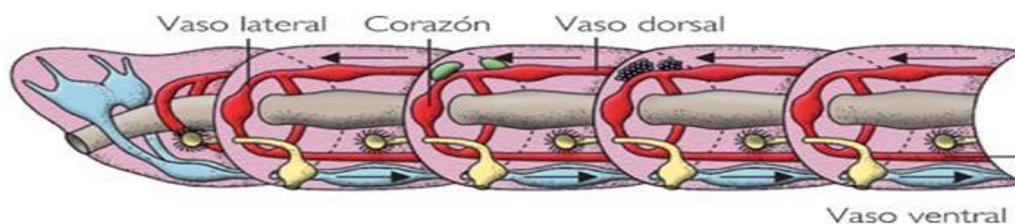


**Figura 4. Aparato digestivo de oligoquetos.**

Fuente: Hickman, 2009

#### 2.1.9.7 Circulación

Tienen dos sistemas de transporte: el líquido celomático y el sistema circulatorio para la sangre. El sistema circulatorio es cerrado, con vasos incluso sistemas capilares presentes en los tejidos. Hay cinco vasos principales que recorren el cuerpo longitudinalmente. Vaso dorsal, recorre longitudinalmente todo el cuerpo, funciona como un corazón. Recibiendo la sangre de los capilares y la impulsando a los arcos aórticos, estos mantienen la presión sanguínea estable en el vaso ventral. Vaso ventral, actúa como una aorta. Recibiendo la sangre de los arcos aórticos y enviándola al cerebro y al resto del cuerpo dando lugar a vasos segmentarios hasta las paredes, nefridios y el tracto digestivo. La sangre contiene hemoglobina. No tienen órganos respiratorios especiales, el intercambio es a través del tegumento húmedo. (Hickman, 2009).

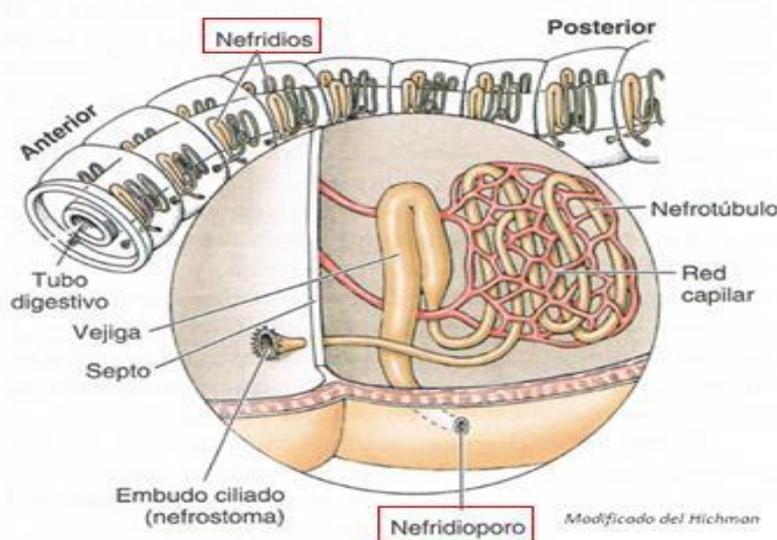


**Figura 5. Aparato circulatorio oligoquetos**

Fuente: Hickman, 2009

### 2.1.9.8 Excreción

Cada segmento metamérico lleva un par de metanefridios. El nefrostoma tiene forma un embudo, está ciliado, que se sitúa delante de la pared que divide a los segmentos, y está dirigido por un túbulo ciliado y dando al nefridioporo, que es un orificio lateral que da al exterior. Los desechos del celoma se dirigen hacia el nefrostoma y al túbulo que se juntan con los desechos que lleva la sangre y se descargan al exterior a través del nefridioporo. Excretan sustancias como amoníaco y urea ambas producidas por las células peritoneales modificadas que cumplen una función análoga de hígado en otros animales denominadas células cloragógenas. (Hickman, 2009).



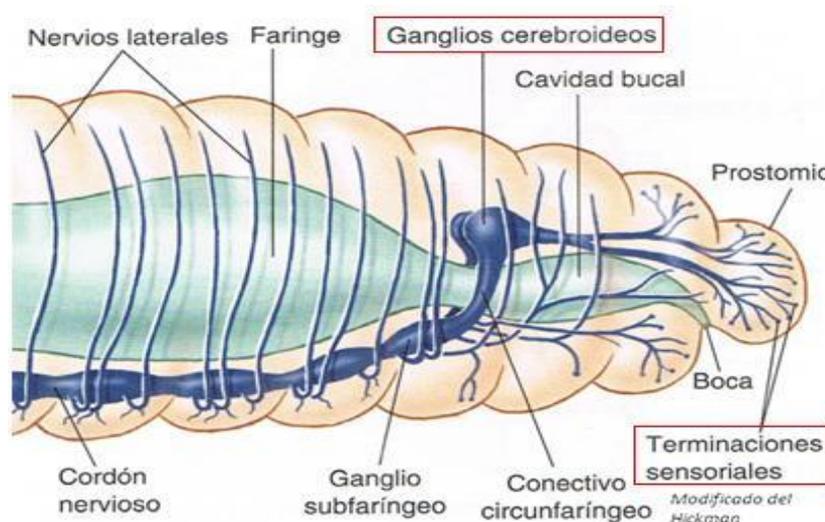
**Figura 6. Aparato excretor de oligoquetos.**

**Fuente: Hickman, 2009**

### 2.1.9.9 Sistema nervioso y órganos de los sentidos.

Consta de un sistema nervioso central y de nervios periféricos. El central refleja el modelo anelidiano típico: un par de ganglios cerebroides (el “cerebro”), los conectores unen el cerebro con los ganglios del cordón nervioso, el nervio ventral atraviesa todo el celoma. Los ganglios cerebroides están unidos a los nervios y estos a las estructuras del cuerpo, que contienen fibras sensoriales y motoras. Las células neurosecretoras tienen función endocrina y secretan neurohormonas relacionadas con la regulación de la reproducción. Tienen unos axones gigantes en el cordón nervioso ventral, su gran diámetro permite la contracción simultánea de músculos en muchos segmentos, por ello son los encargados de hacer posible una huida rápida. Carecen de ojos, pero poseen fotorreceptores lenticulares en la epidermis, tienen fototactismo negativo a la luz intensa y positivo a la

luz débil, es decir se prefiere vivir en lugares oscuros. Poseen órganos sensoriales pequeños unicelulares por toda la epidermis y en el prostomio son más numerosos los quimiorreceptores. En el tegumento muchas terminaciones nerviosas libres probablemente son táctiles. (Hickman, 2009).



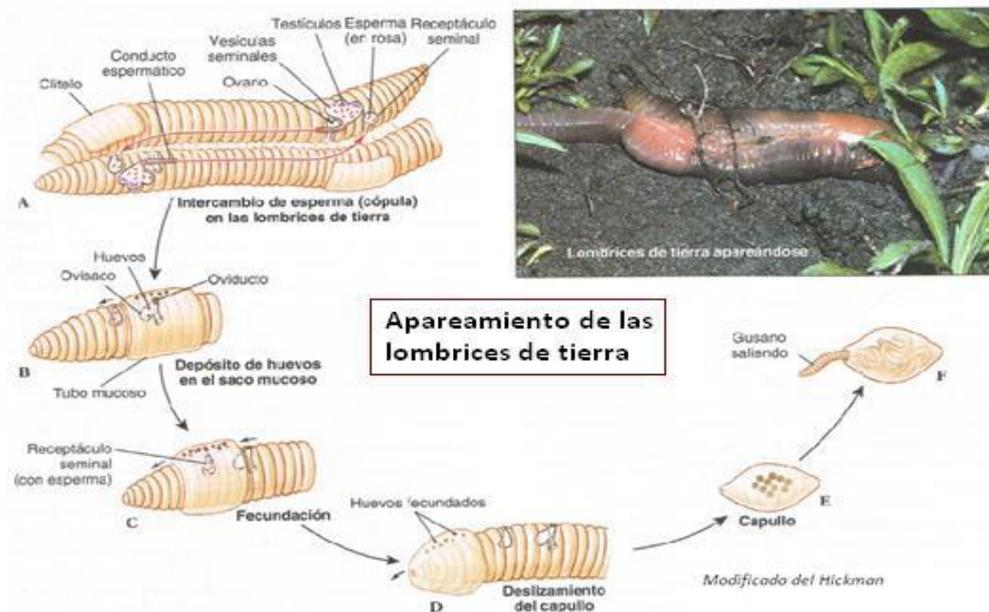
**Figura 7. Sistema nervioso oligoquetos**

**Fuente: Hickman, 2009**

#### 2.1.9.10 Reproducción y desarrollo

Las lombrices son monoicas (hermafroditas). Los órganos reproductores se sitúan en los segmentos 9 al 15. Hay dos pares de pequeños testículos y dos pares de embudos espermáticos rodeados por tres pares de vesículas seminales muy grandes. El espermatozoide está inmaduro en los testículos, pasa a las vesículas seminales allí madura y va a los embudos espermáticos y termina en los poros masculinos situados en el segmento 15 donde serán expulsados durante la cópula. Los pequeños ovarios descargan sus huevos en la cavidad celomática, aquí los recogen los embudos ciliados de los oviductos que los llevan al exterior a través de los poros genitales femeninos del segmento 14. En los segmentos 9 y 10 hay dos pares de receptáculos seminales que reciben y almacenan el espermatozoide que se intercambian durante la cópula. Cuando se aparean los gusanos extienden fuera de sus galerías sus extremos anteriores y se unen por sus respectivas superficies ventrales, se mantienen juntas mediante un moco secretado por el clitelo y por sedas ventrales especiales que penetran en el cuerpo de la pareja. Después de la cópula, cada animal secreta, primero un tubo mucoso y luego una banda quitinoidea dura con la que forma un capullo alrededor de su clitelo. A medida que el capullo avanza hacia delante,

se vierten en él los huevos desde los oviductos y espermia de la pareja. La fecundación se produce en el interior del capullo. (Hickman, 2009).



**Figura 8. Reproducción y desarrollo**

**Fuente: Hickman, 2009**

**2.1.9.11 Factores limitantes más importantes para los cultivos de lombrices.**

**Temperatura:** las lombrices permanecen y se desarrollan en los cultivos si poseen alimento adecuado, y temperaturas óptimas de 15 °C a 30 °C. Conviene medir la temperatura diariamente si se inicia un cultivo y a distintas profundidades. (Schuld, 2007.)

**Capacidad de porte o soporte de cada sustrato/alimento:** este es otro factor importante ya que si la densidad poblacional (lombrices por unidad de superficie o volumen) supera esta capacidad, tarde o temprano emigraran hacia un sitio de mayor capacidad. (Schuld, 2007).

**Humedad:** este factor, es junto con la temperatura, el que determina significativamente el desarrollo y bienestar de la población del cultivo, traduciéndose en un incremento de la misma. La humedad del cultivo conviene que fluctue entre 80-90%. Este valor corresponde a 40-45% del instrumental en uso en el ámbito agronómico (higrómetros), y su determinación en la práctica se efectúa sencillamente presionando un puñado del alimento del lecho. Si al apretarlo ligeramente escurre agua entre los dedos de la mano significa que se ha extendido la humedad en el proceso y simplemente, se suspende.

Contrariamente, si al presionar el lodo y difícilmente escurren unas gotas, la humedad es insuficiente y se requerirá una regulación de agua. (Schuld, 2007).

Potencial de hidrogeno, pH (acidez/ alcalinidad). La mayoría de los materiales orgánicos adecuadamente descompuestos (compostados, normalmente se hallan comprendidos entre pH 5(acido) y pH 9(alcalino) puntos de esta escala donde el valor de pH 7 representa la neutralidad. Mo con estos valore extremos es invadida por las lombrices, evolucionando el pH gradualmente hacia valores cercanos a pH 7 (6.8 a 7.4) y que caracteriza a la mayoría de los lombricompuestos. (Schuld, 2007).

Otros factores (gases). Las lombrices requieren oxígeno. Este gas presente en el aire aproximadamente en un 20%, posiblemente determine la refundida de la *E. fétida* en el sustrato, ya que el dióxido carbónico (anhídrido), aun en concentraciones elevadas, no afecta mayormente a las lombrices. El amoniaco otros compuestos amoniacales gaseosos o solubles en agua pueden causarles daño en concentraciones elevadas. Estos productos son habituales en las fases de descomposición de MO rica en proteínas (cárneos, abundante verdura de hoja y algunos estiércoles de animales con mucha proteína residual).

Las lombrices se alimentan de bacterias, protozoarios, micro algas y hongos que abundan en los estiércoles maduros, si bien cualquier MO con algún grado de compostación puede llegar a albergar y nutrir las lombrices. (Schuld, 2007).

#### **2.1.9.12 Competidores y enemigos de la lombriz.**

A pesar de todos de beneficios que puede proporcionar el proceso de vermicultura, el home es uno de los principales enemigos de la lombriz. En estado silvestre, las dañan con el uso de antiparasitarios, insecticidas y abonos químicos. Incluso cuando se cuenta con criaderos, un manejo incorrecto por parte del lombricultor (por lo general, baja humedad y lechos demasiado ácidos) ocasionan parásitos que afectan la evolución de la especie. Otro tipo de especies que pueden afectar el desempeño de la *E. fétida* son los coleópteros, hormigas, moscas, ácaros, los gasterópodos que compiten con ellas en el consumo del material alimenticio y alteran las condiciones del medio, en este caso, no existen medios eficaces para su control, salvo un buen manejo de las unidades de crianza.

