

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



## FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

### MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y OPERACIONES INDUSTRIALES

---

**Tema:** ALTERNATIVA SUSTENTABLE PARA EL APROVECHAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS RESIDUALES, GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DE EMPRESAS DE ALIMENTOS.

---

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de  
Magister en Producción y Operaciones Industriales

Modalidad de Titulación Proyecto de Desarrollo

**Autor:** Ingeniero Eduardo Santiago Toapaxi Mayorga

**Director:** Ingeniero Israel Ernesto Naranjo Chiriboga Magister

Ambato – Ecuador

2022

## **APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia Magister, e integrado por los señores: Ingeniero Luis Alberto Morales Perrazo Magíster, Ingeniera Edith Elena Tubón Núñez Magister, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “Alternativa sustentable para el aprovechamiento de lodos activados residuales, generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de empresas de alimentos”, elaborado y presentado por el señor Ingeniero Eduardo Santiago Toapaxi Mayorga, para optar por el Grado Académico de Magister en Producción y Operaciones Industriales; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia Mg.  
Presidenta y Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Luis Alberto Morales Perrazo Mg.  
Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Edith Elena Tubón Núñez Mg.  
Miembro del Tribunal

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Alternativa sustentable para el aprovechamiento de lodos activados residuales, generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de empresas de alimentos”, le corresponde exclusivamente a: Ingeniero Eduardo Santiago Toapaxi Mayorga, Autor bajo la Dirección de Ingeniero Israel Ernesto Naranjo Chiriboga Magister, Director del Trabajo de Desarrollo; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Eduardo Santiago Toapaxi Mayorga

**AUTOR**

-----  
Ing. Israel Ernesto Naranjo Chiriboga Mg.

**DIRECTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Eduardo Santiago Toapaxi Mayorga

C.C. 1804474318

## ÍNDICE GENERAL

### Contenido

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
AGRADECIMIENTO .....	xii
DEDICATORIA.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO .....	xiv
EXECUTIVE SUMMARY .....	xv
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1.    Introducción.....	1
1.2.    Justificación.....	2
1.3.    Objetivos .....	3
1.3.1.    General.....	3
1.3.2.    Específicos .....	3
CAPÍTULO II.....	4
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	4
2.1.    Fundamentación teórica .....	4
2.1.1.    Producción más limpia (P+L) .....	4
2.1.2.    Plantas de tratamiento de agua residual (PTAR).....	4
Lodos residuales activados vs. biosólidos.....	5
2.1.3.    Tratamiento de lodos activados residuales.....	6
2.1.4.    Compost .....	7
Fases del compostaje .....	8
Sistemas de compostaje .....	10
Variables que condicionan el compostaje.....	12
Compostaje de lodos activados .....	13
2.2.    Antecedentes .....	14

2.2.1.	Perspectiva general de los lodos residuales .....	14
2.2.2.	Aprovechamiento de lodos residuales .....	15
2.2.3.	Características de un buen compost.....	16
2.2.4.	Evaluación de riesgos del compostaje de lodos activados residuales ..	18
CAPÍTULO III .....		20
MARCO METODOLÓGICO .....		20
3.1.	Ubicación .....	20
3.2.	Equipos y materiales .....	20
3.3.	Tipo de investigación.....	21
3.4.	Prueba de hipótesis – pregunta científica – idea a defender .....	22
3.4.1.	Hipótesis nula .....	22
3.4.2.	Hipótesis alternativa .....	22
3.5.	Población o muestra.....	22
3.5.1.	Población.....	22
3.5.2.	Muestra .....	22
3.6.	Recolección de información.....	22
3.6.1.	Caracterización del lodo activado residual .....	22
3.6.2.	Compostaje.....	23
	Conformación de las pilas de compostaje.....	23
	Dimensionamiento de las pilas de compostaje.....	23
	Variables a medir durante el proceso de compostaje.....	24
	Frecuencia de volteo .....	25
	Caracterización del compost .....	25
3.7.	Procesamiento de la información y análisis estadístico .....	25
3.8.	Variables respuesta o resultados alcanzados .....	27
3.8.1.	Variable Independiente: Aprovechamiento y reutilización de lodos activados residuales .....	27
3.8.2.	Variable Dependiente: Elaboración de compost .....	28
CAPÍTULO IV .....		29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		29
4.1.	Caracterización del lodo activado residual .....	29
4.1.1.	Clasificación y uso del lodo activado residual en cuanto al límite permisible de metales pesados y análisis microbiológicos según la norma NOM- 004-SEMARNAT-2002 .....	35
4.2.	Compostaje.....	37
4.2.1.	Conformación de pilas de compostaje .....	37

