



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química

**Evaluación de la remoción de coliformes fecales y *Salmonella* spp., en lodos provenientes de una planta tratadora de aguas residuales mediante un composteo aerobio adicionado con *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens***

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental

Presenta

Ing. Karla Daniela Montes Martínez

Dirigido por:

Dr. José Alberto Rodríguez Morales

Co-dirigido por:

Dr. Miguel Ángel Ramos López

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2024

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



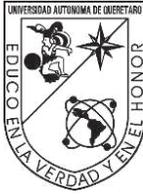
**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Química

Maestría en Ciencia y Tecnología Ambiental

**Evaluación de la remoción de coliformes fecales y *Salmonella* spp., en lodos provenientes de una planta tratadora de aguas residuales mediante un composteo aerobio adicionado con *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens***

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental

Presenta

Ing. Karla Daniela Montes Martínez

Dirigido por:

Dr. José Alberto Rodríguez Morales

Co-dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López

Dr. José Alberto Rodríguez Morales  
Presidente

Dr. Miguel Angel Ramos López  
Secretario

Dr. Juan Campos Guillen  
Vocal

Dr. Aldo Amaro Reyes  
Suplente

Dra. Janet Ledesma García  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
15 de enero del 2024  
México

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a mi madre Rosalia, que siempre creyó en mí, a mis hermanas, Ivonne e Itzel, agradezco sus palabras de aliento cuando las requerí.

A mis amigos de generación, Francisco Javier Flores Gallardo, María Guadalupe Hernández Guerrero, Karla Hernández Caracheo y Enrique Rodríguez Núñez, por su ayuda, consejos y ánimo que me brindaron durante este tiempo.

A mi director el Dr. José Alberto Rodríguez Morales, co-director Dr. Miguel Angel Ramos López, a mis sinodales Dr. Juan Campos Guillen, Dr. Aldo Amaro Reyes y Dra. Janet Ledesma García, por su apoyo, consejos y tiempo para el desarrollo de esta investigación.

# ÍNDICE

# Página

AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE	ii
ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Tratamiento de agua	3
2.1.1 Pre-tratamiento	3
2.1.2 Tratamiento primario	4
2.1.3 Tratamiento secundario	4
2.1.4 Tratamiento terciario	4
2.2 Lodos provenientes de una planta tratadora de agua	5
2.2.1 Tratamiento químico	6
2.2.2 Tratamiento físico	6
2.2.3 Tratamiento biológico	6
2.3 Agentes contaminantes presentes en lodos	7
2.3.1 Coliformes fecales	8
2.3.2 <i>Salmonella</i> spp.	8
2.4 Proceso de compostaje	9
3. HIPOTESIS	13
4. OBJETIVOS	14
4.1 Objetivo general	14
4.2 Objetivos particulares	14
5. METODOLOGÍA	15
5.1 Sitio de estudio	15
5.2 Lodos de la planta de tratamiento de agua residual del Campus Aeropuerto	15
5.3 Propiedades físicas, químicas y biológicas de los lodos residuales	16
5.4 Ensayos para el tratamiento de lodos residuales	17
5.5 Establecimiento de compostas	18
5.6 Propiedades físicas, químicas y biológicas de las compostas	19
5.7 Producción de rábano	19
5.8 Determinación de <i>Salmonella</i> spp., y coliformes fecales de rábano	20
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
6.1 Caracterización del lodo	21
6.2 Composte del lodo	23
6.3 Caracterización de las compostas	26
6.4 Determinación de <i>Salmonella</i> spp., y coliformes fecales de rábano	29

7. CONCLUSIONES	30
8. REFERENCIAS	32

<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>Página</b>
<b>Cuadro 1.</b> Diseño experimental	17
<b>Cuadro 2.</b> Composición de los tratamientos	17
<b>Cuadro 3</b> Propiedades físicas del lodo generado	21
<b>Cuadro 4.</b> Propiedades químicas del lodo generado	21
<b>Cuadro 5.</b> Propiedades microbiológicas del lodo generado	22
<b>Cuadro 6.</b> Propiedades microbiológicas de los sustratos	23
<b>Cuadro 7.</b> Propiedades físicas de los tratamientos	28
<b>Cuadro 8.</b> Propiedades químicas de los tratamientos	29
<b>Cuadro 9.</b> Propiedades microbiológicas de los tratamientos	29
<b>Cuadro 10.</b> Propiedades biológicas de los rábanos producidos por cada tratamiento.	29

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> a) Planta número 4 del campus aeropuerto b) Salida de lodos	34
<b>Figura 2.</b> a) Planta de agua con bombas encendidas b) Lodos homogenizados	35
<b>Figura 3.</b> Proceso de secado	35
<b>Figura 4.</b> Distribución diseño experimental	37
<b>Figura 5.</b> Compostas maduras	38
<b>Figura 6.</b> Producción de rábano	39
<b>Figura 7.</b> a) Disminución de Coliformes Fecales a lo largo del tiempo, b) Disminución de <i>Salmonella</i> spp., a lo largo del tiempo	43
<b>Figura 8.</b> Comportamiento de temperatura a lo largo del tiempo	44
<b>Figura 9.</b> Comportamiento del pH a lo largo del tiempo	45

## RESUMEN

El exceso de lodos de depuradora es un subproducto de las plantas tratadoras de agua considerado un problema ambiental debido a la gran cantidad de patógenos, metales pesados y demás componentes que contienen. Para su tratamiento se emplean diversos tratamientos químicos, físicos o biológicos, siendo este último el más usado, dentro de los tratamientos biológicos se tienen diversas técnicas, como la digestión aerobia, anaerobia, entre otros, entre los cuales, el compostaje es la técnica más usada para estabilizarlos y obtener un residuo benéfico para el suelo. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de diez diferentes tratamientos de compostaje con diferentes composiciones de sustratos cada uno y algunos adicionados con *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens*, para tratar los lodos provenientes de la planta tratadora de agua del Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro y remover el contenido de coliformes fecales y *Salmonella* spp. de ellos. Una vez establecidas las compostas se monitoreo la temperatura y pH cada tercer día, la conductividad eléctrica cada cinco días y coliformes fecales y *salmonella* spp., cada siete días. Obteniendo que los tratamientos adicionados con microorganismos fueron los primeros en llegar a la fase de maduración, en cuanto el tiempo para la disminución de coliformes fecales no existió diferencia significativa entre tratamientos.

(**Palabras clave:** Lodos residuales, compostaje, plantas tratadoras de agua)

### Declaración de responsabilidad de estudiante:

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporte detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

---

## **ABSTRACT**

Excess sewage sludge is a byproduct of water treatment plants considered an environmental problem due to the large amount of pathogens, heavy metals and other components it contains. For its treatment, various chemical, physical or biological treatments are used, the latter being the most used. Among the biological treatments, there are various techniques, such as aerobic and anaerobic digestion, among others, among which, composting is the most common technique. used to stabilize them and obtain a beneficial residue for the soil. The objective of this work was to evaluate the efficiency of ten different composting treatments with different compositions of substrates each and some added with *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* and *Trichoderma virens*, to treat the sludge coming from the water treatment plant at the Airport Campus. the Autonomous University of Querétaro and remove the content of fecal coliforms and *Salmonella* spp. from them. Once the composts were established, temperature and pH were monitored every third day, electrical conductivity every five days, and fecal coliforms and salmonella spp. every seven days. Obtaining that the treatments added with microorganisms were the first to reach the maturation phase, regarding the time for the reduction of fecal coliforms there was no significant difference between treatments.

**(Keywords:** Waste sludge, composting, water treatment plants)

# 1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

A medida que se tratan las aguas residuales, pasan por una serie de procesos que reducen las concentraciones de contaminantes, al residuo sólido insoluble que queda después del tratamiento de aguas residuales se le conoce como biosólidos, lodos residuales o lodos de depuradora.