Por otro lado, entre los depredadores directos que afectan la población de la especie se encuentran los ratones, serpientes, pájaros, quilópodo, diplodocos entre otros, que pueden causar serios daños en los criaderos. De igual manera, la plenaria (pequeño gusano de

cuerpo plano, color oscuro y rayas a lo largo del cuerpo) es capaz de disminuir a la especie en unos pocos días ya que es un parásito que se adhiere a la lombriz, absorbiendo sus líquidos corporales, hasta el punto de matarla.

#### **2.1.9.12 Dinámica poblacional de la *Eisenia fétida* en el lodo residual.**

La dinámica poblacional de la lombriz *Eisenia fétida* se evaluará mediante análisis comparativos entre combinaciones de los biosólidos, enfocándose principalmente en el crecimiento de la población de las lombrices así como su contenido de proteínas y grasas. En esta investigación se pretende establecer las condiciones en las cuales se obtendría un desempeño adecuado del anélido (dinámica y capacidad de absorción de metales) a nivel laboratorio primeramente y posteriormente, proponer un proyecto en escala para el tratamiento de aguas residuales en las plantas existentes en el país. **(Rodríguez, 2006).**

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

#### 3.1 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

##### 3.1.1. Generalidades.

La meta de este trabajo experimental para lograr el objetivo general es aplicar el vermicompostaje a los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar-Puno para reducir el contenido de metales pesados como es el Cadmio y Mercurio.

Para alcanzar el primer objetivo específico usaremos pHmetro y una mufla se determina el pH y la humedad en el lodo residual.

Para poder alcanzar el tercer objetivo específico, demostramos la eficiencia del vermicompostaje propuesto para la remoción de metales pesados, se ha visto por conveniente que el mejor método para demostrar que el trabajo experimental es el adecuado se ha tomado un mejor método que es por ICP-AES.

##### 3.1.2. Ámbito de trabajo

Los afluentes residuales provenientes de la ciudad de Puno son conducidos a través de la red de alcantarillado a un sistema de tratamiento conformado por Lagunas de Estabilización, dispuestos en serie (Primaria y Secundaria) el sistema es denominado:

##### **Lagunas de Estabilización “El Espinar”.**

Las lagunas fueron construidas en el año 1972 cuando la ciudad de Puno contaba con 30,000 habitantes, y se ubica en el extremo sur de la ciudad de Puno, entre la Isla Espinar y los Barrios de Chanu-Chanu frente al cuartel Manco Cápac a una altura de 3810 m.s.n.m. al inicio de la puesta en marcha en el año 1972, las lagunas trataban entre el 40 al 45 por ciento de las aguas servidas de la ciudad de Puno.

En este proyecto se realizará el tratamiento de metales pesados en la laguna de estabilización secundaria. En las figuras 9 y 10 se muestran una vista superior de la

Laguna El Espinar, los cuales provocan contaminación a los mantos freáticos, a la atmosfera, suelos y consecuentemente al ser humano.



**Figura 9. Lagunas de estabilización el Espinar.**

**Fuente: Propia.**



**Figura 10. Laguna de Estabilización Secundaria**

**Fuente: Propia.**

#### **3.1.2.1. Laguna de Estabilización Secundaria.**

Tiene un área de 7.90 Has., con una profundidad promedio de 2 m y un volumen útil de 118,350 m<sup>3</sup> el periodo de retención es de 12.40 días, para una temperatura de 12.5 a 15.0° C. Operacionalmente esta misma funciona como Laguna de maduración, no cuenta con ningún sistema de aireación.

Estructuralmente las Lagunas cuentan con fondos de material de tierra compactada, los cuales alojan los lodos residuales, los mismos actualmente al no ser distribuidos y/o

removidos uniformemente ocasionan menos de eutrofización de gases y patógenos en general.

Actualmente ambas lagunas ya no trabajan de acuerdo al diseño y propósito establecido, por la excesiva carga orgánica que viene recibiendo y tratando, haciendo que su eficiencia de remoción sea bajo respecto a ciertos parámetros dentro del principio de funcionamiento de lagunas de estabilización, lo cual ha ocasionado problemas como: malos olores (Gases de metano y otros), exceso de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo), y principalmente sobresaturación de agentes patógenos (Bacterias de origen Termo tolerantes y otros), en especial problemas que se dan en mayor porcentaje en la primera laguna que en la segunda, en muchos casos se llegan a sobrepasar los Límites Máximo Permisibles (LMP), establecidos por las Normativas, en especial la del D.S. N° 003-2010-MINAM y las de origen Internacional dadas por ejemplo por la Agencia de Protección Ambiental – EE.UU (EPA).

### **3.1.3 Descripción de la metodología.**

Análisis de Lodos residuales. En esta etapa los lodos fueron muestreados directamente de la laguna de estabilización secundaria El Espinar, se hizo una serie de análisis físico-químico, microbiológicos y una caracterización inicial del contenido de metales.

Luego se colocaran 5 lombrices adultas y durante un periodo de 90 días se evaluó la temperatura, pH, biomasa, reproducción de lombrices, capullos, mortandad, así como la capacidad de remoción de los metales Cobre, Cadmio, Níquel, Mercurio, Plomo. (Sánchez, 2009)

#### **3.1.3.1 Técnica de muestreo en lodos residuales.**

El método que se utilizó para obtener muestras representativas de los lodos residuales de la laguna de estabilización secundaria El Espinar para el desarrollo experimental, así como en el análisis microbiológico y análisis de metales será el que fue establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Esta norma nos indica que los recipientes para los muestreos de lodos residuales deberán ser de polietileno o polipropileno inerte, se utilizaron dos recipientes de 2000 ml cada uno. Los recipientes fueron sometidos a limpieza con jabón-agua, potable-agua destilada. Luego de muestrear el lodo se etiquetó y se mantuvo a una temperatura de 4°C hasta su análisis. (Sánchez, 2009).

### **3.1.4 Elaboración de los tratamientos y diseño experimental.**

Los diseños de experimentos se analizaron con diferentes parámetros a controlar y la reproductividad de los experimentos con el fin de obtener datos confiables.

Para el análisis de lodos se realizó cuatro replicas, estas replicas nos permitió reducir errores y en un sistema biológico la cantidad de repicas reportadas son un intervalo 3-7.

El diseño de experimentos consistió en un diseño de bloques completamente al azar, el cual consiste en que los tratamientos se asignan aleatoriamente a un grupo de unidades experimentales denominado bloque o repetición. Este tipo de análisis experimental se utiliza en donde las unidades experimentales pueden agruparse en bloques relativamente homogéneos (lo cual es adecuado para este proyecto), de manera tal que las diferencias observadas entre unidades sean primordialmente debidas a los tratamientos.

El análisis del contenido de metales, la evolución de la dinámica poblacional de la especie así como el control de los parámetros fisicoquímicos (pH, humedad, temperatura) se analizó durante los días 30, 50,70 y 90 días respectivamente.

Las condiciones de humedad y temperatura fueron determinadas en las tasas de reproducción, crecimiento y desarrollo. Con respecto a esta variable, algunas investigaciones han demostrado que el peso individual de la E. Fétida disminuye cuando utiliza energía en la reproducción. El peso de la lombriz adulta es de casi un gramo bajo condiciones naturales, presenta un crecimiento lineal a través del tiempo llegando a estabilizarse a partir de la semana número 24 de vida. (Sánchez, 2009).

**3.1.5 Temperatura.** La temperatura se midió directamente colocando un termómetro con una escala de 100°C, se dejó por un periodo de 1 minuto en cada muestra.

Durante los 90 días se registró este parámetro, este parámetro se realizó bajo la técnica utilizada en suelos. (Sánchez, 2009)

**3.1.6 Potencial de hidrogeno (pH).** El pH se midió en base a la norma NMX-AA-25-1984, primero se pesó una muestra de 1.0 g y en un vaso de precipitado, se le agregó 10 ml de agua destilada, se agitó durante 10 min, luego se determinó el pH sumergiendo en la mezcla el pH metro.

**3.1.7 Porciento de humedad.** Este parámetro se controló agregando una cantidad de agua cada tercer día al mismo tiempo que se realizó el proceso de aireación.

El control de este parámetro es necesario ya que debido a que un porcentaje mayor a 90% de humedad causa la mortandad de la especie.

Para determinar la humedad en cada una de las muestras e cada cama se realizó según la norma NMX-AA-016-1984.

**3.1.8 Aireación.** Es un factor importante, ya que si no se mantiene una buena aireación el proceso cambiara de aeróbico a anaeróbico, generándose productos distintos y con ellos daño a las lombrices. La aireación se realizó cada quinto día, ya que el clima de esta región es frígido y los días que hizo vientos provocaron que las camas pierdan humedad en menos tiempo, los volteos favorecerían en la distribución de los metales y así se lograría una homogeneidad.

### **3.1.9 Preparación de muestras.**

La preparación de las muestras para los análisis de metales y fisicoquímicos durante la experimentación en los días previamente mencionados se realizó de la siguiente manera:

- 1.- Se mezclaron las camas para obtener un sustrato uniforme y pesar 10g.
- 2.- Se determinó el porcentaje de humedad.
- 3.- Se colocó la muestra deshidratada en un mortero de porcelana hasta obtener una molienda uniforme.
- 4.- Se pasó por una malla de 1.00 mm la muestra triturada, se colocó en un recipiente previamente lavado y se preservó a temperatura ambiente, hasta su análisis. **(Sánchez, 2009)**

### **3.1.10 Evaluación de dinámica poblacional.**

Los parámetros que se evaluaron en este apartado fueron: el peso en gramos de las lombrices jóvenes y adultas (biomasa), el conteo de capullos, se registró la mortandad y reproducción.

Para nuestros análisis se aisló las lombrices y los capullos de las camas, se realizó el conteo de manera manual luego fueron pesados, para determinar el impacto en la biomasa por presencia de metales pesados y relación de lodo en cada uno de los tratamientos. La biomasa total se asumió como la suma de las lombrices jóvenes y adultas. **(Sánchez, 2009)**

### 3.1.11 Análisis de metales.

Para determinar el contenido de metales pesados en las muestras se utilizó la técnica de análisis por ICP-AES.

### 3.1.12 Análisis del método ICP-AES.

En este método, el cual es un gas en el que hay átomos presentes en estado ionizado. La alineación básica del ICP consiste en 3 tubos, que son el loop extremo intermedio y el loop interno, forman lo que es la antorcha del ICP. Esta formación es dependiente hacia la fuerza de un campo magnético adecuado, y el patrón característico de las corrientes de gas que llevan y forman un patrón rotacional simétrico. El plasma se mantiene gracias al calor inductivo de los gases a corriente. El conductor es calentado por una resistencia óhmica.

La técnica de Espectroscopia de emisión atómica es un método que describe el procedimiento para la determinación y concentración de metales y sus compuestos iónicos procedentes de especies solubles y/o insolubles en un intervalo de concentración. Es el análisis químico que utiliza la intensidad de la luz emitida desde una llama o plasma en una longitud de onda particular para determinar la cantidad de un elemento en una muestra. La longitud de onda de la línea espectral atómica da la identidad del elemento, mientras que la intensidad es proporcional a la cantidad de átomos del elemento.

## 3.3. Materiales y equipos a ser utilizados.

Para cumplir con los objetivos planteados se propuso la siguiente metodología experimental.

### 3.3.1. Materiales.

**3.3.1.1. Material biológico.** La lombriz *Eisenia fétida*. Es el invertebrado utilizado en esta investigación (figura 10), los cuales fueron adquiridos en el centro poblado de Jayllihuaya – Puno.



**Figura 11. Lombriz Eisenia Fétida**

El alimento utilizado para su mantenimiento y crecimiento fue el lodo residual con previo tratamiento térmico de la laguna estabilización secundaria.

**3.3.1.2. Lodo residual.** Los muestreos que se realizaron para esta investigación fue: se tomaron muestras de lodo residual de la laguna de estabilización secundaria El Espinar Puno en cuatro partes, el cual también servirá como alimento y crecimiento de la lombriz *E. fétida*.

### 3.3.2. Pruebas estadísticas.

El análisis estadístico que se realizó fue con el peso del producto final del vermicomposteo expresando todas las concentraciones en partes por millón (ppm, mg/kg), utilizando el análisis de varianza (ANOVA) para establecer si al menos uno de los tratamiento que realizaremos será significativo o al menos nos dé un nivel de confianza de un 95%.