4.2.2.	Dimensionamiento y conformación de las pilas de compostaje .....	39
4.2.3.	Evaluación del proceso de compostaje .....	43
	Variables medidas durante el proceso de compostaje .....	43
	Temperatura.....	43
	Humedad .....	52
	pH .....	58
	Aireación .....	63
4.3.	Determinación del mejor tratamiento .....	64
4.4.	Cálculos estadísticos y verificación de hipótesis.....	65
4.5.	Caracterización del compost obtenido .....	70
4.5.1.	Análisis sensorial.....	70
4.5.2.	Análisis físico químicos .....	71
4.6.	Eficiencia o rendimiento del proceso de compostaje.....	79
4.7.	Beneficios del compostaje y del compost obtenido.....	81
4.7.1.	Beneficios ambientales .....	81
4.7.2.	Beneficios económicos .....	81
	Costo de producción .....	81
CAPÍTULO V .....		85
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS .....		85
5.1.	Conclusiones .....	85
5.2.	Recomendaciones .....	86
5.3.	Bibliografía.....	87
5.4.	Anexos .....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1.</b> Clasificación y aprovechamiento de los biosólidos. ....	6
<b>Tabla 2-2.</b> Tratamientos de lodos activados residuales.....	6
<b>Tabla 3-1.</b> Equipos y materiales. ....	20
<b>Tabla 3-2.</b> Variable independiente.....	27
<b>Tabla 3-3.</b> Variable dependiente.....	28
<b>Tabla 4-1.</b> Resultados del análisis cretib del lodo activado residual. ....	32
<b>Tabla 4-2.</b> Resultados del análisis de fitonutrientes en el lodo activado residual. ....	34
<b>Tabla 4-3.</b> Concentración de metales pesados del biosólido y comparación con la norma mexicana.....	35
<b>Tabla 4-4.</b> Análisis microbiológico del biosólido y comparación con la norma mexicana.....	36
<b>Tabla 4-5.</b> Cantidad de lodo residual y aserrín por tratamiento. ....	39
<b>Tabla 4-6.</b> Dimensionamiento de las pilas de compostaje. ....	41
<b>Tabla 4-7.</b> Número de días de la fase mesofílica en cada tratamiento y temperatura máxima alcanzada en la fase termofílica. ....	46
<b>Tabla 4-8.</b> Datos de temperatura de la fase termofílica de cada tratamiento. ....	65
<b>Tabla 4-9.</b> Análisis de varianza. ....	68
<b>Tabla 4-10.</b> Prueba de Tukey.....	69
<b>Tabla 4-11.</b> Análisis físico químico del compost. ....	71
<b>Tabla 4-12.</b> Comparación de especificaciones del compost con la norma mexicana y chilena. ....	72
<b>Tabla 4-13.</b> Pesos de materia prima y producto terminado en B.H. y B.S.....	80
<b>Tabla 4-14.</b> Rendimientos del compostaje calculados en B.H y B.S.....	80
<b>Tabla 4-15.</b> Costos variables. ....	82
<b>Tabla 4-16.</b> Costos fijos. ....	83
<b>Tabla 4-17.</b> Depreciación anual. ....	83
<b>Tabla 4-18.</b> Beneficios económicos de la producción de compost a partir de lodos residuales.....	84