La eliminación segura de ellos es una de las principales preocupaciones a solucionar, pues estos residuos pueden ser potencialmente peligrosos para el ambiente y para la salud humana, ya que pueden contener agentes biológicos tales como virus, hongos, protozoarios, bacterias; de estas son de especial interés los coliformes fecales y la *Salmonella* spp. Por lo que existe una variedad de técnicas de tratamiento que incluyen procesos físicos como secado térmico, ya sea por incineración o exposición directa al sol, o procesos de espesamiento del lodo, como la sedimentación, flotación o centrifugación; procesos químicos como alcalinización; procesos biológicos, como digestión anaeróbica y el compostaje, el objetivo de ellos es reducir su volumen, reducir la cantidad de patógenos y demás contaminantes, estabilizar los compuestos orgánicos con la finalidad de facilitar su transporte y minimizar los efectos adversos como eutrofización, contaminación de suelo y agua, además de aprovechar los nutrientes contenidos en estos biosólidos, por lo que pueden ser idóneos para usarse en el suelo como acondicionadores de suelos o abonos. Para ello los principales métodos de estabilización son los biológicos, de estos el compostaje ha sido evaluada previamente demostrando que reduce coliformes fecales y la *Salmonella* spp., entre 40 % y 90 % respectivamente.

El compostaje es un proceso biológico el cual ocurre cuando consorcios de microorganismos eliminan o reducen contaminantes contenidos en los lodos teniendo como resultado un producto benéfico para el suelo, ya que mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Una técnica para reducir el tiempo de maduración del compost y hacer el tratamiento más eficiente es la adición de microorganismos intensificando el proceso de degradación.

Es por ello que en la presente investigación se evaluará una propuesta basada en la estabilización de lodos provenientes de una planta tratadora de agua residual mediante un composteo aerobio adicionado con *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens*.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1 TRATAMIENTO DE AGUA**

Durante los últimos años la contaminación del agua se ha convertido en uno de los principales problemas ambientales. El uso de este recurso en actividades domésticas, agrícolas, industriales, mineras, entre otros, producen aguas residuales que contienen contaminantes indeseables. (Crini et. al., 2018; Englade et. al., 2015; Ou et. al., 2018; Rogers, et. al., 1996).

El tratamiento de aguas residuales es el proceso que se lleva a cabo para restaurar el agua contaminada por la actividad humana a una calidad deseable. Para ello se han empleado una serie de métodos que implican procesos físicos, químicos y biológicos o una combinación de ellos. (Crini et. al., 2018; Englade et. al., 2015; Ou et. al., 2018; Rogers et. al., 1996).

Este tratamiento generalmente consta de una serie de pasos, un pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario, a lo largo de estos pasos, como resultado de la remoción de contaminantes del agua residual se generan biosólidos o lodos residuales los cuales requieren un tratamiento posterior por los sus altos volúmenes y la gran cantidad de patógenos que contienen (Crini et. al., 2018; Englade et. al., 2015; Ou et. al., 2018; Rogers et. al., 1996).

#### **2.1.1 Pretratamiento**

El tratamiento preliminar o pretratamiento consta de métodos físicos y mecánicos. Algunos de ellos son el filtrado por tamizado de barras, equalización, neutralización para ajustar el pH, desengrasado, flotación, sedimentación primaria, diseñados para eliminar partículas de gran tamaño, eliminar sólidos, eliminar sustancias tóxicas o inhibidoras y separar aceite y grasa del afluente (Crini et. al., 2018; Englade et. al., 2015; Ou et. al., 2018).

Estos métodos se emplean para hacer que las aguas residuales sean compatibles y/o aptas para los procesos de tratamiento posteriores (Englade et. al., 2015).

### **2.1.2 Tratamiento primario**

El tratamiento primario consiste en métodos fisicoquímico y químico, para la separación de contaminantes mediante cribado, tamizado o trituración, seguido de la eliminación de arena y por último la sedimentación antes del tratamiento secundario (Crini et. al., 2018; Englade et. al., 2015).

### **2.1.3 Tratamiento secundario**

El tratamiento secundario o purificación utiliza métodos químicos y agrega procesos biológicos, que comúnmente es lodo activado, filtración por goteo o sistemas de tratamiento de crecimiento suspendido con el propósito de lograr un efluente de alta calidad. Dado que la materia orgánica se oxidará a dióxido de carbono y agua en presencia de microorganismos, oxígeno y nutrientes, para el tratamiento secundario se deben tener condiciones adecuadas como mantener un número adecuado de microorganismos aclimatados que puedan metabolizar la materia orgánica, un suministro de oxígeno y nutrientes y un método de contención con el fin de remover materiales orgánicos ricos en carbono, nitrógeno y fósforo (Crini et. al., 2018; Englade et. al., 2015; Ou et. al., 2018).

### **2.1.4 Tratamiento terciario**

Por último, el tratamiento terciario o final consiste en métodos físicos y químicos que incluyen precipitación, filtración, oxidación química, coagulación y floculación, extracción con aire, intercambio iónico, adsorción, procesos de separación por membrana, nitrificación y/o desnitrificación para mejorar la calidad del agua y eliminar compuestos tóxicos, compuestos orgánicos persistentes, contaminantes no convencionales, patógenos, compuestos orgánicos volátiles (VOC), fósforo, nitrógeno, metales pesados (Crini et. al., 2018; Englade et. al., 2015; Ou et. al., 2018).

## **2.2 LODOS PROVENIENTES DE UNA PLANTA TRATADORA DE AGUA**

Los lodos residuales o biosólidos son el subproducto del proceso de tratamiento de aguas residuales formados por la concentración de los sólidos contenidos en el efluente y que son removidos de las aguas tratadas. Estos lodos son altamente problemáticos debido a que se generan grandes volúmenes y contienen altas concentraciones de metales pesados, materia orgánica y microorganismos como virus, protozoos y entre otros componentes que pueden causar daños ambientales y a la salud, por lo cual requieren un tratamiento antes de su disposición final (Englade et. al., 2015; Shen et. al., 2015; Díaz et. al., 2015).

Los objetivos de estos tratamientos son, reducir su volumen, destruir patógenos, eliminar agua, controlar la putrefacción y estabilizar los compuestos orgánicos con la finalidad de facilitar su transporte y minimizará los efectos adversos, además de aprovechar los nutrientes contenidos en estos biosólidos, ya que son ricos en ellos, por lo que son idóneos para usarse en la tierra como sustitutos de fertilizantes o acondicionadores de suelos, así como materia prima para la producción de energía renovable (Englade et. al., 2015; Shen et. al. 2015).

Los lodos residuales deshidratados (secos), dependiendo de los procesos de estabilización, contienen en promedio 50–70 % de materia orgánica y 30–50 % de componentes minerales (incluyendo 1–4% de carbono inorgánico), 3.4–4.0% N, 0.5–2.5% P y cantidades significativas de otros nutrientes, incluyendo micronutrientes (Kacprzak et. al., 2017).

Las alternativas que se han probaron para el tratamiento del lodo incluyen la aplicación directa al suelo, el vertido en el mar, el relleno sanitario, la incineración, espesamiento del lodo, el cual se logra mediante métodos de gravedad, flotación o centrifugación; procesos biológicos, como compostaje, tratamiento de lodos en lecho de juncos, estabilización por digestión aeróbica, anaeróbica, los cuales transforman los lodos en biosólidos estables; procesos químico como la

estabilización con cal, tratamientos físicos o térmicos como deshidratación y secado al aire (Englade et. al., 2015; Díaz et. al., 2015; Yoshida et. al., 2015; Anjum et. al., 2016; Crini et. al., 2018).

Después del tratamiento se debe tener un producto final estable, sin olores, no infeccioso y con un contenido de metales bajo como para no bioacumularse a niveles indeseables. Si los biosólidos se tratan de manera efectiva, se pueden utilizar como un recurso importante ya que se disponen en tierra y mejoran la fertilidad y labranza del suelo, mejora el crecimiento y calidad de los cultivos, se pueden emplear en vertederos para recuperar tierras devastadas por minería, actividades de fundición y recuperación de humedales (Englade et. al., 2015).

### **2.2.1 Tratamiento Químico**

Tratamientos de alta sencillez con un tiempo de contacto corto entre el reactivo y el lodo. Entre los diferentes métodos para el tratamiento químico se tiene la acidificación y la alcalinización para estabilizar los lodos; por otro lado, el método de intercambio iónico consiste en el reemplazo de metales por iones no contaminantes, desinfección química y acondicionamiento; otra técnica de tratamiento químico es la estabilización de lodos con cal que tiene como funciones principales la reducción del contenido microbiano y la disponibilidad de metales pesados (Díaz et. al., 2015; Camargo et. al., 2016; Teoh et. al. 2019).