### 3.3.3. Equipos y reactivos.

**Tabla 14 . Equipos y Reactivos.**

Equipos	Reactivos
Mufla	Ácido nítrico
Vasos de precipitado	Ácido clorhídrico
pH metro	Agua destilada
Papel filtrante	Malla de 1.00 mm
Termómetro	
Matraces volumétricos	
Mortero de porcelana	
Recipientes de plásticos	

### 3.3.4 Operacionalización de variables.

**Tabla 15. Variables.**

<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>ÍNDICES (ESCALAS)</b>
<b>Variable independiente:</b> - pH - Humedad	Acidez o basicidad Cantidad de agua	0-14 de pH % humedad
<b>Variable dependiente:</b> - Vermicompostaje (Reducción de metales)	Metales pesados	mg/kg
<b>Variable interviniente:</b> - Temperatura	T° Lodo residual	°C

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

#### 4.1 RESULTADOS Y DISCUSION

##### 4.1.1 Presentación

En este capítulo se presentan los resultados y análisis obtenidos durante el desarrollo de esta investigación. La presentación de los mismos estará dividido en dos partes:

- 1) Evaluación de la dinámica poblacional de la lombriz *Eisenia Fétida*
- 2) Evaluación de los metales pesados en lodos residuales.

#### EVALUACION DE LA DINAMICA POBLACIONAL DE LA LOMBRIZ EISENIA FETIDA

M-1: 100% lodo residual

M-2: 100% lodo residual

M-3: 100% lodo residual

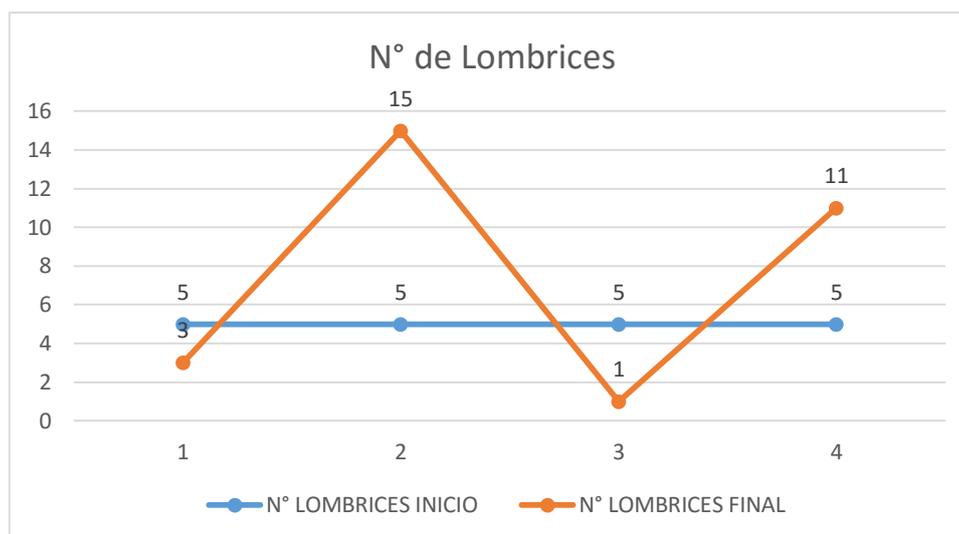
M-4: 100% lodo residual

El ensayo experimental de metales tuvo buenos resultados en el caso de dinámica poblacional fueron los que se esperaba.

##### 4.1.2. Resultados

###### 4.1.2.1 Reproducción de las lombrices

La cantidad de lombrices en cada muestra para el lodo residual fueron 5 y las lombrices fueron adultas, al término de los 90 días la población del anélido se incrementó en casi todas las unidades, excepto para la muestra 3, en el cual se observó una disminución en función del tiempo de evaluación, por ejemplo se puede mencionar una disminución del 35% en el día 30, mientras que al finalizar el periodo de evaluación el día 90 hubo una lombriz el resto no sobrevivieron al tratamiento aplicado.



**Figura 12. Reproducción de lombrices**

**Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 12 nos muestra que la mayor reproducción de lombrices evaluadas son las muestras M-2 seguido de la M-4, lo cual se refleja un incremento en un promedio de M-2: 15 lombrices, M-4: 11 lombrices, respectivamente. Este incremento se debe al tratamiento del lodo ya que antes de ser integradas las lombrices el lodo paso por un proceso isotérmico para que así pueda disminuir el contenido de la E-coli (estiércol), en la muestra 1 M-1: 3 lombrices, se observaron niveles de adaptación casi nula ya que en el día 30 hubo una reducción del 30% y al finalizar en el día 90 la reducción fue del 97%, respectivamente.

Por su parte, la mayor reproducción de lombrices en las relaciones evaluadas son los tratamientos o muestras M-2 seguidas de M-4, lo cual se refleja un incremento. Este incremento se debe principalmente al tratamiento térmico que se le dio al lodo residual antes de agregarle las lombrices.

El comportamiento observado durante esta evaluación se puede explicar en términos de la materia orgánica. La materia orgánica representa uno de los aportes benéficos para un buen desarrollo y crecimiento del anélido, ya que su presencia contrarresta los efectos nocivos de la salinidad, además de incrementar la actividad de los microorganismos para el desarrollo del vermicomposteo dando como resultado una correcta mineralización de los nutrimentos del sustrato, mismos que posteriormente pueden aprovecharse como abono en las plantas y mejorar algunas características físicas de los suelos como la retención del agua, entre otras características. Algunos autores han demostrado que la materia orgánica es un indicador de la capacidad nutrimental de un suelo, por lo que entre

mayor sea el contenido de este material, mayor será la fertilidad de subsuelo. (Cardoso V., 2004).

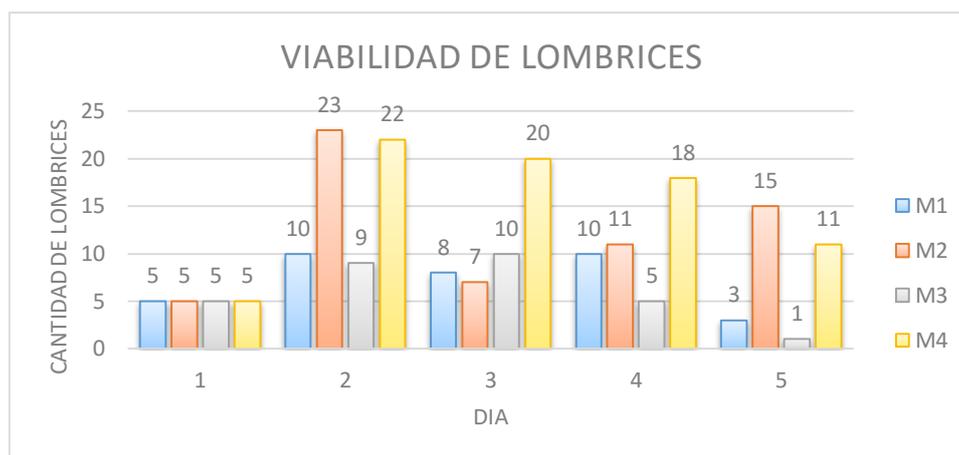
Así mismo, tal contenido controla la toxicidad de los metales pesados, formando quelatos, compuestos muy estables y capaces de encapsular a los metales para su eventual eliminación. Por esta razón, las variaciones de densidad poblacional son directamente atribuidas al contenido de materia orgánica que se encuentra presente en el sustrato, de aquí que cuando se comparan los demás tratamientos con la muestra de referencia, los valores de la dinámica poblacional son siempre inferiores, como se muestra en la figura. Sin embargo, aunque parece obvio que una mayor relación de materia orgánica conduce a una mayor dinámica poblacional esta tendencia no siempre es lineal, razón por la cual se propusieron estos tratamientos.

**Tabla 16. E. Fétida en relación al 100% de lodo residual.**

Número de individuos				
Días	M1 (100% lodo)	M2 (100% lodo)	M3 (100% lodo)	M4 (100% lodo)
1	5.00±0.00	5.00±0.00	5.00±0.00	5.00±0.00
30	5.00±0.5	5.00±0.22	5.00±0.6	5.00±0.23
50	5.00±0.63	5.00±0.71	5.00±0.5	5.00±0.25
70	5.00±0.5	5.00±0.5	5.00±0.45	5.00±0.28
90	5.00±1.7	5.00±0.3	5.00±5	5.00±0.45

**Fuente: Elaboración propia.**

La Tabla 16 muestra la adaptación de la lombriz con los diferentes tratamientos, observándose un descenso drástico en el número de lombrices en el sustrato, estadísticamente, el efecto del contenido de lodo residual en las muestras es muy determinante para la adaptación de los anélidos en cada una de las muestras, cada muestra tuvo un contenido del 100% de lodo residual, en cada muestra se determinó como significativo ( $p < 0.05$ ). Por ejemplo, para las muestras M-2 y M-4, hay una adaptación de la especie de un 90%, mientras las otras muestras tuvieron una adaptación de un 50 a 60%, ya que el lodo residual sufrió una etapa de secado térmico para así deshacernos de algunas bacterias presentes en el lodo y también nos ayude en la reducción del pH ya que el lodo residual tiene un pH ácido.



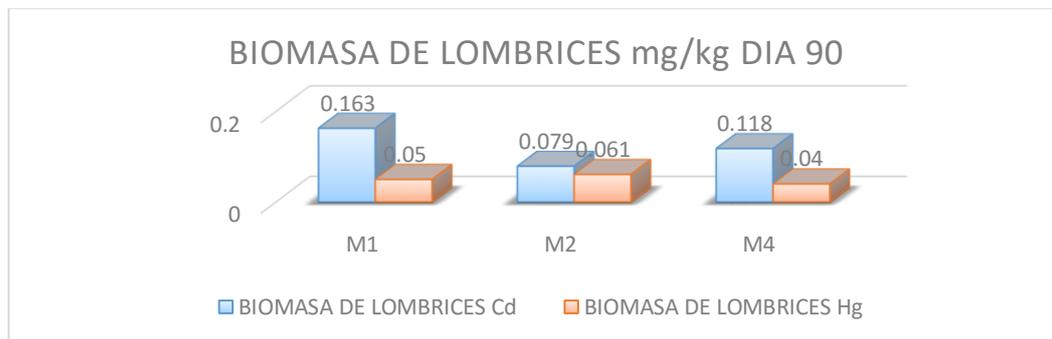
**Figura 13. Viabilidad de las lombrices adultas de lodos residuales (ver anexo n°2)**

**Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 13 se representa la viabilidad de las lombrices para las muestras de lodos, se observa que en las muestras M-2 y M-4 los únicos en alcanzar el 100% de supervivencia de la lombriz *Eisenia fétida*. Este parámetro va muy relacionado con la reproducción de lombrices, entre mayor es la relación de lodo, es menor la supervivencia de la lombriz y consecuentemente su densidad poblacional.

Como se mencionó anteriormente, la mortalidad de la lombriz fue mayor en las muestras M-1 y M-3, en la literatura se reporta que una mayor concentración de lodos afecta la tasa de supervivencia de las lombrices *E. fétida* en las muestras de lodos. El caso de las muestras M-1 y M-3, durante los primeros ocho días de evaluación, se observó un deceso en función del contenido del lodo y posteriormente, en las muestras M-2 y M-4 las lombrices tuvieron una buena adaptación al lodo residual, en las M-1 y M-3 las lombrices no se adaptaron y continuaron muriendo durante el periodo de la experimentación, estos decesos fueron por el cambio de clima ya que en esta ciudad el clima cambia bruscamente, y en esta etapa de la experimentación paso de la temporada de lluvia a la temporada de la helada en donde la temperatura llega hasta los  $-6^{\circ}\text{C}$  y por esta razón pierde humedad.

#### 4.1.2.2 Biomasa de lombrices.

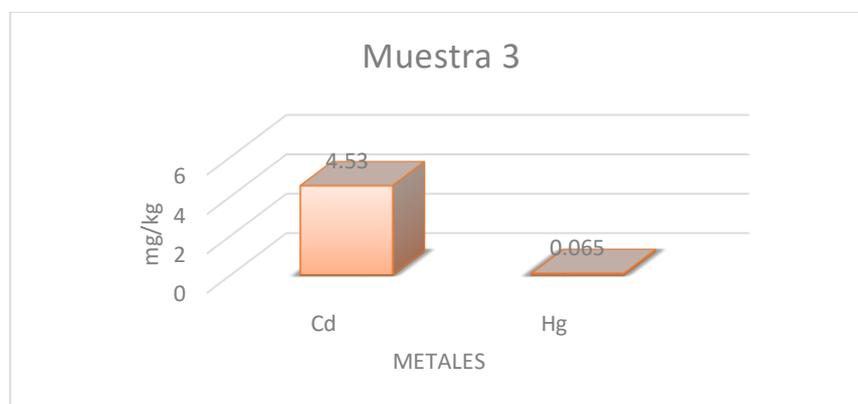


**Figura 14. Biomasa de lombrices.**

**Fuente: Elaboración propia.**

En la figura 14 observamos la biomasa total de las muestras, se encontró que los mayores registros de biomasa correspondieron a las muestras con mayores densidades poblacionales. Así mismo, se observó que mayores densidades poblacionales generan una mayor cantidad de biomasa, por lo que es de esperarse que una adaptación adecuada en conjunto la reproducción de la especie representara una mayor cantidad de biomasa.

Además, existen diferencias significativas entre las distintas muestras durante todo el periodo evaluado.



**Figura 15. Cantidad de metales en el lodo residual en la muestra 3.**

**Fuente: Elaboración propia.**

En la figura 15 podemos observar que al finalizar los 90 días, se encontró que la biomasa total de las lombrices en la muestra M-3, disminuyó en comparación con las demás muestras por lo tanto se hizo el análisis del lodo ya que solo hubo una lombriz sobreviviente, la cantidad de cadmio que se encontró fue de 4.53 mg/Kg y de mercurio 0.065 mg/Kg respectivamente.