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2-1.</b> Funcionamiento general de una PTAR. ....	5
<b>Figura 2-2.</b> Proceso de descomposición de la materia orgánica (compostaje).....	8
<b>Figura 2-3.</b> Fases del compostaje. ....	9
<b>Figura 2-4.</b> Sistemas de compostaje. ....	10
<b>Figura 2-5.</b> Sistemas abiertos-pilas de compostaje.....	10
<b>Figura 2-6.</b> Sistemas cerrados- reactor horizontal. ....	11
<b>Figura 3-1.</b> Ubicación Agrocompost Chiquicha.....	20
<b>Figura 3-2.</b> Dimensionamiento de la pila de compostaje.....	24
<b>Figura 4-1.</b> Obtención de lodos activados residuales. ....	29
<b>Figura 4-2.</b> Biosólido (lodo activado residual).....	35
<b>Figura 4-3.</b> Materia prima (lodo activado residual).....	37
<b>Figura 4-4.</b> Material de soporte (aserrín). ....	37
<b>Figura 4-5.</b> Determinación de la densidad del lodo activado residual. ....	41
<b>Figura 4-6.</b> Diseño de las pilas de compostaje. ....	42
<b>Figura 4-7.</b> Conformación de las pilas de compostaje.....	42
<b>Figura 4-8.</b> Pilas de compost con cal. ....	42
<b>Figura 4-9.</b> Medición de variables. ....	43
<b>Figura 4-10.</b> Comportamiento de temperatura de compostaje en los diferentes tratamientos. ....	45
<b>Figura 4-11.</b> Comportamiento de la temperatura del blanco.....	47
<b>Figura 4-12.</b> Comportamiento de la temperatura del T1.....	47
<b>Figura 4-13.</b> Comportamiento de la temperatura del T2.....	48
<b>Figura 4-14.</b> Comportamiento de la temperatura del T3.....	48
<b>Figura 4-15.</b> Comportamiento de la temperatura del T4.....	49
<b>Figura 4-16.</b> Comportamiento de la temperatura del T5.....	49
<b>Figura 4-17.</b> Contenido de humedad de los diferentes tratamientos. ....	53
<b>Figura 4-18.</b> Contenido de humedad promedio de cada tratamiento.....	54
<b>Figura 4-19.</b> Comportamiento de la humedad del T0.....	55
<b>Figura 4-20.</b> Comportamiento de la humedad del T1.....	55
<b>Figura 4-21.</b> Comportamiento de la humedad del T2.....	55
<b>Figura 4-22.</b> Comportamiento de la humedad del T3.....	56
<b>Figura 4-23.</b> Comportamiento de la humedad del T4.....	56

<b>Figura 4-24.</b> Comportamiento de la humedad del T5.....	56
<b>Figura 4-25.</b> Comportamiento del pH en los diferentes tratamientos.....	59
<b>Figura 4-26.</b> Comportamiento del pH del T0.....	60
<b>Figura 4-27.</b> Comportamiento del pH del T1.....	60
<b>Figura 4-28.</b> Comportamiento del pH del T2.....	61
<b>Figura 4-29.</b> Comportamiento del pH del T3.....	61
<b>Figura 4-30.</b> Comportamiento del pH del T4.....	61
<b>Figura 4-31.</b> Comportamiento del pH del T5.....	62
<b>Figura 4-32.</b> Máquina volteadora.....	64
<b>Figura 4-33.</b> Prueba de normalidad de los datos de temperatura.....	68
<b>Figura 4-34.</b> Valores promedio de temperaturas de la fase termofílica de cada tratamiento.....	70
<b>Figura 4-35.</b> Compost.....	70
<b>Figura 4-36.</b> Comparación del contenido de M.O. del lodo residual y compost.....	73
<b>Figura 4-37.</b> Comparación del contenido de C del lodo residual y compost.....	74
<b>Figura 4-38.</b> Comparación del contenido de N del lodo residual y compost.....	75
<b>Figura 4-39.</b> Comparación de la relación C:N del lodo residual y compost.....	76
<b>Figura 4-40.</b> Comparación del contenido de P del lodo residual y compost.....	77
<b>Figura 4-41.</b> Comparación del contenido de K del lodo residual y compost.....	78
<b>Figura 4-42.</b> Esquema general del balance de masa del compostaje.....	79
<b>Figura 4-43.</b> Compost obtenido (sacos de 45kg).....	79

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Análisis CRETIB del lodo activado residual .....	94
<b>Anexo 2.</b> Análisis de fitonutrientes del lodo activado residual.....	96
<b>Anexo 3.</b> Temperaturas diarias de cada tratamiento.....	98
<b>Anexo 4.</b> Temperatura diaria promedio de cada tratamiento .....	101
<b>Anexo 5.</b> Humedad diaria de cada tratamiento .....	104
<b>Anexo 6.</b> Humedad promedio diaria de cada tratamiento.....	107
<b>Anexo 7.</b> pH semanal de cada tratamiento.....	110
<b>Anexo 8.</b> pH semanal promedio de cada tratamiento .....	112
<b>Anexo 9.</b> Metodología para la elaboración de compost a partir de lodos residuales .....	113
<b>Anexo 10.</b> Análisis químico del compost obtenido.....	114

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y a la Virgen de Guadalupe por darme la sabiduría necesaria y guiarme para cursar esta maestría y terminarla con éxito.

A mi padre Gilmar, que estoy seguro que desde el cielo me envía las fuerzas necesarias para surgir adelante. A mi madre Juani y hermana Giovy que estuvieron durante todo este camino con palabras de ánimo y apoyo para no decaer y seguir adelante.

A la empresa Agrocompost que me abrió sus puertas para desarrollar el trabajo de investigación.