### **2.2.2 Tratamiento Físico**

Los tratamientos físicos son tratamientos térmicos usados para sustratos contaminados con metales pesados, ya que muchos de ellos se evaporan a altas temperaturas, para alcanzar estas temperaturas se necesita una gran cantidad de energía haciéndolos costosos y poco benéficos ya que a estas temperaturas se puede provocar pérdida de materia orgánica y nutrientes, impidiendo su uso posterior como fertilizante provocando un riesgo de contaminación secundaria ya que este el residuo que dejan se disponen en el suelo. Algunos ejemplos son la electrorremediación y la incineración, centrifugación, filtración y secado (Englade et. al., 2015; Díaz et. al., 2015; Camargo et. al., 2016).

### **2.2.3 Tratamiento Biológico**

En los diferentes tratamientos biológicos de lodos residuales se digieren y degradan macromoléculas, algunos ejemplos son compostaje, tratamiento de lodos en lecho de juncos, estabilización por digestión aeróbica, anaeróbica, vermicompostaje, el cual es un proceso en el que las lombrices ingieren y digieren desechos, excretando un material húmedo, homogéneo y bajo en contaminantes (Díaz et. al., 2015; Camargo et. al., 2016; Anjum et. al., 2016).

Los tratamientos biológicos son los más comunes para estabilizar lodos y tener un residuo benéfico para el suelo (Hayany et. al., 2021).

### **2.3 AGENTES CONTAMINANTES PRESENTES EN LODOS**

Entre los patógenos de interés en los lodos de depuradora, se encuentran muchas cepas de bacterias, virus y hongos, la aplicación de ellos como abonos orgánicos crudos o mal compostados puede provocar la propagación y dispersión de bacterias patógenas como *Escherichia coli* (*E.Coli*), que produce verotoxinas que pueden producir enfermedades como síndrome urémico hemolítico; púrpura trombocitopénica y colitis hemorrágica; *Salmonella* spp. y *Listeria monocytogenes*. Por otro lado, los virus tienen una gran abundancia, diversidad y son difíciles de evaluar. En aguas residuales, los conteos virales varían de  $10^5$  a  $10^6$  28 unidades por litro, los cuales terminan en los lodos después del tratamiento de aguas residuales (Lasaridi et. al., 2018; Hayany et. al., 2021).

Debido a la dificultad de detectar y cuantificar todos los gérmenes patógenos por su gran diversidad, se puede determinar el efecto del compostaje a través de la reducción de bacterias indicadoras fecales como Coliformes fecales, Estreptococos, *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* y *Listeria monocytogenes*, en cuanto a la inactivación de virus durante el compostaje de lodos residuales hay pocos datos debido a los gastos y la complejidad de los procedimientos de monitoreo de virus (Hayany et. al., 2021).

### **2.3.1 Coliformes fecales**

Los coliformes se definen como bacilos aeróbicos o facultativamente anaeróbicos, Gram negativos, que no forman esporas, son uno de los grupos más grandes de bacterias evidentes en el agua contaminada con heces ocasionando problemas importantes en la salud pública. Los coliformes prosperan como comensales en el intestino de los animales de sangre caliente y pasan indefinidamente al medio ambiente a través de sus heces, también se denominan organismos modelo, ya que su presencia es indicativa de la prevalencia de otros patógenos. (Martin et. al., 2016; Mishra et. al., 2018).

Estas bacterias son muy receptivas a los genes de resistencia a los medicamentos y también los propagan fácilmente a otros patógenos que prevalecen en las inmediaciones, por lo que representan un potente peligro para la salud (Mishra et. al., 2018).

La mayoría de los géneros bacterianos que comprenden el grupo de coliformes, pertenecen a la familia Enterobacteriaceae, mientras que al menos un género con cepas reconocidas como coliformes, *Aeromonas*, pertenece a la familia Aeromonadaceae, de igual manera se tienen tres categorías de coliformes basadas en rasgos taxonómicos y fisiológicos: “termofílicos”, que incluyen *Escherichia coli* de origen fecal; “termofílico y ubicuo” y; “psicrotróficas”, que son puramente ambientales (Martin et. al., 2016; Mishra et. al., 2018).

### **2.3.2 Salmonella spp.**

*Salmonella* pertenece a la familia Enterobacteriaceae, caracterizada como un bacilo gramnegativo no esporulado. Es rutinariamente clasificada por serotipo, con base en la expresión de tres tipos de antígenos: (O) somático, (H) flagelar y (vi) capsular (Semedo 2018).

La *salmonella* es un anaerobio facultativo y oxidasa negativo, generalmente móvil, que produce gas a partir de la glucosa. Su temperatura de crecimiento

oscila entre 7 °C y 46 °C, con temperatura óptima de entre 35 °C y 43 °C y pH de crecimiento entre 3.8 y 9.5, con pH óptimo entre 7.0 y 7.5. (Semedo 2018).

*Salmonella* spp producen toxinas responsables de enfermedades como gastroenteritis, septicemia o fiebre tifoidea (Lasaridi et. al., 2018; Hayany et. al., 2021).

## **2.4 PROCESO DE COMPOSTAJE**

El compostaje es una técnica recomendada para la estabilización de lodos de depuradora y así evitar riesgos ambientales al mismo tiempo que se mejora la calidad del compost (Głąb et. al., 2020).

Los lodos de depuradora contienen cantidades considerables de materia orgánica y nutrientes, sin embargo, también contiene metales pesados, fármacos, hormonas, hidrocarburos aromáticos, microorganismos patógenos como huevos de helmintos, coliformes fecales, salmonella, quistes de protozoos y virus compuestos orgánicos fitotóxicos, por lo que su uso directo como fertilizante orgánico en la producción puede generar problemas ya que pueden estar más disponibles para las plantas y acumularse en el suelo, además de emisiones de gases de efecto invernadero, olores, etc, es por ello que deben estabilizarse y desinfectarse antes de su aplicación en tierras agrícolas. El compostaje para el manejo de lodos de depuradora es ampliamente usado y preferido con el fin de estabilizarlos y crear un producto de suelo maduro rico en nutrientes (Moretti et. al., 2015; Bożym et. al., 2018; Lasaridi et. al., 2018; Głąb et. al. 2020; Hayany et. al., 2021).

El compost es conocido por su eficiencia para eliminar o reducir sustancialmente los peligros potenciales relacionados con el reciclaje de lodos de depuradora además de su impacto beneficioso sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, ya que mejora la estructura del suelo, provocando una disminución en la formación de costras y la erosión. Aumenta la porosidad del

suelo, la retención de agua y la conductividad hidráulica, la concentración de materia orgánica, nutrientes y biomasa microbiana. Estos beneficios se pueden atribuir al efecto de la mezcla de suelo mineral con material orgánico menos denso (Bożym et. al. 2018; Lasaridi et. al. 2018; Głąb et. al. 2020).

El proceso de compostaje se caracteriza por la descomposición aeróbica controlada en el que consorcios complejos de microorganismos, cuya estructura depende de las condiciones ambientales y la composición del sustrato, degradan los componentes orgánicos fácilmente disponibles o los transforman en compuestos húmicos estables de los materiales, teniendo a los lodos de depuradora como fuente de nitrógeno; materiales estructurales como fuente de carbono, lignina y celulosa. Así, al final, el compost, en comparación con los lodos de depuradora, tiene un menor costo de transporte y presenta un menor riesgo para la salud. Además, reduce el riesgo de contaminación ambiental a diferencia del uso directo de lodos en el suelo ya que reduce los niveles de metales pesados, reducciones en el riesgo de lixiviación de nitratos, eliminación de patógenos y estabiliza la materia orgánica (Moretti et. al., 2015; Lasaridi et. al., 2018; Głąb et. al. 2020).

La calidad microbiológica del compost debe evaluarse antes de su uso, para ello, indicadores de bacterias fecales se vuelve útil para confirmar la seguridad del compost en términos de microorganismos patógenos, que pueden causar riesgos para la salud del sistema suelo-planta-humano (Hayany et. al., 2021).

Durante el proceso de compostaje se identifican cuatro fases:

- **Fase mesófila:** Es la fase inicial del proceso y ocurre entre los 25 y 40 °C, en donde compuestos simples como los azúcares y proteínas son degradados por hongos y actino bacterias, denominados descomponedores primarios u organismos mesófilos, la actividad de descomposición de estos organismos inducen a un aumento de temperatura en el montículo.