#### 4.1.3 Análisis estadístico de la dinámica poblacional.

La prueba del análisis de varianza de media regresión lineal para los parámetros de la biomasa y remoción de metales, nos indica que al menos uno de los tratamientos, tanto para la primera y segunda etapa, fue diferente en relación al porcentaje de lodo.

En la Tabla se resumen los datos de desviación estándar de los valores finales de los parámetros del vermicomposteo, los cuales se sometieron a una serie de análisis estadísticos en donde se utilizó la prueba de Regresión lineal para establecer si existe diferencias significativas de medias poblacionales entre las muestras, toda las muestras tienen un 100% de lodo residual.

En la prueba de Regresión lineal, las muestras M-1 y M-3, presentaron diferencias significativas con el tratamiento de control.

En las pruebas que se empleó en el análisis estadístico que fue la prueba de Regresión lineal. Se encontró que entre M-2 y M-4 no muestran diferencias significativas, incluso en el último caso los valores presentados son estadísticamente iguales, esto indica que la varianza de los parámetros analizados no afecta de manera importante la dinámica poblacional de la especie en evaluación, sin embargo, una comparación entre los tratamientos si muestra una diferencia significativa.

Para comprobar los resultados anteriores, los resultados se evaluaron por el método Regresión lineal. Después comprobando que en las muestras M-2 y M-4, no presentan diferencias significativas observados en la comparación de otras muestras M-1 y M-3, se pueden correlacionar con la disponibilidad de nutrientes como la materia orgánica, relación C: N ya que regulan los parámetros de crecimiento de las lombrices durante el vermicomposteo. Adicionalmente, es necesario comentar que los microorganismos, tienen un papel importante en la dieta de la lombriz, afectando la calidad de materia orgánica, ya que intervienen en el proceso de envejecimiento de la materia orgánica. De esta manera concluir que la creciente proporción de los lodos residuales, inhibe el crecimiento de las lombrices de tierra inoculados, posiblemente debido a la mayor disponibilidad de sustancias para inhibir su crecimiento (es decir, metales, detergentes, grasa, etc.) en los sustratos. Este crecimiento retarda la sustancia que afecta directamente a la disponibilidad de alimentos, así como en la biomasa microbiana del sustrato. **(Suthar, S. 2009).**

La dinámica poblacional descrita en este apartado, se relaciona directamente con los siguientes parámetros:

Temperatura. Dado que el ensayo se realizó en época de temperaturas bajas  $-6^{\circ}\text{C}$  y los valores deseables para la E. fétida oscila entre los  $19^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$ . (Temperaturas superiores o menores a este valor afectan la dinámica poblacional de esta especie). (**Hernández, J. 2003**).

#### 4.1.4 Temperatura.

Se controló con el siguiente sistema el día 0 o día del muestreo, día 1, día 30 día 50 día 70 y día 90, en cada análisis que se le realizó con aspersiones de agua, a fin de asegurarse que la temperatura no fuera adecuado para un buen desarrollo de las lombrices.

En la siguiente tabla 4.3, se puede apreciar la temperatura promedio y desviación estándar de cada muestra al inicio del experimento para la primera etapa de evaluación. Comparando las temperaturas iniciales y finales, se puede observar que existe una disminución en las muestras M-2, M-3 y M-4 atribuible a la actividad microbológica del lodo durante el proceso.

Durante los 90 días de vermicomposteo tuvo lugar una serie de pequeñas elevaciones y descensos de temperatura, siempre por encima de los  $2^{\circ}\text{C}$  y debajo de los  $17^{\circ}\text{C}$ . Aunque diversas investigaciones han reportado una afectación en el crecimiento de estos anélidos a temperaturas superiores a  $30^{\circ}\text{C}$ , en este caso no afecto en su crecimiento ya que la temperatura máxima en la temporada que se realizó el experimento llego máximo a  $17^{\circ}\text{C}$ , en este caso a falta de humedad es que se da el descenso de las lombrices ya que el clima es seco.

**Tabla 17. Temperatura durante 90 días de la experimentación.**

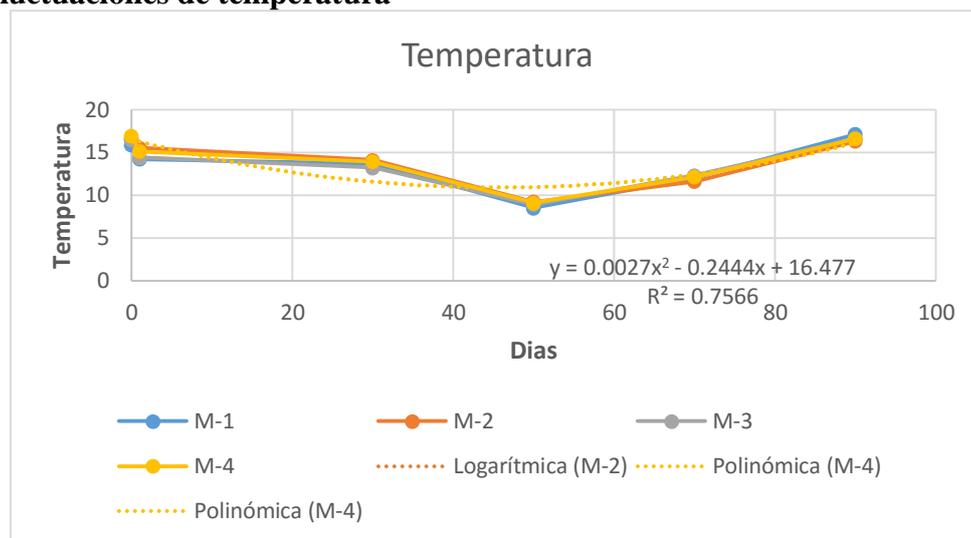
TEMPERATURA $^{\circ}\text{C}$				
Días	M-1	M-2	M-3	M-4
0	15.86	16.63	16.47	16.92
1	14.2	15.5	14.4	15.1
30	13.7	14.1	13.2	13.9
50	8.5	9.2	8.9	9.1
70	12	11.6	12.3	12.1
90	17.1	16.3	16.6	16.6
Promedio	13.6	13.9	13.6	14.0

**Fuente: Elaboración propia.**

En la tabla 17 se muestra las temperaturas desde el día del muestreo, se observa que hubo variaciones durante el proceso de la realización del experimento, como ya mencionamos este proyecto se realizó durante 90 días y cómo podemos observar hubo un drástico descenso de temperatura a partir del día 50 ya que era época de helada en esta región, lo cual provoco la mortandad de las lombrices.

Las variaciones observadas, pueden estar relacionadas con la cantidad de materia orgánica que es inicialmente atacada por microorganismos (termófilos y aerobios) que intervienen en el proceso de descomposición del sustrato, la temperatura. Posteriormente, a través del mecanismo de aireación del sustrato, la temperatura tiende a disminuir, finalmente el producto comienza la fase de maduración estabilizando la temperatura. Evidentemente, en el caso de temperaturas extremas, estas influirán en la dinámica poblacional como se ha reportado por varios autores. (Schuldt, 2008.)

#### 4.1.5 Fluctuaciones de temperatura



**Figura 16. Fluctuaciones de temperatura.**

**Fuente: Elaboración propia.**

La figura 16 muestra el comportamiento de la temperatura durante el desarrollo del experimento (90 días) en el lodo, en esta grafica se observa una ligera disminución de la temperatura después de 50 días para todas las muestras teniendo descensos por debajo de los 10°C y por encima de los 10°C.

#### 4.1.6. Potencial de hidrogeno.

Además de la humedad, otro aspecto para la E. fétida es el potencial de hidrogeno (pH), los valores que caracterizan un buen proceso de vermicomposteo corresponden a 6.80 a 7.55, y

en la tabla 4.3 Se puede observar que se mantuvo entre los valores de 6.6.-7.00, intervalo que cae dentro de las condiciones adecuadas para un buen vermicomposteo. (Schuldt, M. 2007).

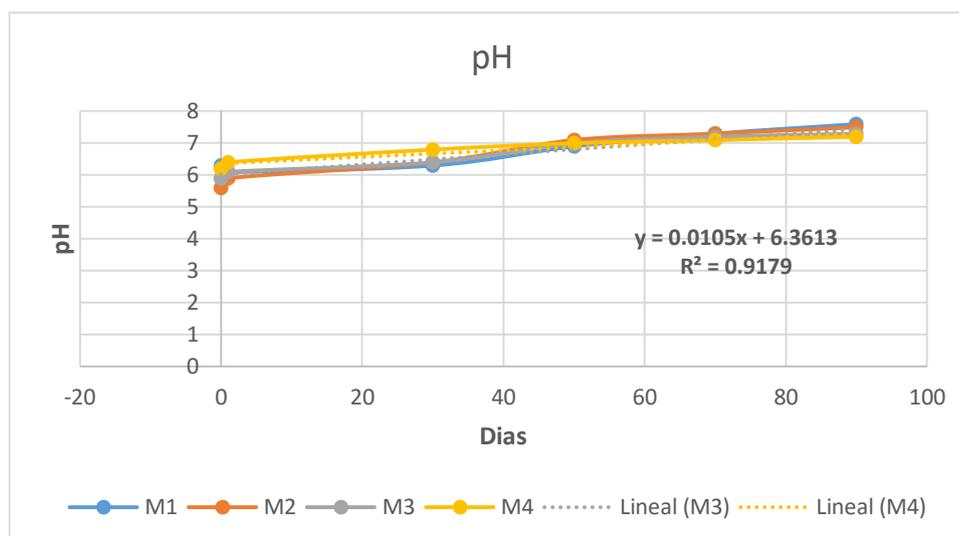
Se sabe que el pH del suelo es un factor clave que afectan a los procesos de bioabsorción y por lo tanto la biodisponibilidad de metales pesados en el suelo. Por lo tanto es importante para determinar el cambio de pH de la lombriz de tierra, se observó que la actividad de las lombrices de tierra aumentó de pH del suelo debido a su orina alcalina. Las variaciones podrían ser debidas a la degradación de ácidos orgánicos y al efecto amortiguador de la materia orgánica. En el año 2007, mostraron que las variaciones del pH pueden ser atribuidas a la descomposición microbiana durante el proceso de vermicomposteo, por lo que la producción de  $CO_2$  y la descomposición de ácidos orgánicos por la actividad microbiana durante el proceso de vermicomposteo reducen el pH del sustrato.

**Tabla 18. Potencial de hidrogeno durante los 90 días de experimentación.**

POTENCIAL DE HIDROGENO				
Tiempo	M1	M2	M3	M4
0	6.3	5.6	5.9	6.2
1	6.1	5.9	6.1	6.4
30	6.3	6.4	6.4	6.8
50	6.9	7.1	7	7
70	7.3	7.3	7.2	7.1
90	7.6	7.5	7.3	7.2
Promedio	6.75	6.63	6.65	6.78

**Fuente: Elaboración propia.**

En la Tabla 18 podemos observar que durante el periodo que se desarrolló el proyecto se ve que el pH tiene varianza durante los 90 días, se observa que el día del muestreo el lodo tiene pH ácido y durante el proceso de experimentación llega a tener pH básico.



**Figura 17. Potencial de hidrogeno.**

**Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 17 mostrada podemos observar que el pH varía durante los 90 días que se realizó el experimento llegando a una basicidad.

Del mismo modo, Ndegwa y col. En el 2000 señalaron que un cambio en el pH podría estar relacionada con la mineralización del nitrógeno y el fósforo en nitritos/ nitratos y orto fosfatos respectivamente y bioconversión de la materia orgánica en especies intermedias de los ácidos orgánicos. **(Ndegwa, 2000).**

El vermicomposteo es una operación combinada de lombrices y microorganismos en que, durante la ingestión del material a través de su acción muscular y la formación de un fluido celómico y enzimas, aumenta la superficie (área) de acción microbiana que junto con las lombrices aumenta los nutrientes del sustrato lodo.

El pH del suelo es un factor importante que determina la presencia o ausencia de lombrices, así mismo, la acidez influye directamente en la alimentación y reproducción de la lombriz, pero es sensible a la acidez del suelo, ya que cuando es baja la lombriz migra hacia la superficie del suelo, donde queda inmóvil y posteriormente ocurre se deceso. De esta manera, las variaciones presentadas en esta investigación podrían atribuirse a la degradación de ácidos orgánicos y al efecto amortiguador de la materia orgánica, por otro lado los valores obtenidos en este estudio se encuentran en los reportados en otras investigaciones. **(Dominguez, 2004).**

Así mismo, es necesario mencionar que el pH tiene un gran efecto sobre la asimilación de los micro elementos aportados por fertilización, de forma que un aumento de pH reduce la solubilidad y absorción de micro elementos tales como el cadmio (Cd), mercurio (Hg). (Rivera, 2002).

#### 4.1.7 Humedad relativa

La humedad es otro parámetro para la dinámica poblacional y adaptación de la lombriz que requiere un valor de 50% a 90% base húmeda, por lo tanto durante el desarrollo del experimento con el lodo, donde se observa que los porcentajes de humedad varían en cada cual de los tratamientos o muestras e incluso en los días de evaluación, esto se debe a las condiciones del ambiente, ya que mientras más cálido era el clima, los tratamientos podían mantener más humedad, pero como ya se mencionó la ciudad de Puno tiene drásticos cambios de clima lo cual afectaron a la humedad ya que el clima es seco en el mes de mayo y junio.