A Fernando Aldás, Edgar Lozano y Mauricio Flores que me apoyaron con sus conocimientos para el desarrollo de la tesis.

A mi director de tesis Israel Naranjo por guiarme y darme las pautas necesarias para realizar un trabajo digno de titulación y poder culminar esta maestría.

## **DEDICATORIA**

Esta tesis le dedico a mi padre Gilmar Toapaxi (Nomen), que lamentablemente no le alcanzó el tiempo aquí en la tierra para verme alcanzar este logro en mi vida. Nos faltaron muchas cosas por vivir, pero sé que desde el cielo está apoyándome en todas las decisiones que tomo, guiando mis pasos y velando por mi bienestar. Estoy seguro que él está celebrando junto conmigo este triunfo y que se siente muy orgulloso de que haya obtenido el título de magíster.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y OPERACIONES INDUSTRIALES**

**TEMA:**

ALTERNATIVA SUSTENTABLE PARA EL APROVECHAMIENTO DE LODOS  
ACTIVADOS RESIDUALES, GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES (PTAR) DE EMPRESAS DE ALIMENTOS.

**AUTOR:** Ing. Eduardo Santiago Toapaxi Mayorga

**DIRECTOR:** Ing. Israel Ernesto Naranjo Chiriboga Mg.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Energía, desarrollo sostenible y gestión de recursos naturales.

**FECHA:**

**RESUMEN EJECUTIVO**

Esta investigación propone una alternativa sustentable para el aprovechamiento y disposición final de los lodos activados residuales generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de empresas alimenticias, a través de la elaboración de compost. Los lodos residuales se estabilizaron a través del compostaje en pilas con volteo mecánico, utilizando aserrín como material de soporte, para mejorar las condiciones del mismo. Se realizaron 6 pilas, 5 de las cuales, con diferentes cantidades de lodo residual y aserrín, y 1 pila solo con lodo residual. Se midió variables como: temperatura, humedad y pH, los datos fueron tomados basados en un diseño experimental completamente aleatorizado. Para determinar el mejor tratamiento, únicamente se basó en los datos de temperatura obtenidos, de esta manera, se determinó que la pila conformada por 7000kg de lodo residual y 3000kg de aserrín fue la mejor, ya que cumplió todo el proceso, con los parámetros adecuados y obteniendo un compost de calidad, estable y maduro que contenía los nutrientes esenciales para la agricultura. Con esta investigación, se demostró que es posible aprovechar los lodos activados residuales de PTAR's de empresas de alimentos, protegiendo el medio ambiente, con técnicas de producción más limpia y obteniendo un producto de gran utilidad en el campo agrícola con grandes beneficios.

**Descriptor:** Compost, lodo activado residual, producción más limpia, sostenibilidad ambiental.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E**  
**INDUSTRIAL**  
**MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN Y OPERACIONES INDUSTRIALES**

**THEME:**

SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR RESIDUAL ACTIVATED SLUDGE USE,  
GENERATED BY FOOD COMPANIES IN WASTEWATER TREATMENT  
PLANTS

**AUTHOR:** Ing. Eduardo Santiago Toapaxi Mayorga

**DIRECTED BY:** Ing. Israel Ernesto Naranjo Chiriboga Mg.

**LINE OF RESEARCH:** Energy, sustainable development and management of natural resources.

**DATE:**

**EXECUTIVE SUMMARY**

This research proposes a sustainable alternative for the use and final disposal of residual activated sludge generated in wastewater treatment plants of food companies, through the elaboration of compost. The residual sludge was stabilized through composting in piles with mechanical turning, using sawdust as support material, to improve its conditions. Six piles were made, 5 of which with different amounts of residual sludge and sawdust, and 1 pile only with residual sludge. Variables such as: temperature, humidity and pH were measured, the data was taken based on a completely randomized experimental design. To determine the best treatment, it was only based on the temperature data obtained, in this way, it was determined that the pile made up of 7000kg of residual sludge and 3000kg of sawdust was the best, since it fulfilled the entire process, with the appropriate parameters. and obtaining a quality, stable and mature compost that contained the essential nutrients for agriculture. With this research, it was shown that it is possible to take advantage of the residual activated sludge from PTAR's of food companies, protecting the environment, with cleaner production techniques and obtaining a highly useful product in the agricultural field with great benefits.