- **Fase termófila:** Conforme aumenta la temperatura, los organismos mesófilos son reemplazados por organismos termófilos y se continúa con la degradación de compuestos complejos, logrando alcanzar temperaturas de hasta 80 °C. Es probable que este aumento final de temperatura no se debe a la actividad microbiana, sino más bien al efecto de reacciones exotérmicas abióticas en las que enzimas de actino bacterias estables a la temperatura podrían estar involucradas. En el montículo de la composta no se alcanza la misma temperatura en todas las zonas, es por ello que mediante giros regulares se debe llevar cada parte del sustrato se mueva hacia la zona central (zona con mayor temperatura). La fase termófila es importante para la higienización de la composta, pues debido a las altas temperaturas se eliminan patógenos humanos y vegetales; semillas de malas hierbas y las larvas de insectos. Sin embargo, al llegar a temperaturas superiores a 70° C, la mayoría de los organismos mesófilos mueren, por lo que llegar a la fase de enfriamiento después de este pico de temperatura llega a ser un proceso tardado, lo cual puede evitarse mediante medidas apropiadas de recolonización.
- **Fase de enfriamiento (segunda fase mesófila):** Conforme se agotan los sustratos la actividad de los organismos termófilos cesa y la temperatura comienza a disminuir, con ello, los organismos mesófilos recolonizan, ya sea a partir de esporas supervivientes, mediante propagación desde micro nichos protegidos o mediante inoculación externa. Mientras que en la primera fase mesófila dominan los organismos con capacidad de degradar azúcares, oligosacáridos y proteínas, la segunda fase mesófila se caracteriza por organismos que degradan almidón o la celulosa, entre ellos se encuentran tanto bacterias como hongos.
- **Fase de maduración:** Durante esta fase, la calidad del sustrato disminuye y la composición de la comunidad microbiana se altera por completo. Generalmente, la proporción de hongos aumenta, mientras que el número de bacterias disminuye. Se forman compuestos que ya no son

degradables, como los complejos lignina-humus, y se vuelven predominantes.

### **3. HIPÓTESIS**

Un sistema de composteo adicionado con *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens* para tratar lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas dará un biosólido con niveles de *Salmonella* spp., y coliformes fecales dentro de los parámetros para su uso como acondicionador de suelos.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo General**

Evaluar la eficiencia de un sistema de composteo aerobio adicionado con *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens*, para la disminución de coliformes fecales y *Salmonella* spp., en lodos provenientes de plantas tratadoras de aguas residuales

### **4.2 Objetivos Particulares**

1. Desarrollar un método de composteo para remediar lodos provenientes de una planta tratadora de agua residual.
2. Determinar la eficiencia de remediación mediante composteo aerobio adicionado con *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens* en la reducción de *Salmonella* spp., y coliformes fecales presentes en lodos.
3. Determinar la presencia de *Salmonella* spp., y coliformes fecales presentes en rábanos producidos con las compostas realizadas.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Sitio de estudio

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de aguas, ubicado en el Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro (CA-UAQ) (20.624964, -100.366298).

### 5.2 Lodos de la planta de tratamiento de agua residual de Campus Aeropuerto.

Se realizó un muestreo de lodos residuales provenientes de la planta número 4 del CA-UAQ, la cual recibe agua residual del mismo campus (Figura 1a).



**Figura 1.** a) Planta número 4 del campus aeropuerto b) Salida de lodos

El muestreo se realizó por el método de muestreo discrecional, el cual consistió en encender previamente las bombas de la planta para airear el estanque durante 30 min (Figura 2a) y homogenizar los sólidos que están sedimentados en el estanque (Figura 2b), una vez pasado el tiempo se recolectaron 120 L de la mezcla de lodo con agua residual de la salida de lodos de la planta tratadora de agua (Figura 1b), dejando precipitar los sólidos por 48 h y por medio de decantación se eliminó la fase acuosa, este procedimiento se realizó 7 veces, pasados 14 d se pusieron a secar directamente al sol por 21 d (Figura 3), el lodo obtenido fue triturado en un molino de nixtamal manual y tamizado con un tamiz del número 10 con la finalidad de obtener fracciones menores a 2 mm.



**Figura 2.** a) Planta de agua con bombas encendidas b) Lodos homogenizados



**Figura 3.** Proceso de secado de lodo

### 5.3 Propiedades físicas, químicas y biológicas de los lodos residuales.

Al lodo se le determinaron sus propiedades físicas (temperatura, color, conductividad eléctrica (CE), textura, Densidad aparente ( $D_a$ ), Densidad real ( $D_r$ )), químicas (pH, Potencial REDOX, Relación C-N, nitratos, N, P y K), de acuerdo con Głąb et. al., 2020; Bożym et. al., 2018; Alayu et. al., 2018, siguiendo la metodología indicada en la NOM-021-RECNAT-200 y biológicas (coliformes

fecales, *Salmonella* spp., y contenido de materia orgánica (MO)) según Alayu et. al., 2018, de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

#### 5.4 Ensayos para la remediación de lodos residuales

Después de determinar las propiedades físicas, químicas y biológicas del lodo residual, se determinó un diseño experimental para la remediación de este, mediante la técnica de composteo, para ello, se establecieron 10 tratamientos por duplicado y su distribución se realizó completamente al azar (Cuadro 1). Cada unidad experimental se colocó en un recipiente de plástico de 28 x 29.5 x 39.5 cm, a los cuales se les realizaron 20 orificios de 3/8" distribuidos en las paredes y en la parte inferior, para permitir la libre circulación de aire y agua.

**Cuadro 1.** Diseño experimental

TJR2	TJR1	THR1	TIR2	TFR1	TGR2	TER2	TDR1	TAR2	TAR1
TBR1	THR2	TFR2	TER1	TDR2	TCR1	TBR2	TGR1	TCR2	TIR1

Donde: TA es el control 1, TB es el control 2, TC es la composta 1, TD es la composta 2, TE es la composta 3, TF es la composta 4, TG es la composta 5, TH es la composta 6, TI es la composta 7 y TJ es la composta 8, y R1 y R2 son las repeticiones para cada tratamiento.

Cada unidad experimental estuvo conformada por diferentes mezclas de sustratos los cuales fueron lodo, suelo, heces bovinas, paja y una mezcla de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma virens*, ( $2 \times 10^{10}$  UFC g<sup>-1</sup>) y de *Bacillus subtilis* ( $2 \times 10^{10}$  UFC g<sup>-1</sup>), en diferentes porcentajes (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Composición de los tratamientos

Tratamiento	Lodo (%)	Suelo (%)	Heces (%)	Paja (%)	Mezcla M.O. (%)
Control 1 (TA)	-	50	50	-	-
Control 2 (TB)	50	50	-	-	-
Composta 1 (TC)	25	40	10	25	-
Composta 2 (TD)	25	40	25	10	-

Composta 3 (TE)	25	40	35	-	-
Composta 4 (TF)	25	40	-	35	-
Composta 5 (TG)	25	40	10	24.9	0.1
Composta 6 (TH)	25	40	24.9	10	0.1
Composta 7 (TI)	25	40	34.9	-	0.1
Composta 8 (TJ)	25	40	-	34.9	0.1

Donde: M.O. son microorganismos

El suelo utilizado como sustrato se obtuvo de la UAQ-CA, el cual fue tamizado previamente para eliminar partículas mayores a 2 mm, las heces bovinas y el resto vegetal fueron recolectados de la ciudad de Querétaro (20°32'39.6"N 100°15'58.7"O) y (20°34'08.0"N 100°22'28.7"O) respectivamente.

### 5.5 Establecimiento de las compostas.

Una vez que se tuvo el diseño experimental se procedió a establecer cada unidad experimental al aire libre en el CA-UAQ (Figura 4).



**Figura 4.** Distribución diseño experimental

A partir del establecimiento de ellas, se hicieron mediciones de temperatura y pH cada tercer día, así como de conductividad eléctrica cada 5 d, coliformes fecales y *Salmonella* spp., cada 7 d, para cada tratamiento. Se realizaron volteos a las compostas cada 14 d por 204 d, pasado este tiempo se determinó si llegaron a la fase de maduración. La fase de maduración se determinó primeramente de

manera organoléptica (Figura5), cuando la composta tuvo un olor a petricor, color marrón oscuro, poca humedad y una apariencia homogénea, esto es, que no se reconocieron restos de los sustratos iniciales y se confirmó con los parámetros de pH, C.E., materia orgánica (MO), relación C/N, nitrógeno total y carbón orgánico, según la NMX-AA-180-SCFI-2018.