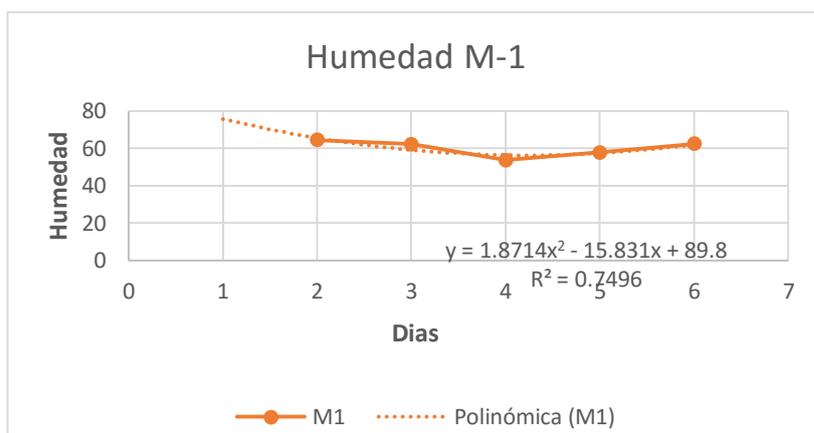
Tabla 19. Porciento de humedad durante los 90 días de experimentación (VER ANEXO N°3)

Humedad				
Muestras/ días	M1	M2	M3	M4
1	64.5	66.2	63.1	65.1
30	62.3	60.2	63.5	63.3
50	53.7	55.2	52.4	51.5
70	57.9	58.2	58.5	56.8
90	62.4	61.4	63	62.2

**Fuente: Elaboración propia.**

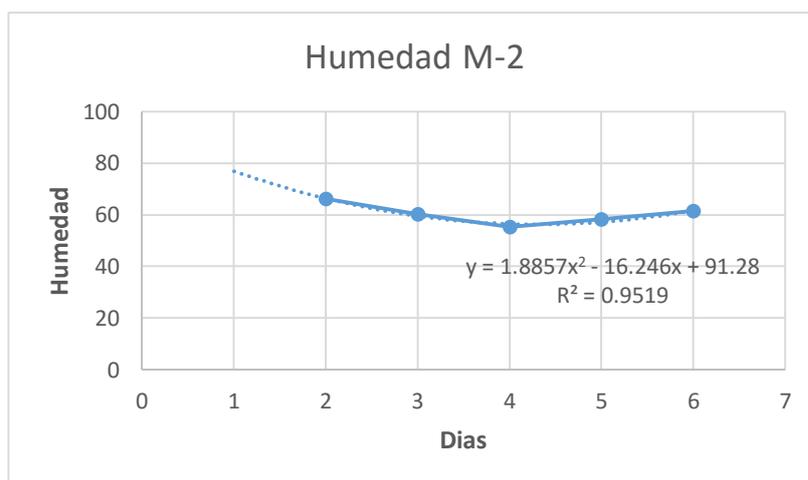
En la Tabla 19 Se detalla la humedad obtenida en cada muestra durante los 90 días de experimentación y a la vez se puede observar los promedios obtenidos para cada muestra.

**Figura 18. Humedad Muestra 1**



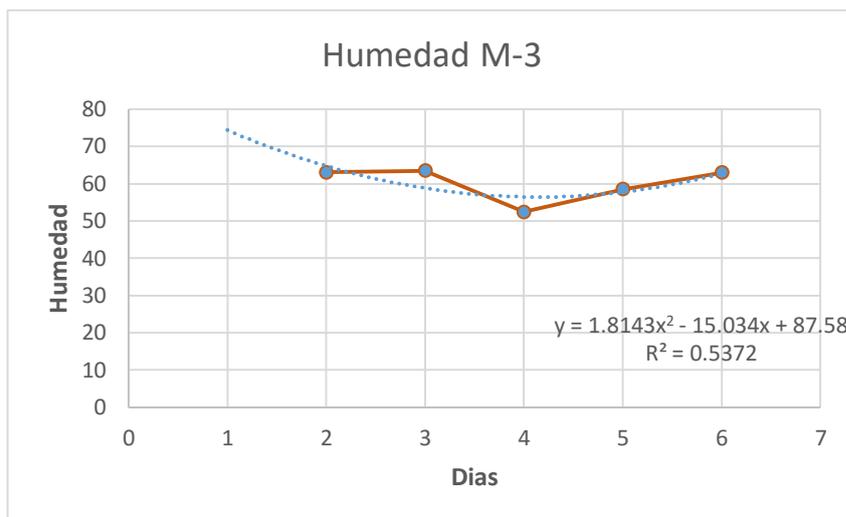
**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 19. Humedad muestra 2**



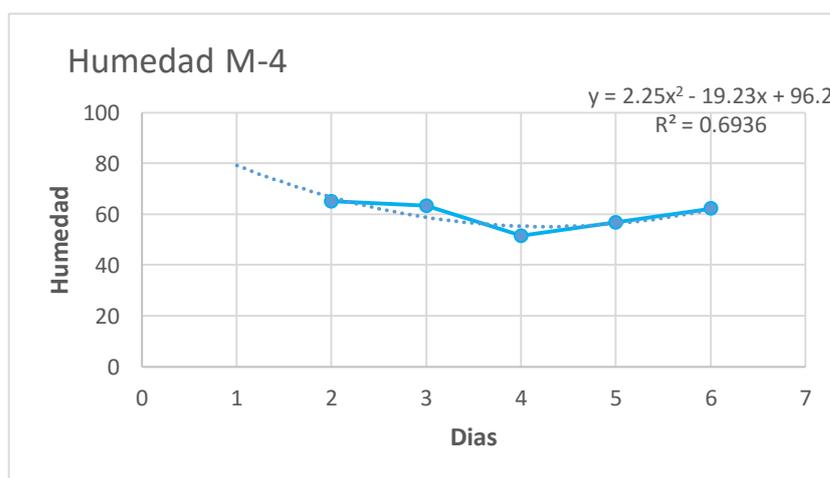
**Fuente: Elaboración propia.**

En las Figuras 18 y 19 observamos el comportamiento de la Humedad de las muestras 1 y 2, realizadas durante los 90 días de experimentación. Para la Muestra 1, tenemos un grado de confianza de 0.7496, el cual es un buen promedio. Para la Muestra 2, con el método de regresión lineal, tenemos un grado de confianza de 0.9519, el cual es un promedio casi perfecto, lo cual quiere decir que las muestras están bien realizadas.



**Figura 19. Humedad muestra 3**

**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 20. Humedad muestra 4.**

**Fuente: Elaboración propia.**

En las Figuras 20 y 21 observamos el comportamiento de la Humedad de las muestras 3 y 4, realizadas durante los 90 días de experimentación. Podemos observar que para la Muestra 3, tenemos un grado de confianza de 0.5372 el cual es un promedio regular ya que en esta muestra no tuvimos un buen resultado a causa de la temperatura. Para el caso de la Muestra 4, tenemos un grado de confianza de 0.6936 al igual que la Muestra 3 influyó la temperatura.

De las 4 muestras podemos decir que el experimento más eficiente es la Muestra 2, ya que durante los 90 días de experimentación tuvo mejor humedad y mantuvo una buena

temperatura y gracias a ello es que se tuvo una buena reproducción de lombrices y con ello se logró mayor concentración de metales en la biomasa de estos.

#### 4.1.8 Análisis de la remoción de metales en los lodos residuales de origen urbano.

Los metales pesados aparecen en los lodos de tratamientos de aguas residuales de origen urbano en una variedad de fuentes como las bacterias, la electrónica de consumo, la cerámica, las bombillas, plásticos, polvo de la casa y pintura. En pequeñas cantidades, muchos de estos elementos son esenciales para el crecimiento de las plantas, sin embargo, en concentraciones más altas es probable que tengan efectos perjudiciales sobre el crecimiento de las mismas, contaminando los mantos freáticos al tiempo que se genera un daño ambiental.

En este estudio, se propone como alternativa para la eliminación de metales pesados de origen urbano el proceso de vermicomposteo analizado, principalmente, en base a las normas oficiales, los metales que pueden representar una mayor toxicidad como lo son Cd y Hg. (Whittle, (2002).

La evaluación de la remoción de los metales y análisis estadístico, se explican a continuación:

#### 4.1.9. Validación de la digestión acida.

**Tabla 20. Porcentaje de recuperación de metales.**

PORCENTAJE DE RECUPERACION DE METALES %		
Muestras/ Metales	Cd (%)	Hg (%)
M-1	22.1	18.55
M-2	8.35	8.53
M-3	14.74	8.84
M-4	14.13	12.14

**Fuente: elaboración propia**

En la tabla 20 se muestra la evolución de los metales, en el lodo, se puede apreciar los promedios de las concentraciones y se observa que existe una remoción de metales que van desde el 8% al 22%, dependiendo del contenido de metal inicial y el lodo en el sustrato. Esta disminución en la cantidad de metales está directamente relacionada con la capacidad

de la especie para acumular diferentes concentraciones de metales pesados en sus tejidos como se demostró previamente.

En este sentido se reporta una considerable cantidad inferior a la presentada en este trabajo de investigación, encontrando una muy buena correlación entre la concentración del tejido y la concentración de metales eliminado en el sustrato.

El análisis de varianza de los resultados de la remoción de metales del lodo con la adición de metales, mostro solamente valores significativos ( $p < 0.05$ ) para el caso del metal pesado Hg con una probabilidad de 0.0021, respectivamente. Siendo el Cd el metal con una mayor remoción en el lodo.

**Tabla 21. Concentración de los metales pesados totales al inicio y final del proceso de vermicomposteo**

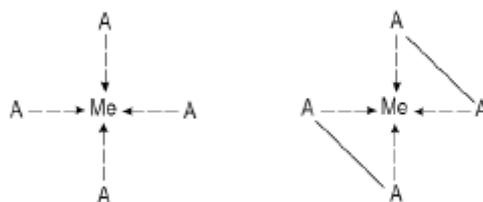
CONCENTRACION DE METALES EN EL VERMICOMPOSTEO (TEJIDO DE LA LOMBRIZ)						
Metales pesados	Muestras	M-1	M-2	M-3	M-4	Promedio
Cd	Inicio	0.738	0.946	4.530	0.835	1.762 (mg/kg)
	Final	0.163	0.079	0.000	0.118	0.090(mg/kg)
Hg	Inicio	0.269	0.716	0.736	0.329	0.513(mg/kg)
	Final	0.050	0.061	0.000	0.040	0.038(mg/kg)

**Fuente: Elaboración propia.**

En la Tabla 21 podemos observar los resultados de las 4 Muestras tanto para el Cadmio y Mercurio, en la tabla mostramos los datos que se obtuvieron al inicio y final del experimento.

Cabe hacer mención que normalmente los metales en el sustrato se encuentran en su mayoría en forma de sulfatos, pero cuando el sustrato es rico en materia orgánica, se favorece la formación de quelatos que, a su vez, ayuda a la absorción de metales en la *E. fétida*. Este complejo se forma cuando un ion metálico se combina con una sustancia que posee un átomo donador de electrones. Si este compuesto que se combina con el ion metálico posee dos o más átomos donadores de electrones, de modo que se puedan formar dos o más ciclos, se obtiene un quelato, y la sustancia que aporta los electrones se denomina agente quelante. La forma y velocidad con la que pueden formar estos complejos metálicos depende de varios factores, sin embargo, a continuación se explicara de manera general su formación dependiendo del ion metálico.

Debido a que un complejo metálico se expresa de la siguiente manera.



**Figura 21. a) Complejo de coordinación b) Quelato metálico**

La formación de un quelato es una reacción de equilibrio:



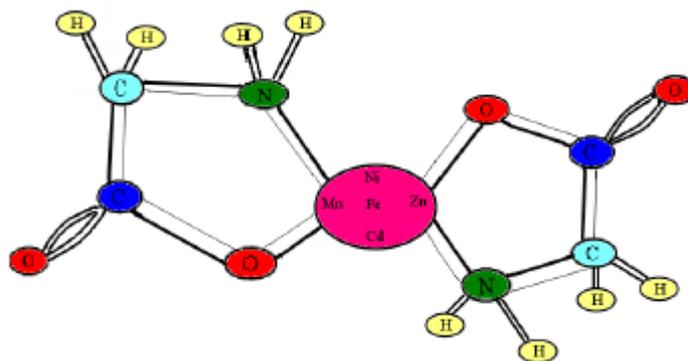
La constante de equilibrio o estabilidad de la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\text{Constante de Estabilidad} = K = \frac{[ML]}{[M] \cdot [L]} = \frac{\text{Metal Quelante}}{\text{Metal libre}}$$

Como K usualmente es el número muy grande, es común expresarlo como LogK. Por lo tanto, otra forma de expresar el concepto anterior es a través de la siguiente expresión que establece la relación entre el ion metálico quelatado y el ion libre:

$$\text{Constante de Estabilidad} = \text{Log } K = \frac{\text{Metal Quelante}}{\text{Metal libre}}$$

Como ejemplo de la formación de quelatos se puede mencionar los iones de Cu que están hidratados con cuatro moléculas de agua, el reemplazo de estas moléculas por una molécula de un agente forma una estructura compleja (anillo) que se llama quelatación, a la molécula que reemplaza el agua se le llama “ligando”.