**Key words:** Compost, residual activated sludge, cleaner production, environmental sustainability.

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

Las empresas de alimentos son uno de los sectores productivos que más impacto tienen sobre el ambiente; debido a su actividad, generan gran cantidad de residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Para que las industrias cumplan con las normativas, deben aplicar estrategias ambientales preventivas que se integren a procesos, productos y servicios, así, se reducen los riesgos para el ser humano y el medio ambiente. Una de estas estrategias es el cumplimiento de los residuos con su ciclo de vida: producción, transporte, almacenamiento, recolección, tratamiento y disposición final (De la Rosa, 2018).

Para proteger el medio ambiente se utiliza la Producción más limpia (P+L), a través de la cual se busca la eliminación o minimización de las materias primas tóxicas, emisiones, vertimientos, desechos y el uso eficiente de los recursos. Algunas empresas de alimentos debido a que en su proceso productivo requiere gran cantidad de agua, cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR's), a través de las cuales se eliminan todos los contaminantes del agua para no producir daños al ambiente; sin embargo, como subproducto de este tratamiento se genera gran cantidad de lodo residual, convirtiéndose en un grave contaminante si no son tratados y/o aprovechados previamente a su disposición final (Manca et al., 2020).

El manejo y disposición final del lodo residual se ha convertido en un grave problema en todo el mundo por su creciente y continua generación. En la actualidad, se ha investigado diferentes alternativas para transformar este lodo en producto útil (Ozdemir et al., 2019). A través de esto, el lodo puede ser reingresado en la cadena de producción, siguiendo el paradigma de Economía Circular, el que transforma los "outputs" de un proceso en "inputs" de otro. (Argudo et al., 2017) .

Los lodos están compuestos por elementos tóxicos, microorganismos patógenos (virus, bacterias, protozoos), y dependiendo de la actividad de la empresa puede contener metales pesados (cromo, mercurio, cobre cadmio, níquel, plomo, zinc); sin embargo, hay que recalcar que también la composición de los mismos, puede ser útil para la



elaboración de abonos orgánicos (compost) por su contenido de macro y micronutrientes (materia orgánica), nitrógeno, fósforo y potasio, y en menor proporción calcio, magnesio y azufre (Ozdemir et al., 2019).

En los últimos años se ha dado mucha importancia al interés de que los lodos residuales previamente estabilizados sean aplicados en el suelo, ofreciendo diferentes beneficios como propuesta sostenible: agrícolas, alternativa económica viable, bajos costos para la disposición final, ahorro de recursos, reducción de la utilización de fertilizantes químicos, disminución de la erosión y aumento de la fertilidad del suelo (Abbasi et al., 2019).

El contenido de esta investigación se presenta a continuación: En el Capítulo II se detalla el estado del arte sustentado en bibliografía de investigaciones anteriores relacionadas al aprovechamiento de lodos residuales y su aplicación en el ámbito agrícola. En el Capítulo III se identifica los niveles de investigación y la metodología que se usa para esta investigación. En el Capítulo IV se analiza los resultados obtenidos de la elaboración de compost y en el Capítulo V se muestran las conclusiones y recomendaciones obtenidas de esta investigación, además de la bibliografía en la cual se sustentó este proyecto y finalmente los anexos.

## **1.2. Justificación**

Debido a que toda industria genera gran cantidad de residuos por sus procesos productivos, éstos deben regirse bajo normas ambientales de tal manera que no causen un impacto negativo al medio ambiente. Por esta razón, con esta investigación se propuso el aprovechamiento de los lodos activados residuales generados en PTAR de empresas de alimentos, convirtiéndose en una alternativa sustentable al transformarlos en un nutriente tecnológico, producto innovador de bajo costo y con grandes beneficios agrícolas.

Las PTAR generan gran cantidad de lodo residual convirtiéndose en una situación crítica (Królik et al., 2019), puesto que la mayoría de los lodos producidos se envían a los rellenos sanitarios para su disposición final previamente a una estabilización, sin embargo, se está teniendo algunos inconvenientes porque cada vez el espacio se reduce en el relleno, genera malos olores y aparición de vectores. La cantidad de flujo de lodos generados no puede ser reducida considerablemente, por lo que con esta investigación

se procedió con prácticas de Producción más limpia (P+L) mediante la reutilización del residuo generado.

Para dar solución a esta problemática se propuso una alternativa sustentable para el aprovechamiento de lodos, mediante el compostaje (elaboración de compost), de esta manera, éste puede ser reincorporado a la cadena de producción teniendo menos gasto energético debido a que el compostaje facilita la gestión de los lodos, reduciendo su peso, volumen y peligrosidad, permitiendo que se hagan más manejables y menos contaminantes. (Bozym et al., 2018). El producto final obtenido puede ser utilizado en áreas de cultivo incrementando la producción y enriqueciendo o mejorando la calidad del suelo.