**Figura 5.** Compostas maduras

### **5.6 Propiedades físicas, químicas y biológicas de las compostas**

Una vez madura la composta se acondicionó, para ello se realizó una deshidratación y un tamizado con un tamiz del número 10, se tomó una muestra simple de 1 kg por cada repetición de cada tratamiento, éstas se mezclaron quedando una muestra compuesta por tratamiento a la cual se le determinaron las propiedades antes mencionadas en el punto 5.3.

### **5.7 Producción de rábano.**

Se tomó una muestra de la composta ya acondicionada las cuales fueron transportadas en bolsas selladas al Laboratorio de Aguas, cada muestra de tratamiento fue usada para la producción de rábano en un contenedor diferente por tratamiento.

Los contenedores tuvieron una profundidad de 15 cm, a los cuales se llenaron con la composta y se les realizaron surcos de 1 a 1.5 cm de profundidad con una distancia de 8 cm entre ellos, en donde se colocaron las semillas de rábano con 5 cm entre cada una (Figura 6).

Posteriormente se realizó un riego a los cultivos cada tercer día, hasta que fueron cosechados.



**Figura 6.** Producción de rábano

### **5.8 Determinación de *Salmonella* spp., y coliformes fecales en rábano.**

Una vez cosechado el rábano se realizó un muestreo aleatorio de 3 rábanos a los cuales se les determinaron el contenido de *Salmonella* spp., y coliformes fecales.

La toma de muestras y su transporte se llevaron a cabo de acuerdo con la NOM-109-SSA1-1994, la preparación de ellas se realizó de acuerdo a la NOM-110-SSA1-1994, para posteriormente hacer los análisis de *Salmonella* spp., y coliformes fecales siguiendo las normas NOM-114-SSA1-1994, NOM-113-SSA1-1994 y NOM-112-SSA1-1994.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Caracterización del lodo

Las propiedades físicas del lodo generado se muestran en el cuadro 3, donde se muestra una humedad de 86.5 %. El color obteniendo un tono negro (GLEY 1 2.5/N) base seca y gris muy oscuro (GLEY 1 3/N) base húmeda. Mientras que la CE fue de 5.5 dS m<sup>-1</sup>, lo cual se interpreta como un suelo salino que afecta los rendimientos de la mayoría de los cultivos de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 y la USDA 2015. La clase textural indica un lodo arenoso.

**Cuadro 3** Propiedades físicas del lodo generado

	Color		Humedad %	Da g ml <sup>-1</sup>	Dr g ml <sup>-1</sup>	CE dS m <sup>-1</sup>	%		
	Seco	Húmedo					Arena	Arcilla	Limo
<b>LODO</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	86.5	0.6	1.4	5.5	90.8	7.2	2

Las propiedades químicas del suelo se presentan en el cuadro 4, el pH de 6.25 corresponde a un suelo ligeramente ácido de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 y la USDA 2015, la CIC de 84.4 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> indica un suelo muy altamente fértil, mientras que el nitrógeno total de 3.3 % corresponde un valor muy alto, un valor alto de fósforo de 296 mg kg<sup>-1</sup>, Ca de 11 399.9 mg kg<sup>-1</sup> y potasio 1 450 mg kg<sup>-1</sup>, de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

**Cuadro 4** Propiedades químicas del lodo generado

	pH	Potencial Redox	C orgánico oxidable %	N total %	P mg kg <sup>-1</sup>	K mg kg <sup>-1</sup>	CA mg kg <sup>-1</sup>	MG mg kg <sup>-1</sup>	NA mg kg <sup>-1</sup>	C/N	CIC Cmol(+) kg <sup>-1</sup>
		Eh[mV]									
<b>LODO</b>	6.25	256.2	55.1	3.3	296	1 450	11 399.9	1 430	2 755.4	16.6	84.4

Reyes-Araujo et al., 2020, caracterizaron el lodo de la planta tratadora de aguas residuales municipales Toluca Norte, Operadora de Ecosistemas, reportando un valor de pH de 7.1 que se clasificó como neutro, el cual es ligeramente mayor al reportado en esta investigación. En cuanto a la CE reportaron un suelo ligeramente salino, con valor de 3 dS m<sup>-1</sup>, el cual fue menor que el obtenido en esta investigación. Lugo et al., 2017, realizaron una caracterización de lodo residual para la misma planta, reportando valores de pH de 6.87, el cual según la NOM-021-RECNAT-2000 y la USDA 2015, fue clasificado como neutro, al igual que el lodo utilizado para esta investigación. El valor de CE de 3 dS m<sup>-1</sup> no hay variación, en la CIC reportaron un valor de 37.2 Cmol(+) kg<sup>-1</sup> fue menor en comparación con el obtenido en la presente investigación, de igual manera para el P y K de 21.8 mg kg<sup>-1</sup> y 54 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente. Hayany et al., 2020, realizaron la caracterización fisicoquímica de un lodo residual proveniente de la planta de aguas residuales municipal de la ciudad de Chichaoua en Marruecos, este lodo presentó un pH de 7.22, lo que indica un suelo neutro y humedad del 37 %.

Para los parámetros biológicos que se muestran en el cuadro 5 se obtuvieron 4 600 000 NMP g<sup>-1</sup> en base seca para coliformes fecales y <300 NMP g<sup>-1</sup> en base seca para *Salmonella* spp., de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002 los valores de *Salmonella* spp., se encontraron en el límite máximo permisible para una clase C, sin embargo, para coliformes fecales estuvieron por encima del límite un 113 %.

**Cuadro 5** Parámetros biológicos del lodo generado

		<b>Máximos permisibles para patógenos en lodos y biosólidos según la NOM-004-SEMARNAT-2002</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Clase A Excelente</b>	<b>Clase B Excelente o Bueno</b>	<b>Clase C Bueno</b>

Coliformes Fecales	4 600 000 NMP g <sup>-1</sup> en base seca	< 1 000 NMP g <sup>-1</sup> en base seca	< 1 000 NMP g <sup>-1</sup> en base seca	< 2 000 000 NMP g <sup>-1</sup> en base seca
<i>Salmonella</i> spp.	< 300 g <sup>-1</sup> en base seca	< 3 NMP g <sup>-1</sup> en base seca	< 3 NMP g <sup>-1</sup> en base seca	< 300 NMP g <sup>-1</sup> en base seca