**Figura 22. Los ligandos adoptan una orientación espacial más estable con los ángulos tetraédricos.**

Dentro del mismo proceso de quelatación influyen ciertos factores como el pH del sustrato y la temperatura. El pH es importante en este proceso, porque determina la ionización del ligador y la constante de estabilidad, expresa la energía de los enlaces individuales.

Un pH ácido corresponde a cierta concentración de iones hidrogeno, estos iones tienen tendencias a desplazar el ion metálico combinado con el ion quelante provocando la disociación del quelato metálico y disminuyendo la constante de estabilidad. Un pH alcalino, correspondiente a cierta concentración de iones hidroxilo, provocara la formación de hidróxidos metálicos insolubles, sustrayendo el ion metálico del quelato formado.

La constante de estabilidad de los quelatos metálicos varía con la temperatura, disminuyendo generalmente con su aumento. Este efecto es muy pronunciado para los quelantes inorgánicos, para el caso de estudio, los quelantes que comúnmente se encuentran en el lodo.

**Tabla 22. Límites de concentración de metales pesados.**

Muestras/ Metales	M-1	M-2	M-3	M-4	NOM-004- SEMARNAT- 004
Cadmio	0.22088517	0.0835051	0.1474625	0.1413428	<b>39</b>
Mercurio	0.18553564	0.08525387	0.08835	0.1214108	<b>17</b>

En la tabla 22 se puede observar que las concentraciones de metales pesados al final del proceso de vermicomposteo para las muestras están debajo de los límites permisibles tanto de la NOM-004 y NMX-FF-106.

Por lo tanto, el lodo residual de la Laguna de Estabilización secundaria El Espinar-Puno puede ser seguro en términos de metales pesados y podrían ser utilizados como acondicionador del suelo.

La concentración del Cadmio depende de la composición del material parental y de la mineralogía del suelo, especialmente de la concentración de cuarzo, de manera que solamente una pequeña fracción del Cadmio está en forma intercambiable o soluble.

Aproximadamente, la mitad del Cadmio disuelto está presente como catión zinc hidratado, siendo, por lo general, la absorción de este elemento un proceso relativamente fácil para las plantas.

Los micronutrientes son elementos esenciales en las actividades metabólicas de las plantas y son requeridos en pequeñas cantidades, si se encuentran en concentraciones elevadas, pueden pasar a través de la cadena alimenticia o bien pueden provocar toxicidad a las plantas. (Cardoso 2000).

Finalmente, a continuación se presentan los resultados del tratamiento con mayor perspectiva para el tratamiento de lodos residuales de origen urbano utilizando esta técnica.

**Tabla 23. Concentraciones de cd y hg en el lodo residual.**

Concentración de metales en el lodo residual (mg/kg)						
Metales	Muestras	M-1	M-2	M-3	M-4	Promedio
Cd	Inicio	0.737	0.946	1.566	0.834	1.0213 mg/kg
	Final	0.163	0.079	0.231	0.118	0.1478 mg/kg
Hg	Inicio	0.269	0.715	0.735	0.329	0.5125 mg/kg
	Final	0.269	0.061	0.065	0.040	0.1089 mg/kg

**Fuente. Elaboración propia.**

En la Tabla 23 se muestra la concentración del Cd y Hg en el lodo residual se puede interpretar que en las 4 muestras que se realizó tuvimos éxito ya que hay una disminución de estos metales tenemos como promedio para el Cadmio en un inicio tenía 1.021 mg/Kg de lodo residual y al final esta con 0.148 mg/kg de lodo, en el caso del Mercurio al inicio tenía 0.513 mg/Kg de lodo residual y finalmente redujo a 0.109 mg/Kg de lodo residual respectivamente.

Diversos autores han demostrado la capacidad que tienen las lombrices de tierra para concentrar algunos metales pesados en sus tejidos. **(Hartenstein, R.2000)**

Se puede observar las concentraciones en ppm (kg/mg) de los metales en el tejido de lombriz y además el incremento que se obtuvo en cada tratamiento, como era de esperar los metales de mayor concentración se detectaron en el Cadmio. **(Janssen, 2002.)**

Por el contrario el Mercurio se concentran más en el sustrato que en los tejidos de las lombrices de tierra, lo cual se demuestra durante el análisis realizado a los metales. En la mayoría de los reportes encontrados en la literatura, el metal con menor bioacumulación en el tejido de los anélidos en el Mercurio. **(Morgan, 2000).**

Este resultado puede explicarse en términos de la bioconcentración en la especie de lombriz utilizada o del porcentaje de metal contenido al inicio del proceso. En este caso, para todos los tratamientos el contenido de cobre se encuentra aproximadamente constante, por lo que la baja concentración de cobre está relacionada directamente con el mecanismo para asimilar este metal, el cual para esta especie es muy bajo. **(Andul, 2002).**

Por otra parte los datos sobre la concentración de Mercurio son escasos ya que no existe acumulación del metal en lombrices de tierra, sin embargo, en este estudio, este metal representa la mayor remoción en todos los tratamientos, (remociones mayores al 80%) y su factor de bioacumulación es de 0.799. la aparente contradicción de estos resultados podría sugerir un mecanismo de asimilación y desalojo en el cuerpo de la lombriz muy alto. Por lo que a pesar de que se observa una alta eliminación se espera que la lombriz sea capaz de desalojar los metales de su organismo en un periodo de tiempo posterior al tratamiento como lo hacen con otro tipo de metales tales como Pb. Esto es solo una sugerencia por lo que estudios en detalle se requieren para corroborarla, sin embargo esta fuera del alcance de este proyecto.

Tabla 24. Concentraciones de cd y hg en el tejido de la lombriz

CONCENTRACION DE METALES EN EL VERMICOMPOSTEO (TEJIDO DE LA LOMBRIZ) (mg/kg)						
Metales pesados	Muestras	M-1	M-2	M-3	M-4	Promedio
Cd	Inicio	0.738	0.946	4.53	0.835	1.762 mg/kg
	Final	0.163	0.079	0	0.118	0.090 mg/kg
Hg	Inicio	0.269	0.715	0.736	0.329	0.513 mg/kg
	Final	0.050	0.061	0	0.040	0.038 mg/kg

Fuente. Elaboración propia.

Dado que las actividades antropogénicas producen contaminantes de tipo orgánico e inorgánico al ambiente, los estudios de biodisponibilidad, permiten conocer si un sustrato está contaminado por metales pesados y participan organismos, como la lombriz de tierra, que acumula metales en su tejido. La bioacumulación se puede evaluar en la lombriz mediante el cálculo del factor Bioacumulación (BDFs). (Spurgeon, 2003).

$$BDFs = \frac{\text{Concentración del metal en el tejido de la lombriz}}{\text{Concentración del metal total en el lodo}}$$

La bioacumulación es un índice importante que se utiliza para la identificación de la contaminación ambiental. La bioacumulación de diversos metales es complejo porque involucra varios procesos: la absorción, la distribución interna, el almacenamiento y excreción. (VER ANEXO 1) (Wang, 2008).

La Tabla 25 presenta los BFCs de los dos metales pesados en el proceso de vermicomposteo durante los 90 días para el lodo, los cuales fueron clasificados como Cd>Hg.

**Tabla 25. Factor de bioacumulación (BFCs) en el tejido de la lombriz**

Metales pesados	Muestras	BCFs (mg/kg)
Cd	M-1	0.2209 mg/kg
	M-2	0.0835 mg/kg
	M-3	0.3458 mg/kg
	M-4	0.1413 mg/kg
Hg	M-1	0.1855 mg/kg
	M-2	0.0853 mg/kg
	M-3	0.0884 mg/kg
	M-4	0.1214 mg/kg

**Fuente: elaboración propia.**

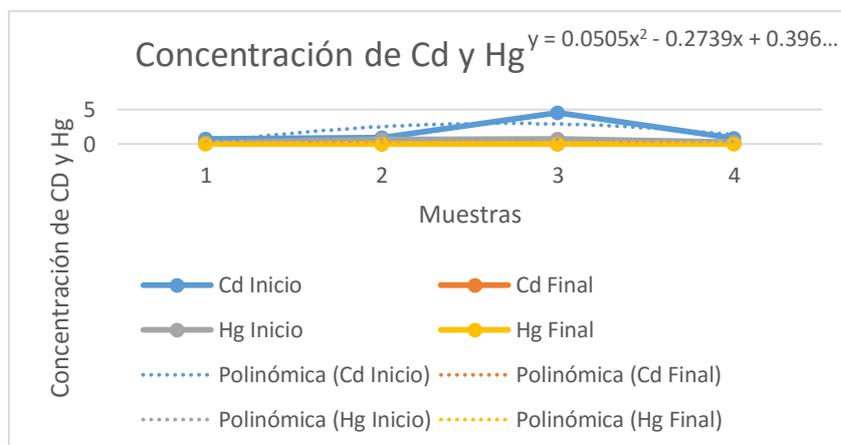
En otros trabajos se reporta un factor de bioconcentración de 1.74 en el caso del Cadmio, lo que indica una mayor bioconcentración de Cadmio en esta especie, para el caso del Mercurio tienen valores bajos comparados con los de este trabajo, en las muestras realizadas tenemos bajo contenido de metales en las lombrices ya que existe un menor número de individuos, lo que hace difícil el manejo y un empleo adecuado de las muestras.

La bioacumulación de metales por la *E. fétida* se produce a través de la pared del cuerpo a través de los poros del suelo – agua y estas no dependen directamente de la concentración total de metales, sino de su disponibilidad. (VER ANEXO 1). sobre la interacción del metal sobre la fase sólida y el agua intersticial, esto explica las diferencias de los factores de bioacumulación de las dos etapas, ya que durante la primera etapa los metales se encontraban disponibles y podían ser extraídos fácilmente por algún quelante del Zinc. (Spurgeon, 2003)

Con relación al factor de bioacumulación en la lombriz *Eisenia fétida* el orden creciente para los metales presentes en el tejido es Cd>Hg, este orden es similar a estudios que se hicieron, se estudiaron dos especies de lombriz de tierra *Aporrectodea caliginosa* y *Lumbricus rubellus*. La disminución de las concentraciones de metales pesados en el lodo residual indica la cantidad de la acumulación de metales pesados en la *E. fétida* en sus tejidos corporales. (Del Aguila, 2007).

La siguiente figura muestra las concentraciones de los metales en cada una de las etapas y en las normas vigentes del lodo residual y el humus de lombriz, en ninguno de los valores

excede los límites permisibles reportados en las normas, sin embargo, en un lapso de tiempo mayor estas concentraciones podrían alcanzar estos puntos críticos.



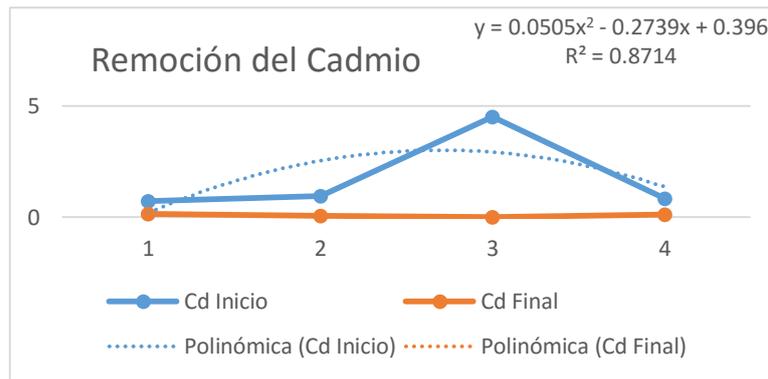
**Figura 23. Concentraciones de metales al terminar el proceso de vermicomposteo.**

En la Figura 25 podemos observar la concentración de los metales en los lodos residuales. Obtuvimos un promedio de remoción del Cd y Hg, se utilizó el método de regresión lineal y tenemos un grado de confianza  $R^2 = 0.8714$  para ambos metales, se ve que el contenido de metales pesados ha ido disminuyendo en cuanto al contenido de concentración con el pasar de los días.

#### 4.1.20 Remoción de Cadmio en el vermicomposteo.

En lo que corresponde a la presencia de Cadmio en el lodo no inoculado se detectó la presencia de este metal por el método ICP.

Se reporta en un trabajo que la ingestión de grandes cantidades de Cd (300 ppm) causaron importantes lesiones en el ADN de la *E. fétida* como la variación del tamaño corporal; en este estudio en particular, se corrobora la toxicidad del Cadmio, al observar que al término del experimento en el lodo adicionado los anélidos presentan tamaños de alrededor de 3 a 4 cm con una pérdida de clitelium y con ello su capacidad reproductora. Esto ocurría cuando la concentración de cadmio era de 343.86 ppm. (Prinsloo, 2009).



**Figura 24. Remoción del cadmio en el vermicomposteo.**

En la Figura 24, se muestra la remoción del Cadmio en el resultado final el Vermicomposteo en las cuatro muestras realizadas y vemos que tenemos resultados satisfactorios, con un grado de confianza  $R^2 = 0.8714$ , el cual es un 87% de eficiencia como nos muestra en la figura 4.14 en el cual se obtuvo con el método de regresión lineal, nos indica que el promedio de las cuatro muestras son óptimas y se obtuvo resultados eficientes sobre todo en la remoción del Cadmio.