El beneficiario de esta investigación fue la empresa Agrocompost, puesto que se colaboró con la metodología ideal para la elaboración de compost utilizando como materia prima los lodos activados residuales de una PTAR de una empresa alimenticia, y aserrín como material de soporte. Además, se considera beneficiarios también a las empresas productoras de alimentos que poseen PTAR y que no cuentan con proyectos de P+L para los residuos generados en las mismas.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. General**

- Proponer una alternativa sustentable para el aprovechamiento de lodos activados residuales generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de empresas de alimentos.

#### **1.3.2. Específicos**

- Caracterizar los lodos provenientes de la PTAR mediante análisis físicos, químicos y microbiológicos para verificar su uso en la elaboración de compost.
- Evaluar a escala piloto la mejor formulación de las diferentes biopilas de compost mediante la utilización de aserrín como material de soporte en diferentes concentraciones.
- Realizar un balance de masa del proceso de compostaje mediante cálculos de rendimiento en relación a la cantidad de materia prima y producto obtenido.
- Determinar los beneficios que se generan con la alternativa sustentable propuesta.

## CAPÍTULO II

### ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

#### **2.1.Fundamentación teórica**

##### **2.1.1. Producción más limpia (P+L)**

Según la Oficina de Industria y Medio Ambiente del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se define a la P+L como la “aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a procesos productivos y servicios para mejorar la ecoeficiencia y reducir los riesgos humanos y al medio ambiente” (Giannetti et al., 2020).

La P+L ayuda al desarrollo sostenible y a la innovación de productos en 3 aspectos: el primero permite la eliminación o disminución de residuos sólidos, líquidos y gaseosos. El segundo abarca el reciclaje interno, recuperación y reutilización de energía. Y el tercero implica el reciclaje externo, mediante el cual las empresas usan los desechos como materia prima y el reciclaje de residuos a través de los cuales se reintegra la materia orgánica al medio ambiente mediante una serie de procesos de transporte, producción y descomposición, intercambiando elementos químicos entre los seres vivos y el ambiente (Argudo et al., 2017).

La implementación de medidas de P+L es lo primero que se debe tomar en cuenta el momento de manejar los efluentes en una industria.

##### **2.1.2. Plantas de tratamiento de agua residual (PTAR)**

Las PTAR son sistemas que permiten retirar los contaminantes existentes en el agua para su posterior incorporación a un cuerpo lacustre natural o para reutilización en otras actividades (Figura 2-1). Tratan las aguas residuales de empresas, bodegas, comunidades, a través de los cuales se elimina los agentes contaminantes presentes, reduciendo los impactos ambientales ocasionados por el mal manejo de los efluentes (Argudo et al., 2017).

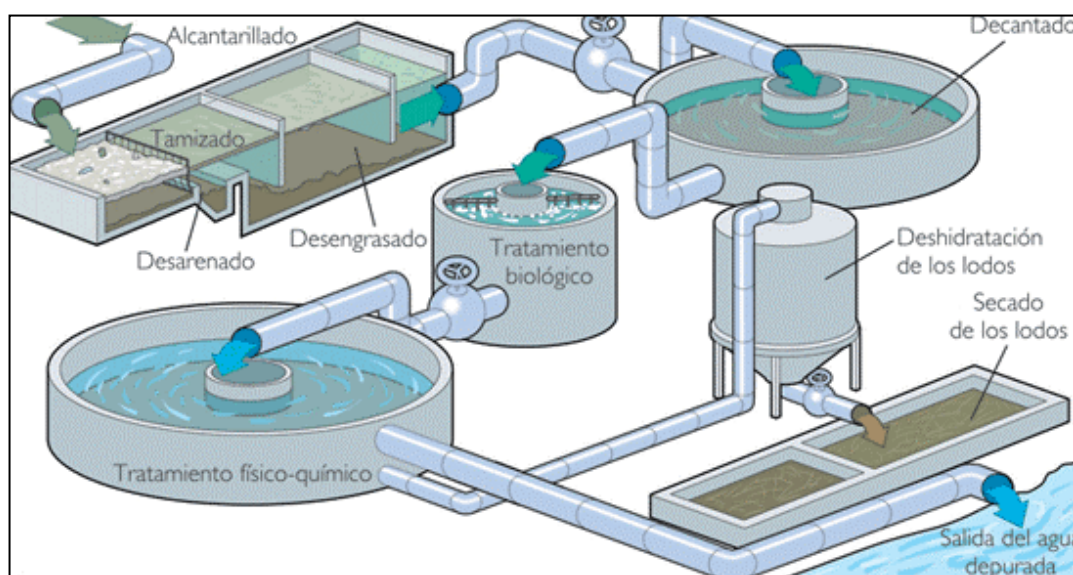
Incluyen los siguientes tratamientos:

**Físicos:** sedimentación, filtración, tamización, para separar el material suspendido.

**Químicos:** con sustancias que permiten remover el material disuelto en el agua, neutralización, oxidación/reducción, adsorción.