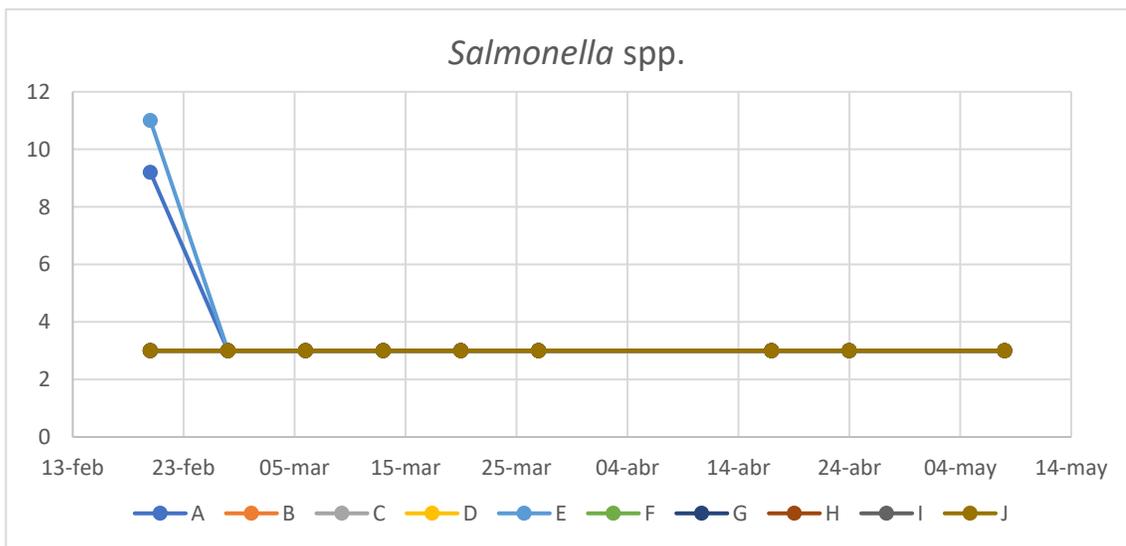
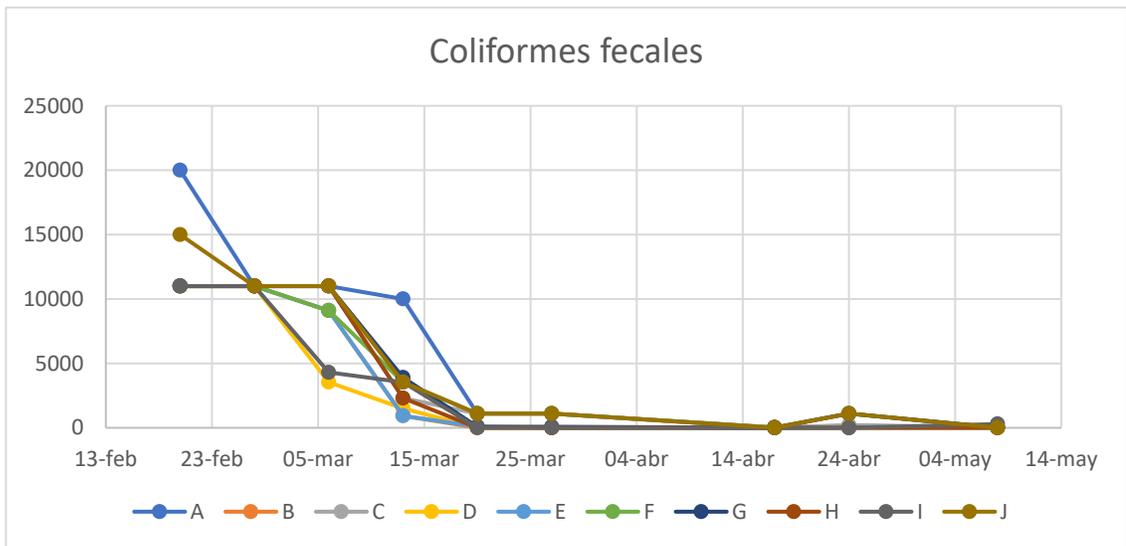
De igual manera se realizaron pruebas biológicas a los demás sustratos (Cuadro 6), los cuales salieron negativos en contenido de *Salmonella* spp., y en coliformes fecales solo las heces bovinas fueron positivas.

**Cuadro 61** Propiedades biológicas de los sustratos

SUSTRATO	PARÁMETRO	
	Coliformes Fecales NMP g <sup>-1</sup>	<i>Salmonella</i> spp. NMP g <sup>-1</sup>
Suelo	< 3	< 0.5
Heces	> 11,000	< 0.5
Paja	< 3	< 0.5

## 6.2 Composte del lodo

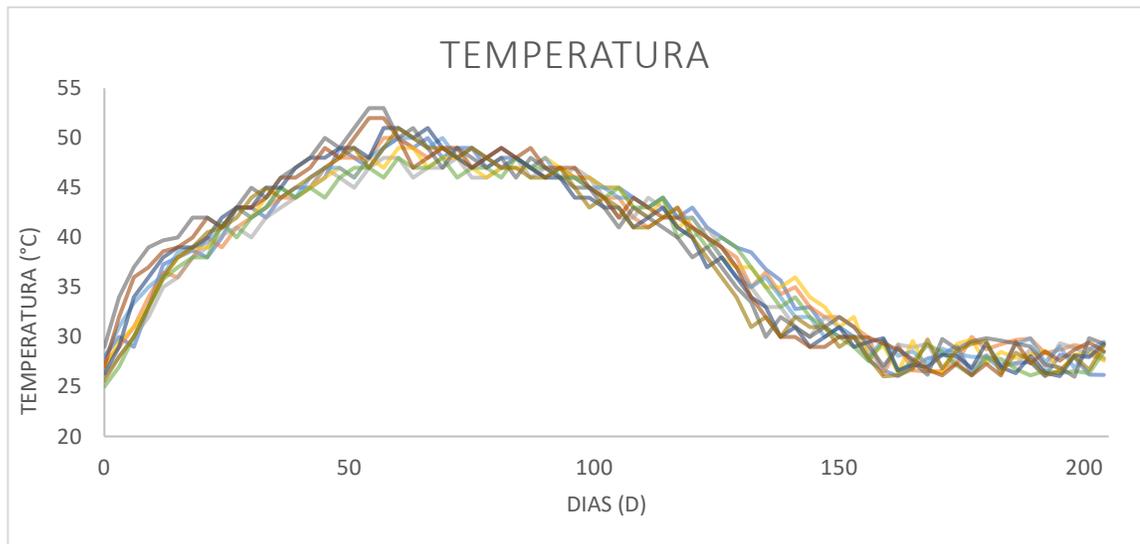
Desde el momento que se colocaron los tratamientos se observó una reducción en el contenido de coliformes Figura 7 a), hasta que se obtuvieron los límites máximos permisibles para una clase A, esto en un tiempo de 77 d. La Figura 7 b) muestra el contenido de *Salmonella* spp., el cual estuvo dentro de los límites máximos permisibles desde el día 15 para la clase A de la NOM-004-SEMARNAT-2002.



**Figura 7.** a) Disminución de Coliformes Fecales a lo largo del tiempo, b) Disminución de *Salmonella* spp., a lo largo del tiempo

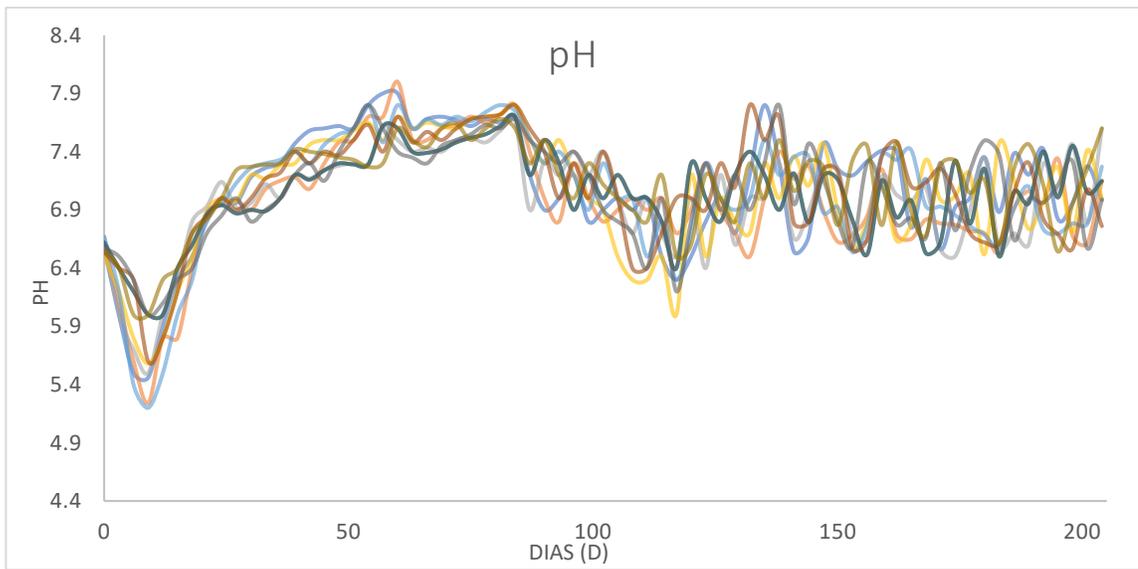
Durante el proceso de compostaje la temperatura aumentó gradualmente (Figura 8), pasando de la fase mesófila a la fase termófila (a los 40 °C) entre los 15 y los 24 d, los tratamientos que llegaron antes a esta fase fueron los cuatro que se les adicionó microorganismos (TG, TH, TI y TJ), entre los días 54 y 60 llegaron a su temperatura máxima, las cuales oscilaron entre 48 y 53 °C, siendo la temperatura máxima 53 °C para la composta 8 (TJ). Posteriormente los tratamientos llegaron a su fase mesófila nuevamente entre los días 96 y 102 con temperaturas entre

los 44 y 45 °C, la fase de maduración la alcanzaron entre los días 132 y 141, siendo nuevamente los tratamientos adicionados con microorganismos (TG, TH, TI y TJ) los primeros en alcanzar esta fase. Durante la fase de maduración la temperatura se mantuvo entre los 26 y los 30°C.