**4.1.21 Remoción del Mercurio en el vermicomposteo.**

En el caso del mercurio se detectó la presencia de este metal por el método ICP-MS, en las cuatro muestras realizadas en el día 90 la remoción fue total.



**Figura 25. Remoción del mercurio en el vermicomposteo.**

En la Figura 25 se puede observar que en la muestra 2 y 3 tienen la más alta concentración de Mercurio. Se puede observar que durante los días de experimentación se tuvo una buena cantidad de remoción de este metal para todas las muestras, tenemos un grado de confianza  $R^2 = 1$  el cual es la cantidad inicial de concentración del Mercurio, al finalizar tenemos un grado de confianza de  $R^2 = 0.29$  que es la cantidad de remoción, podemos ver que no es un resultado muy óptimo en cuanto a la remoción del Mercurio, el cual nos indica un 29% de remoción.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se propone el uso de la técnica de vermicomposteo para el tratamiento de metales pesados como es el Cadmio y Mercurio que están contenidos en lodos residuales de origen urbano utilizando la lombriz de la especie *E. fétida*. A partir de los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones:

- El porcentaje obtenido de remoción del Cadmio es de 8% a 22% y en el caso del Mercurio es de 8% a 18% en el vermicompostaje obtenido, este resultado fue a causa del clima ya que como anteriormente se mencionó los problemas de los cambios de clima drásticos que sufre esta región. La relación más adecuada para la remoción de metales pesados de origen urbano son las muestras M-2 y M-4. En estas muestran no afectan la dinámica poblacional de la especie, presentando una reproducción de la especie aceptable y remociones altas de los metales analizados. El efecto de la adición superficial de metales en el lodo residual puede observarse en la cantidad de biomasa presente en el anélido.
- El porcentaje de humedad obtenida en la Muestra 1 fue 40.2%, la Muestra 2 fue 40.6%, la Muestra 3 fue 39.8% y en la Muestra 4 fue de 40.5%, estos resultados fueron analizados en 5 etapas, en los cuales en los días 50 y 70 tuvimos un descenso de temperatura lo cual afectó a la humedad ya que en esos días se presentó un clima seco. El pH por otro lado gracias al proceso endotérmico realizado antes de empezar el experimento ayudó a que el pH sea menor y no sea tan ácido por el cual reduce la solubilidad y absorción de los metales tales como el Cadmio (Cd) y el Mercurio (Hg).
- La concentración de los dos metales analizados: Cadmio y Mercurio, el Cadmio es el elemento que más influye en la formación de capullos, la biomasa y reproducción de la *Eisenia fétida*. Las remociones de ciertos metales específicamente de Hg presentan un periodo máximo de eliminación, de esta manera las muestras M-2 y M-4 presentan la eliminación máxima de estos metales después de ocho días, mientras que las otras muestras M-1 y M-3, alcanzan esta eliminación después de los 30 días. En la muestra M-3 existe una ligera disminución de la biomasa, incrementando el deceso de anélidos al final de la evaluación. Los resultados reportados en este estudio indican que la reproducción, el crecimiento y la biomasa de las lombrices se debe a que antes de empezar el experimento se le hizo una etapa que fue un proceso endotérmico el cual ayudó a que los lodos no tengan un grado

alto de coliformes fecales y así tengan una mejor reproducción. El lodo residual de la Laguna de Estabilización Secundaria El Espinar Puno, tiene un contenido de metales que no sobrepasa los límites máximos permisibles según la ECA. Durante el análisis realizado los niveles de metales se redujeron en buena cantidad. Finalmente, la capacidad de absorción de la *Eisenia fétida* con el Cadmio y Mercurio, para la aplicación en el tratamiento de metales pesados es una alternativa viable, sobre todo para la producción de sustratos con alta calidad de nutrientes que pueden ser utilizados en áreas como la agricultura y recuperación de suelos

## RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos, con el objetivo de mejorar y completar el tratamiento de remoción de metales pesados tales como Cadmio y Mercurio de la laguna de Estabilización Secundaria El Espinar Puno a partir de vermicomposteo se realizan las siguientes recomendaciones:

- La Facultad de Ingeniería Química y la Universidad como institución científica y técnica debe seguir promoviendo el desarrollo de trabajos de tesis de investigación sobre tratamientos y de remoción de metales pesados en lodos residuales y otros.
- Incentivar a las empresas formales e informales de la importancia de tratar las aguas y lodos residuales implementando pequeñas plantas de tratamiento.
- Promover la utilización del vermicomposteo para diferentes tratamientos y así incentivar a la población a la lombricultura. Hacer una campaña de difusión de todos los males que ocasionan los contaminantes arrojados a los ríos de nuestra ciudad.

**BIBLIOGRAFÍA.**

ALMEIDA, G.; FANHANI, C. J.; D'OLIVEIRAS, S. P.; DIAS-FILHO, P. B. 2007; *Cesumar*, 8,95.

ANDUL RIDA, A.M.M..1992, Biosurveillance de la contamination du sol:Apport de letude des lombriciens al evaluation des risques lies aux elemnts traces,Ph.D. Thesis, Universite de Montpellier II, Montpellier).

ARAQUE, M. P. 2006. ; *Tesis Maestría en ingeniería ambiental*, Universidad de los Andes, Colombia,

ATIYEH, R. M. SUBLER, S., EDWARDS, C. A., BACHMAN, G., METZGER, J. D., and SHUSTER, W. 2000. Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil. *Pedobiologia*. 44: 579-590.

BRYAN, G.W. 2006. Heavy metal contamination in the sea, on *Marine Pollution*, Ed. R. Jonhston London (England): Academic Press.,p.2)

CARDOSO VIGUEROS, L. 2004. Uso potencial de lodos rsiduales como biosolidos en Mexico. Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua.

CARDOSO, E. RAMÍREZ. 2000. "Vermiestabilización de Lodos Residuales y Lirio Acuático". Actas del XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, ABES. Porto Alegre. Brasil.

CASTREJÓN, A. BARRIOS, J.A.: JIMENEZ, B. MAYA, C.: RODRIGUEZ, A. Y GONZALES, A. 2002. Evaluación de la calidad de lodos residuales en México. *Memorias XIII Congreso Nacional, FEMISCA*, pp. 15-34

COLOMER, F y otros. 2010. Opción de calorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. *Ingeniería revista académica*. Vol. 14 No.3. U autónoma de Yucatán.

CHICÓN Reyna y virgen de Belén, 2004, M. especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos como mejoradores de suelo. Artículo de divulgación, pp. 1-8.

DABRIO, M., RODRIGUEZ, A.R.; BORDIN, G., BEBIANO, M.J. DE LEY, M., SESTAKOVA, I.,VASAK, M. AND NORDBERG, M., 2002. Recent devolopments in quantification methods for metallothionein. *J. Inorg.Biochem*. 88, pp. 123-134.

DEL AGUILA. J.P., LUGO DE LA F.J., ARMENTA, V.R., TELLEZ L.L. 2007. Bioacumulacion de metales en lombriz de tierra (*Eisenia fétida*) y el cambio de la materia organica soluble y acidos húmicos en la enmienda de lodos residuales a suelos de cultivo. Congreso de Ciencias Ambientales, pp. 1-16).

DÍAZ JOSÉ Y TOMÁS SANTOS. 2002. Zoología: Aproximación Evolutiva a la Diversidad y Organización de Los Animales

DOMINGUEZ J., 2010. State-of-the-art and perspectives on vermicomposting research, in: C.A. Edwards (Ed.) *Earthworm Ecology*. CRC Press Raton ,pp. 401-424.

EPA, Method 3051<sup>a</sup> y 3052, 2003. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludge, soil, and oil, pp1-28, 1-35

EASTMAN, P. N. KANE, C. A. EDWARDS, L. TRYTEK, B. GUNADI, A. L. STERMER, J. R. MOBLEY. 2001. "The Effectiveness of Vermiculture in Human Pathogen Reduction for USEPA Biosolids Stabilization". *Compost Science and Utilization*. Vol. 9. pp. 38- 49.

FILIPIC, M. AND HEI, MUTAGENICITY T.K. 2002. Of cadmiun in mammalian cell: implication of oxidative DNA damage Metka Filipic, Tom K Hei, Research GATE is the leading professional network for scientist. ISSN: 0027-5107.

GARCIA, L. y DORRONSORO, C. 2009, contaminación del suelo. Tema 15. Contaminación en metales pesados. Actualización: 10 de octubre del, p. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema00/home.htm>

GIL, CARLOS. 2016. Anélidos. Licenciatura en Biotecnología.

GIRALDO, O.; LOZANO, A. 2006; *Rev. Agro. Col.*, 24,348.

GUADARRAMA R. O. y TABOADA S. M. 2004. La Lombricultura, una Propuesta al Medio Rural. Memorias del Primer Congreso Internacional de Lombricultura y Abonos Orgánicos. Guadalajara, Jal. Méx.

GRG. V. K. and KAUSHIK P. 2005. Vermistabilization of textile mill sludge spiked with poultry droppings by an epigeic earthworm *Eisenis fetida*, *Bioresour. Technol.* 96 pp.1063-1071.

- HARRIS, L. and BRIERLEY, J.A.2001. Boitechnology, Mining Magazine, october, 430-433.
- HARTENSTEIN, R., NEUHAUSER, E. F. AND COLLIER, J.:2001, J. Environ. Qual. 9(1), 23.
- HERNANDEZ, J.; MAVAREZ, L. Y ROMERO, E. 2002. Altura del canteo en el comportamiento de la lombriz roja (*Eisenia ssp*); bajo condiciones calidades. REv. Fac. Agron. Vol 20, no.3.
- HOLMES, P., JAMES, K., LEVY, L. S. 2009. Is low-level environmental mercury exposure of cancer to human health. Science of the Total Enviroment (408), 171-182.
- IUPAC REcommendations, Glossary for Toxicokinetics of Chemicals, 3003, p.l. <http://iupac.org/reports/provisional/abstract03/nordberg.prs.pdf>.
- JANSSEN, R.P.T., POSTHUMA, L., BAERSELMAN, R., DEN HOLLANDER, H. A., VAN VEEN, R.P.M. AND PEIJNENBURG, W. J.G.M.:1997, Environ. Toxicol.Chem.16 (12), 2479.
- JOHN H. Duffus, 2002 ""Heavy metals" a meaningless term. (IUPAC Technical Report)" Pure and Applied Chemistry, Vol. 74, pp. 793–807
- KURIEN J. and RAMASAMY E.V. 2006, vermicomposting of Taro (*colocasia esculenta*) with two epigeic earthworm species. India. Biosource Technology 97, pp. 1324-1328.
- LOPEZ MOYA, J. R. AGUILAR ALONSO, I. Y NAVARRO AVIÑO, J.P. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancis y acumulación de metales pesados en plantas. Asociación española de ecología tgerrestre Ecosistema. Pp 12
- LUCHO, C.A., ÁLVAREZ, M., BELTRÁN, R.I., PRIETO, F. and POGGI, H. 2005. A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. Environmental International, On Line: 0160- 4120-Ddoi: 10.1016.
- MARTINEZ C.C. 2003. Abonos Orgánicos: Origen, Usos y Aplicación. Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno del Estado de Chiapas. Dirección de Promoción Social. Chiapas México.
- MARTÍNEZ OLIVER, E. 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

Diseño de Lagunas de Estabilización. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.

MENDEZ Y BUSTOS 2014. Electro remediación de suelos una alternativa más para recuperar sitios contaminados.

MCGRAW-Hill, 2009. Interamericana de España S.L., Principios integrales de zoología.

MOLINA, V. DROPELMANN, E. ARÉVALO, H. MORENO. 2001. "Tratamiento de Lodos Provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Aeropuerto Arturo Merino Benítez mediante Compostaje y Lombricultura". En actas del XIV Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Santiago.

MORGAN, J.E. AND MORGAN, A.J.:1992, Soil Biol. Biochem. 24(12).

NDEGWA, P.M., THOMPSON, S.A. AND DAS, K.C., 2000. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids, bioresour. Technol. 71pp. 5-12.

OROPEZA G. N., 2006. Caos Conciencia 1: 51-58, , Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo Boulevard Bahía s/n esq. Ignacio Comonfort, Col. del Bosque Chetumal, Quintana Roo, México C.P. 77019.

PÉREZ VÁZQUEZ, RAMÓN G. 2011. Efecto de los metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca". Pinar del Río. Cuba

POBLETE, M. y RUIZ, M. 2001. ecología de tres lumbricidos presentes en Temuco, IX Región de Chile. Tesis conducente al título de profesor en Ciencias Naturales y Biología. Pontificia Universidad Católica de Chile sede Regional Temuco. Chile.

PRINSLOO, M.W. REINECKE, S.S. PRZYBYLOWICS, W.J., MESJASZ-PRZYBYLOWICS, J. AND REINECKE, A.J. 2000, Micro-PIXE studies of Cd distribution in the rehridia of the eratworm *Eiseneia fétida* (Oligochaeta). Nucl. Instrum. Methods B., , 158,317-322.

PURAKIN, P. y PAKNIKAR, K. 2000. *Biosorption of Lead, Cadmium and Zinc by Citobacter Strain MCM B-181: Characterization Studies*. Biotechnol. Prog: 15, 228-237.