**Biológicos:** utilizando microorganismos que eliminan compuestos orgánicos del agua tratada.

El principal residuo generado en las PTAR, como consecuencia del tratamiento de estas aguas, son los lodos (Araujo et al., 2018).



**Figura 2-1.** Funcionamiento general de una PTAR.

**Fuente:** (Lorren, 2018)

### **Lodos residuales activados vs. biosólidos**

Los lodos activados residuales son una mezcla de agua y sólidos correspondientes al producto de la concentración y acumulación de sólidos existentes en el efluente tratado en la PTAR, que pueden ser reutilizados después de ser estabilizados. Estos lodos se generan durante los tratamientos biológicos (Medina et al., 2020). Dependiendo de la calidad y procedencia del agua tratada y del tratamiento efectuado son las características de los mismos. Están compuestos por materia orgánica, nitrógeno, fósforo, metales pesados (en algunos casos) y patógenos (helminths, coliformes fecales, salmonella, protozoos, virus) (Argudo et al., 2017).

Los biosólidos según la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 los define como “lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que, por su

contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, puedan ser susceptibles de aprovechamiento”.

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y la clase como lo especifica la NOM-004-SEMARNAT-2002 (Tabla 2-1).

**Tabla 2-1. CLASIFICACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LOS BIOSÓLIDOS.**

<b>TIPO</b>	<b>CLASE</b>	<b>APROVECHAMIENTO</b>
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase B y C.</li> </ul>
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.</li> <li>• Los establecidos para clase C.</li> </ul>
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos forestales</li> <li>• Mejoramientos de suelos</li> <li>• Usos agrícolas</li> </ul>

**Fuente:** NOM-004-SEMARNAT-2002

### **2.1.3. Tratamiento de lodos activados residuales**

Para que los lodos puedan ser aprovechados deben estar estabilizados, disminuyendo así los efectos negativos que pueden causar al medio ambiente, de esta manera se garantizará una degradación controlada de la materia orgánica, eliminación de olores, disminución de volumen e inactivación de organismos patógenos (Sánchez et al., 2020). A continuación, se describe los principales tratamientos que se aplican a los lodos activados residuales (Tabla 2-2).

**Tabla 2-2. TRATAMIENTOS DE LODOS ACTIVADOS RESIDUALES.**

<b>Tratamiento</b>	<b>Métodos empleados</b>
Espesamiento	Gravedad, flotación, centrifugación.
Estabilización	Cal, tratamiento térmico, digestión aerobia y anaerobia.
Deshidratación	Filtraciones, centrifugación, secado

**Tabla 2-3.** TRATAMIENTOS DE LODOS ACTIVADOS RESIDUALES (continuación).

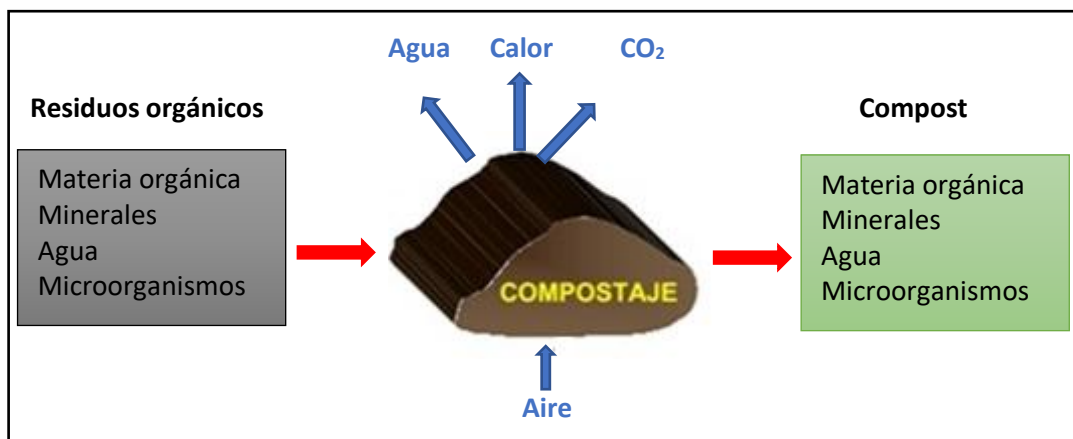
Tratamiento	Métodos empleados
Desinfección	Pasteurización, química, almacenamiento de larga duración
Acondicionamiento	Químico, térmico
Secado térmico	Hornos, incineración, evaporadores
Compostaje	Biológico aerobio