**Figura 8.** Comportamiento de temperatura a lo largo del tiempo

En cuanto al pH, en la fase inicial (fase mesófila), se tuvo una baja en el pH debido a la formación de ácidos orgánicos por la degradación de materia orgánica. Posteriormente, aumentó conforme aumentaba la temperatura, esto debido a la degradación de compuestos de naturaleza ácida, en la fase termófila el pH alcanzó su valor máximo que fue de 7.8 para el TF, los demás tratamientos alcanzaron un valor de máximo de 7.7, al pasar a la fase mesófila el pH se encontró entre 5.8 y 7.5, una vez llegada la fase de maduración, el pH se mantuvo en un rango de 6.9 y 7.9, dicho rango se encuentra dentro del indicado por la NMX-AA-180-SCFI-2018 para compostas maduras.



**Figura 9.** Comportamiento del pH a lo largo del tiempo

### 6.3 Caracterización de las compostas

Pasados 204 d, se realizaron análisis de humedad, conductividad eléctrica (CE), relación C/N, N total, C orgánico y contenido de materia orgánica (MO), para determinar si las compostas estaban maduras según los límites marcados en la NMX-AA-180-SCFI-2018.

En el cuadro 7 se presentan las propiedades físicas de cada tratamiento, los tratamientos presentaron el mismo color tanto en base seca como húmeda. Todos los tratamientos están dentro de la NMX-AA-180-SCFI-2018 para compostas maduras, sin embargo, aquellos con mayor porcentaje de humedad fueron paja los que tenían mayor porcentaje de paja. Para la conductividad eléctrica se tienen valores dentro del rango para compostas maduras para todos los tratamientos según la NMX-AA-180-SCFI-2018, teniendo suelos ligeramente salinos según la USDA 2015.

**Cuadro 7** Propiedades físicas de los tratamientos

Color	Humedad	CE
-------	---------	----

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>Seco</b>	<b>Húmedo</b>	<b>%</b>	<b>g ml-1</b>
<b>TA</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	5.2	5.8
<b>TB</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	7.34	6.6
<b>TC</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	6.9	6.45
<b>TD</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	6.43	4.04
<b>TE</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	5.87	6.9
<b>TF</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	8.56	7.3
<b>TG</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	7.15	6.7
<b>TH</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	6.6	5.19
<b>TI</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	5.22	7.5
<b>TJ</b>	Gley 1 2.5/N	Gley 1 3/N	7.75	7.43

En el cuadro 8 se presentan las propiedades químicas de cada tratamiento, la relación C/N para todos está dentro de los límites de la NMX-AA-180-SCFI-2018 para compostas maduras, los tratamientos (TD, TE, TH y TI), los resultados que presentaron una mayor relación C/N son aquellos en los que su composición hay mayor cantidad de heces bovinas, para el nitrógeno total también se llegó a los límites marcados en la NMX-AA-180-SCFI-2018 para compostas maduras, siendo los tratamientos con mayor porcentaje de paja (TF y TJ), los que tuvieron un mayor porcentaje de nitrógeno total. Para el parámetro de carbón orgánico se tuvieron valores muy parecidos entre los diferentes tratamientos por el contrario al nitrógeno total, los tratamientos con mayor porcentaje de paja (TF y TJ), tuvieron los valores más bajos de carbón orgánico total, nuevamente todos los tratamientos cumplieron con lo marcado por la NMX-AA-180-SCFI-2018 para compostas maduras.

**Cuadro 8** Propiedades químicas de los tratamientos

<b>TRATAMIENTO</b>	<b>C/N</b>	<b>N total</b>	<b>Carbón orgánico</b>
		<b>%</b>	<b>%</b>
<b>TA</b>	18.34	2.4	15.8
<b>TB</b>	17.93	1.36	17.59
<b>TC</b>	18.63	2.87	20.3
<b>TD</b>	24.31	1.2	23.87
<b>TE</b>	23.52	1.43	19.34
<b>TF</b>	13.2	5.4	14.78

TG	19.7	3.2	19.74
TH	25.06	1.97	24.31
TI	22.9	1.43	22
TJ	15.35	5.2	15.09

En el cuadro 9 se presentan las propiedades microbiológicas de cada tratamiento, todos los tratamientos cumplieron con los parámetros para considerarse como un biosólido de clase A según la NOM-004-SEMARNAT-2002, ya que tanto coliformes fecales como *Salmonella* spp., están por debajo del límite permisible, en cuanto al contenido de materia orgánica (MO), todos los tratamientos superaron el mínimo marcado por la NMX-AA-180-SCFI-2018 para compostas maduras, siendo los tratamientos con heces bovinas y paja (TH y TD), los más altos en este parámetro.

**Cuadro 9** Propiedades biológicas de los tratamientos

TRATAMIENTO	PARÁMETRO		
	Coliformes Fecales NMP g <sup>-1</sup>	<i>Salmonella</i> spp. NMP g <sup>-1</sup>	MO %
TA	3	< 3	33
TB	< 3	< 3	30.3
TC	< 3	< 3	25.2
TD	< 3	< 3	39.6
TE	< 3	< 3	33.7
TF	36	< 3	27.4
TG	9.4	< 3	23.8
TH	3	< 3	41.9
TI	< 3	< 3	37.9
TJ	< 3	< 3	26

#### 6.4 Determinación de *Salmonella* spp., y coliformes fecales en rábano.

Pasados 75 d se cosecharon los rábanos producidos con cada tratamiento, a los cuales se les realizaron pruebas de coliformes fecales y *Salmonella* spp., con el fin de asegurar que después del tratamiento por composteo, se obtiene un

producto que se puede utilizar como abono, los resultados (Tabla 10), indican que todos los tratamientos, sin importar su composición, pueden ser usados para la producción de esta hortaliza.

**Cuadro 10** Propiedades biológicas de los rábanos producidos por cada tratamiento.

RÁBANO	PARÁMETRO	
	Coliformes Fecales NMP g <sup>-1</sup>	<i>Salmonella</i> spp. NMP g <sup>-1</sup>
TA	3	< 3
TB	< 3	< 3
TC	< 3	< 3
TD	< 3	< 3
TE	< 3	< 3
TF	< 3	< 3
TG	3	< 3
TH	3	< 3
TI	< 3	< 3
TJ	< 3	< 3

## 7. CONCLUSIONES

La problemática actual de los excedentes de lodos activados producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante reactores biológicos aerobios, es de suma importancia ya que estas reciben diversos influentes las cuales contienen gran contenido de materia orgánica, agua residual tratada, algunos sólidos y sobre todo microorganismo patógenos que son perjudiciales para la salud humana, los cuales no han sido caracterizados ni cuantificados, por lo que es urgente realizar en coordinación con las autoridades locales, municipales, estatales y federales que dichas descargas de las aguas residuales a las plantas de tratamiento sean cuantificadas, así como el volumen y características de las descargas.

Con relación a la eficiencia de los sistemas, la mayor parte de los sistemas de tratamiento cumplen con su propósito de remover cargas orgánicas, pero los diseños de estas plantas no están enfocados a remover nutrientes, por lo que no alcanzan a cumplir las normas para nitrógeno y fósforo. Se hace necesario hacer algunas modificaciones a los sistemas o agregar etapas para la remoción de estos.

En el experimento realizado la caracterización del lodo generado los resultados mostrados se llegan a la conclusión de que el suelo es salino el cual afecta los rendimientos para la gran mayoría de los cultivos. Por lo que respecta a la clase textural de acuerdo con los resultados se concluye que es un lodo de tipo arenoso.

Por otro lado, las propiedades químicas del suelo estudiado y caracterizado se concluyen que es un suelo ligeramente ácido, además de que es un suelo altamente fértil.

En lo referente a la realización a las compostas realizadas y caracterizadas se concluyeron que de acuerdo al análisis de humedad, conductividad eléctrica (CE), relación C/N, N total, C orgánico y contenido de materia orgánica (MO).

Respecto a las propiedades físicas, químicas y la relación C/N de cada tratamiento, se concluye que los tratamientos presentaron el mismo color tanto en base seca como húmeda, y todos los tratamientos están dentro de la Norma NMX-AA-180-SCFI-2018 para compostas maduras.

De acuerdo con su calidad microbiológica de cada tratamiento, todos los tratamientos cumplieron con los parámetros, por lo que se concluye que debe de considerarse como un biosólido de clase A según la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Por lo que las características benéficas de estas compostas podrían aportar a los suelos agrícolas son: alto porcentaje de humedad; materia orgánica; capacidad de intercambio catiónica; alto contenido de nutrimentos mayores; concentración de micronutrientes adecuada.