REYNOLDS, K.A. 2002. "Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamerica. Tesis de Dsoctorado, Arizona, EE.UU. P.3)

- RIVERA, C. 2002. Manual Técnico Agropecuario, p.10.
- RODRÍGUEZ QUIROZ, G. Y PANIAGUA MICHELLE, J., 2006 el vermicomposteo de biosólidos y agua tratada en el noreste de México, AIDIS, vol. 1, pl.
- RODRÍGUEZ, J. POVINELLI. 2004. "A Vermicompostagem do Lodo de Lagoas de Tratamento de Efluentes Industriais Consorciada com Composto de Lixo Urbano". Engenharia Sanitaria e Ambiental. Vol. 9. pp. 218-224.
- RUIZ MANRÍQUEZ, A; NORIEGA, J, ORTEGA, L, J.; MAGAÑA, P. 2005. Biosorción de metales pesados por *thiobacillus ferrooxidans* Journal of the Mexican Chemical Society, septiembre-octubre, año/vol. 42 número 005 pp.228-233.
- RUMI, A. GUTIERREZ GREGORIC, D. E. Y SCHULD, M. 2005. Determinación de edades (clases) en poblaciones de *Eisenia fetida* (Annelida Lumbricidae) y sus implicancias reprobológicas. Revista del Museo de la Plata, Zoología, 17(170), pp.1-10.
- SANCHEZ, ZOILA. 2009. Propuesta para el tratamiento de metales pesados en lodos residuales de origen urbano, utilizando vermicomposteo. Tesis conducente al título de Maestro en tecnología avanzada. Instituto Politécnico Nacional México.
- SANTAMARIA, S y FERRERA, R. 2002. Dinámica poblacional de la *Eisenia Andrei*, en diferentes residuos orgánicos. Terra latinoamericana, vol. 20, núm. 003, septiembre, pp. 303-310.
- SCHULDT.M., 2008 curso a distancia de Lombricultura Argentina Manual de Lombricultura, secretaria de Educación a distancia e Investigación. Argentina, septiembre, p, 11.
- SCHULDT. Desarrollo y adaptación a diferentes condiciones de interperie. Op. Cit., p.8.
- SCHULDT, M. CHRISTIANSEN, R., SCATTURICE, L. Y MAYO, J. P. 2007. Lombricultutra. Desarrollo y adaptación a diferentes condiciones de interperie REDVET. Revista electrónica de Veterinaria. Vol. VII, N°8, pp.1-10).
- SEKAR M., SAKTHI V., RENGARAJ S. 2004. Journal of Colloid and Interface Science: 279; 307- 313.
- SHAHMANSOURI, op. Cit., p.29.

SILROBA, M.; KAUSEHKE E.; PRCHASCOBA, P.; JOSKOVA, P., TUCKOVA, L. and BILCJ M., 2007, characterization molecular cloning and localization of calreticulin in *Eisenia Foetida* earthworm. *Environmental Pollution*, pp. 141-147.

SPURGEON, D.J., WEEKS.M.J. AND VAN GESTEL,C.A.M.A. 2003. summary of eleven years progress in earthworm ecotoxicology. *Pedobiologia*, 47:1-19.

SUTHAR, S. 2009. Vermistabilization of municipal sewage sludge amended with sugarcane trash using epigeic *Eisenia fétida* (oligochaeta) *Journal of Hazardous Materials* 163 199-206.

SUTHAR, S. AND S. SING, 2008. Feasibility of vermicomposting in biostabilization of sludge form a distillery industry, *Sci. Total Enviroun*. 394 , 237-244.)

TORRES C, E. 1997. Reutilización de aguas y lodos residuales. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Master of Science en Física y Química de Suelos.

TORRES CARRANZA, 2008. Universidad Politécnica de Madrid. Master of Science en Física y Química de Suelos. Profesor Universitario. Director General de Medio Ambiente del Concytec

TREJOS VÉLEZ, M., y AGUDELO Cardona, N. 2012. 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. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira.

VIDAL, J., MARRUGO, J., JARAMILLO, B., PEREZ, L., 2010. Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ingeniería y Desarrollo* p. 114-115.

WANG W.X. RAINBOW P.S. 2008. Comparative approaches to understand metal bioaccumulation in aquatic animals. *Comp Biochem Physiol*, 148C pp.315-323.)

## ANEXOS

### ANEXO 1. BIOACUMULACION, BIOMAGNIFICACION, BIOCONCETRACION Y BIODISPONIBILIDAD.

La bioacumulación “aumento progresivo de la cantidad de sustancia, extraña al ecosistema, en un organismo o parte de él, como consecuencia de que el ritmo de absorción supera la capacidad del organismo para eliminar la sustancia”. Hace referencia al balance entre la cantidad de metales incorporados a los seres vivos y los que estos son capaces de eliminar de su propio organismo. Como consecuencia de dicho balance se puede producir un aumento o una disminución neta del contenido en metales pesados en el organismo. Este término tiene en cuenta el hecho de que aunque la dosis puntual de metales pesados este por debajo de valores que puedan producir efectos adversos sobre los organismos, sin embargo, la acumulación progresiva en situaciones en las que el balance metálico ingreso/excreción puede hacer que los niveles de los metales pesados en el organismo se incrementan con el tiempo hasta valores en los que se manifiesten efectos adversos. El factor de bioacumulacion (BAF) es la razón entre las concentraciones del organismo/agua o medio, aunque el proceso haya sido pasando por otros organismos. **(IUPAC, 2003)**.

La biomagnificación. Incremento en la concentración de un contaminante en los organismos a medida que asciende en su posición en la cadena trófica. Se produce por el incremento en la concentración de un contaminante en los organismos a medida que asciende en su propia cadena trófica. La cantidad de mal retenida por un organismo es asimilada directamente por su depredador, que a su vez puede servir de alimento a otro organismo situado en un nivel superior de la cadena trófica, con el siguiente incremento en la cantidad de metal acumulado por este último. **(Bryan, 2000)**

El termino bioconcentración. “Relación existente entre la incorporación de una sustancia al organismo vivo y el medio abiótico en el que habita”, tiene en consideración la relación existente entre la incorporación de metales al organismo vivo y el medio abiótico en el que habita, este parámetro es más fácil de determinar que el de bioacumulación, el factor de bioconcentración (BCF) es el valor que resulta de dividir el contenido de un contaminante en un animal o planta, entre el contenido en el ambiente o del organismo u organismos que han servido de alimento para la especie en cuestión.

La biodisponibilidad. “grado de absorción de una sustancia por un organismo vivo”, de los metales hacia los organismos. Este término se ha establecido primariamente para las

plantas, aunque actualmente se ha extendido a otros organismos. En este sentido, la teoría del “Modelo de ligando bióticos un intento de predecir como los metales disueltos interaccionan con los organismos y les pueden afectar y tratar de establecer la biodisponibilidad de los metales en función del tipo de barrera biológica que debe traspasar el metal en su entrada al organismo. La biodisponibilidad del metal, se refiere a la capacidad de absorción que tendría en el organismo, dado que por ejemplo, la mayoría de los, metales forman cristales minerales de baja biodisponibilidad.

## ANEXO 2.

**Tabla 26. Número de lombrices reproducidas durante los 90 días de experimentación para las 4 muestras.**

Número de individuos				
Muestras				
DIA	M1	M2	M3	M4
1	5	5	5	5
30	10	23	9	22
50	8	7	10	20
70	10	11	5	18
90	3	15	1	11

## ANEXO 3.

**Tabla 27. Humedad obtenida durante los 90 días para las 4 muestras.**

Humedad				
Muestras/ días	M1	M2	M3	M4
1	64.5	66.2	63.1	65.1
30	62.3	60.2	63.5	63.3
50	53.7	55.2	52.4	51.5
70	57.9	58.2	58.5	56.8
90	62.4	61.4	63.0	62.2
<b>% Humedad</b>	<b>40.2 %</b>	<b>40.7 %</b>	<b>39.8 %</b>	<b>40.5 %</b>

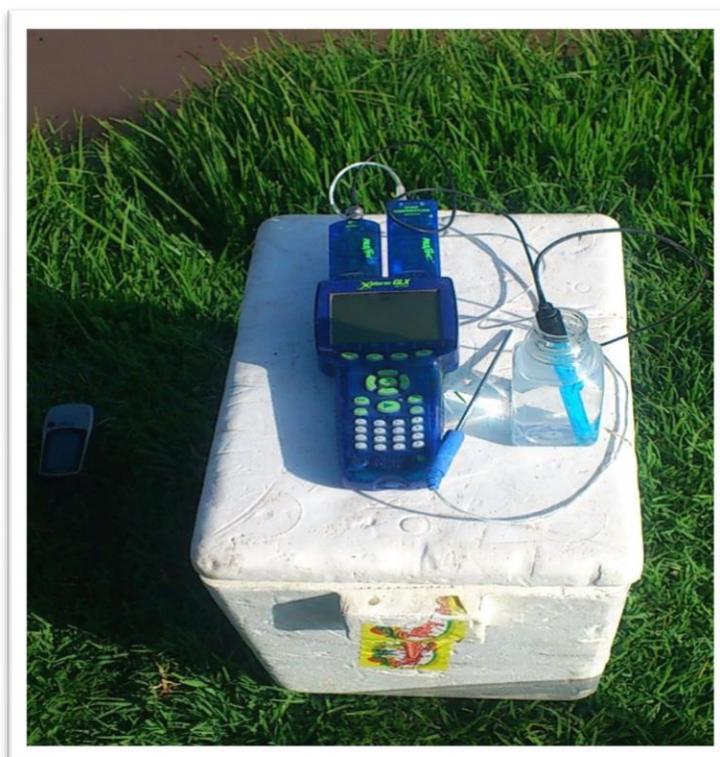
**ANEXO 4.**

**Tabla 28. Temperaturas registradas durante los 90 días de experimentación para las 4 muestras.**

<b>Temperatura °C</b>				
<b>Días</b>	<b>M-1</b>	<b>M-2</b>	<b>M-3</b>	<b>M-4</b>
<b>0</b>	15.86	16.63	16.47	16.92
1	14.2	15.5	14.4	15.1
30	13.7	14.1	13.2	13.9
50	8.5	9.2	8.9	9.1
70	12	11.6	12.3	12.1
90	17.1	16.3	16.6	16.6

**ANEXO 5.****EQUIPOS UTILIZADOS**

**Fotografía N° 1. Sensor de pH con el interface  
XPLORER GLX PASCO ps-2002.**



**MUESTREOS****Fotografía N° 2. Análisis del pH y temperatura con el sensor.****Fotografía N° 3. Muestreo del lodo residual de la laguna de estabilización secundaria.**

**Fotografía N° 4. Toma de notas del análisis realizado pH y T°.**



**Fotografía N° 5. Etiquetado de muestras de lodo residual.**



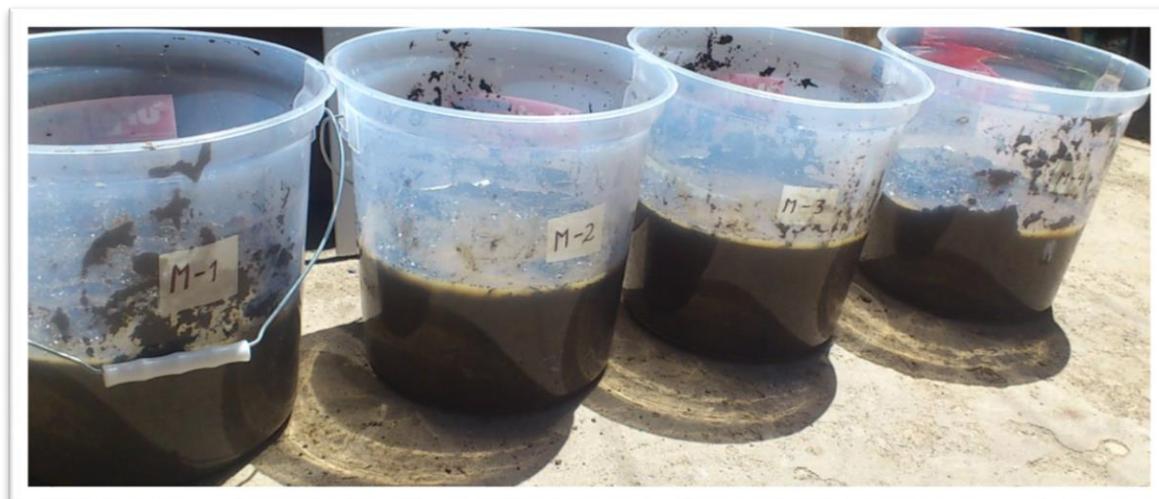
**Fotografía N° 6. Equipo de trabajo en la laguna de estabilización secundaria el espinar-puno.**



**Fotografía N° 7. Secado del lodo residual (temperatura ambiente)**



**Fotografía N° 9. Lodo residual después del proceso de secado.**



**Fotografía N° 10. Medición del pH y T°.**



**Fotografía N° 8. Colocando muestra de lodo residual en la mufla.**



**Fotografía N° 11. Realización del análisis de la humedad en el lodo residual.**



**Fotografía N° 12. Vermicomposteo obtenido de los 90 días.**



**Fotografía N° 13. Lombrices después del vermicomposteo**