Durante el procesamiento de las compostas, no se presentaron olores desagradables a distancias mayores de cuatro metros y además, el ambiente cerrado no permitió la dispersión de patógenos por vectores. La implementación de esta práctica podría ser benéfica modificando los mecanismos actuales de tratamiento, manejo y disposición de los lodos a costos bajos.

## 8.REFERENCIAS

Alayu, E., Leta, S., & Aragaw, T. (2018). Characterization of the Physicochemical and Biological Properties of Kombolcha Brewery Wastewater Treatment Plant Bio-solid in Relative to Agricultural Uses.

Anjum, M., Al-Makishah, N. H., & Barakat, M. A. (2016). Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 615–632.

Bożym, M., & Siemiątkowski, G. (2018). Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environmental Science and Pollution Research*.

Camargo, F. P., Sérgio Tonello, P., dos Santos, A. C. A., & Duarte, I. C. S. (2016). Removal of Toxic Metals from Sewage Sludge Through Chemical, Physical, and Biological Treatments—a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(12).

Crini G., & Lichtfouse E. (2018). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater Treatment. *Environmental Chemistry Letters* (2019) 17:145–155.

Díaz. A., Veliz, A., Eliet, A., & Bateller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. CENIC. *Ciencias Químicas*, vol. 46, pp. 1-10.

Du, X., Li, B., Chen, K., Zhao, C., Xu, L., Yang, Z., Sun, Q., Chandio. F., & Wu, G. (2020). Rice straw addition and biological inoculation promote the maturation of aerobic compost of rice straw biogas residue. *Biomass Conversion and Biorefinery*.

Englande, A. J., Krenkel, P., & Shamas, J. (2015). *Wastewater Treatment & Water Reclamation*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences.

Festa, S., Coppotelli, B. M., & Morelli, I. S. (2016). Comparative bioaugmentation with a consortium and a single strain in a phenanthrene-contaminated soil: Impact on the bacterial community and biodegradation. *Applied Soil Ecology*, 98, 8–19.

Głąb, T., Żabiński, A., Sadowska, U., Gondek, K., Kopeć, M., Mierzwa-Hersztek, M., Tabor, S., & Stanek-Tarkowska, J. (2020). Fertilization effects of compost produced from maize, sewage sludge and biochar on soil water retent ion and chemical properties. *Soil and Tillage Research*, 197, 104493.

Hayany, B., Fels, L., Ouhdouch, Y., & Hafidi, M. (2020). Fate of pathogenic microorganisms during lagooning sludge composting and exploration of bacteriophages as indicator of hygienization. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101268.

Kacprzak, Małgorzata; Neczaj, Ewa; Fijałkowski, Krzysztof; Grobelak, Anna; Grosser, Anna; Worwag, Małgorzata; Rorat, Agnieszka; Brattebo, Helge; Almås, Åsgeir; Singh, Bal Ram (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156(), 39–46.

Knap, I., Kehlet, A. B., Bennedsen, M., Mathis, G. F., Hofacre, C. L., Lumpkins, B. S., & Lay, A. (2011). *Bacillus subtilis* (DSM17299) significantly reduces *Salmonella* in broilers. *Poultry Science*, 90(8), 1690–1694.

Lasaridi, K. E., Manios, T., Stamatiadis, S., Chroni, C., & Kyriacou, A. (2018). The Evaluation of Hazards to Man and the Environment during the Composting of Sewage Sludge. *Sustainability*, 10(8), 2618.

Martin, N. H., Trmčić, A., Hsieh, T.-H., Boor, K. J., & Wiedmann, M. (2016). The Evolving Role of Coliforms As Indicators of Unhygienic Processing Conditions in Dairy Foods. *Frontiers in Microbiology*, 7.

Mishra, M., Arukha, A. P., Patel, A. K., Behera, N., Mohanta, T. K., & Yadav, D. (2018). Multi-Drug Resistant Coliform: Water Sanitary Standards and Health Hazards. *Frontiers in Pharmacology*, 9.

Moretti, S. M. L., Bertocini, E. I., & Abreu-Junior, C. H. (2015). Composting sewage sludge with green waste from tree pruning. *Scientia Agricola*, 72(5), 432–439.

NMX-AA-180-SCFI-2018. QUE ESTABLECE LOS MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA EL TRATAMIENTO AEROBIO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y DE MANEJO ESPECIAL, ASÍ COMO LA INFORMACIÓN COMERCIAL Y DE SUS PARÁMETROS DE CALIDAD DE LOS PRODUCTOS FINALES. Rescatado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf>

NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. - Lodos y Biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-200, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Rescatado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>, consultado el 09/03/2022

NOM-109-SSA1-1994. Proyecto de Norma Oficial Mexicana, Bienes y Servicios. Procedimientos para la toma, manejo y transporte de muestras de alimentos para su análisis microbiológico. Rescatado de <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ssa1/ssa1109p.pdf>, consultado el 19/05/2022

NORMA Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994, Bienes y servicios. Preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico. Rescatado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69533.pdf>, consultado el 19/05/2022.

NORMA Oficial Mexicana NOM-114-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la determinación de salmonella en alimentos. Rescatado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69538.pdf>, consultado el 19/05/2022.

NORMA Oficial Mexicana NOM-113-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa. Rescatado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69536.pdf>, consultado el 19/05/2022.

NORMA Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994, Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable. Rescatado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69535.pdf>, consultado el 19/05/2022.

Ou, H., & Zeng, E. Y. (2018). Occurrence and Fate of Microplastics in Wastewater Treatment Plants. *Microplastic Contamination in Aquatic Environments*, 317–338.

Pedraza, Luz Adriana, López, Camilo Ernesto, & Uribe-Velez, Daniel. (2020). Mecanismos de acción de bacillus spp. (bacillaceae) contra microorganismos fitopatógenos durante su interacción con plantas. *Acta Biológica Colombiana*, 25(1), 112-125.

Rodríguez-Lovera, J. N., & Ruíz-Guamán, F. J. (2016). Propuesta metodológica para el monitoreo, control y recuperación del suelo mediante bioaumentación de microorganismos para sitios de disposición final de residuos sólidos.

[https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/275](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/275) consultado el 12/05/2022.

Rogers, H. R. (1996). Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges. *Science of The Total Environment*, 185(1-3), 3–26.

Salazar-López, J.M., (2017). Efecto de bacillus spp. en el control de salmonella y en el crecimiento de germinado de alfalfa. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Querétaro]. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/1352> consultado el 12/05/2022.

Semedo D., Castro V., Neto A., & De Souza E. (2018). Salmonella spp. In the fish production chain: a review. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180141> consultado el 12/05/2022.

Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346–362.

Singh, M.K., Maurya, & A., SushilKuma. (2020). Chapter 10 - Bioaugmentation for the treatment of waterborne pathogen contamination water. *Waterborne Pathogens detection and treatment*. 189 – 203.

Teoh, S. K., & Li, L. Y. (2019). Feasibility of alternative sewage sludge treatment methods from a lifecycle assessment (LCA) perspective. *Journal of Cleaner Production*, 119495.

Villarreal-Delgado, M.F., Villa-Rodríguez, E.D., Cira-Chávez, L.A., Estrada-Alvarado, M.I., Parra-Cota, F.I., & Santos-Villalobos, S., (2018). El género

Bacillus como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista mexicana de fitopatología*, 36(1), 95-130.

Wu, M., Guo, X., Wu, J., & Chen, K. (2020). Effect of compost amendment and bioaugmentation on PAH degradation and microbial community shifting in petroleum-contaminated soil. *Chemosphere*, 126998.

Yoshida, Hiroko; Nielsen, Martin P.; Scheutz, Charlotte; Jensen, Lars S.; Christensen, Thomas H.; Nielsen, Steen; & Bruun, Sander (2015). Effects of sewage sludge stabilization on fertilizer value and greenhouse gas emissions after soil application. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil and Plant Science*. 65(6), 506–516.

Zhong, B., An, X., An, W., Xiao, X., Li, H., Xia, X., & Zhang, Q. (2021). Effect of bioaugmentation on lignocellulose degradation and antibiotic resistance genes removal during biogas residues composting. *Bioresource Technology*, 340, 125742.