**Fuente:** (Sánchez et al., 2020)

#### 2.1.4. Compost

Es un abono orgánico que se obtiene a partir de la descomposición controlada de la materia orgánica, aporta diversos beneficios al suelo y a las plantas, se lo utiliza en lugar de los fertilizantes químicos que causan daños al medio ambiente. Es el producto final que se obtiene del proceso de compostaje y presenta características como: estabilizado, inocuo, libre de sustancias fitotóxicas y con un elevado valor fertilizante (Camacho et al., 2018).

El compostaje (Figura 2-2) corresponde a la descomposición biológica aeróbica y estabilización de sustratos orgánicos mediante el calor producido biológicamente que crea una fase termofílica y proporciona un producto estable y sostenible, libre de patógenos, que se puede aplicar de manera beneficiosa a los cultivos. Este proceso biológico implica el desarrollo adecuado de la actividad microbiana que ayuda a reducir la materia orgánica a una temperatura superior ( $>45^{\circ}\text{C}$ ), permitiendo la reducción de patógenos nocivos y transformando la materia orgánica compleja en un producto maduro (Jain et al., 2019). Los microorganismos aprovechan el carbono (C) y nitrógeno (N) disponibles en los residuos para producir su propia biomasa, desprendiendo calor y generando un sustrato sólido con menos cantidad de C y N que corresponde al compost en condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación (Bohórquez, 2019).



**Figura 2-2.** Proceso de descomposición de la materia orgánica (compostaje).

**Fuente:** Conciencia Eco

### Fases del compostaje

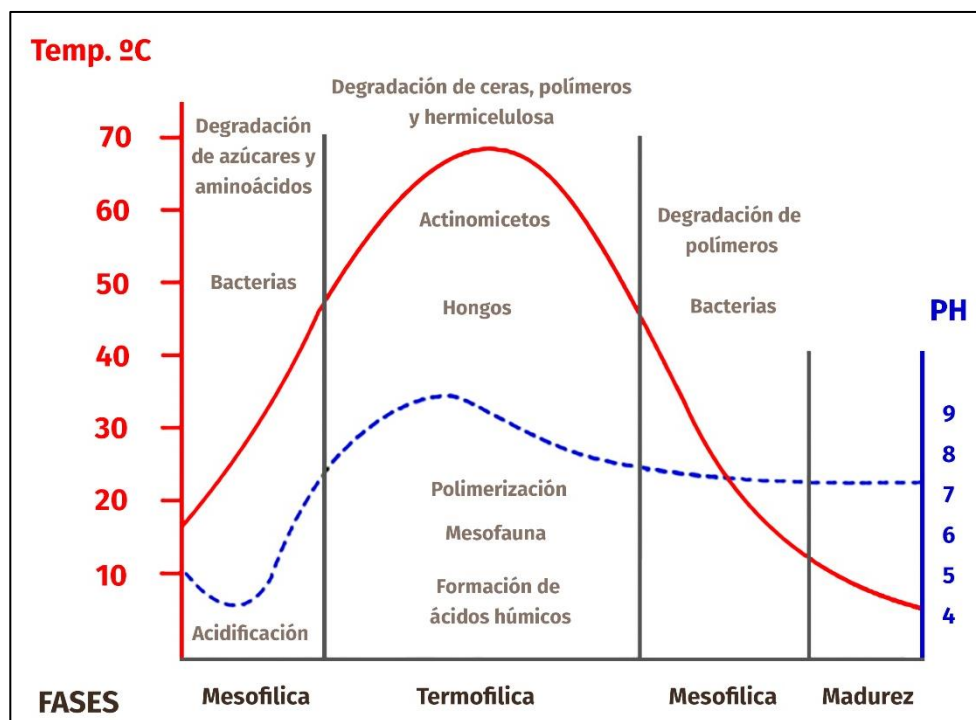
El proceso de descomposición del C, N y de la materia orgánica producen variaciones de temperatura, las cuales pueden ser medidas durante todo el tiempo de compostaje, debido a estos cambios en la temperatura hay 3 fases (Figura 2-3) principales por las que pasa este proceso: mesófila, termófila o estabilización, y mesófila II o enfriamiento; además de una etapa final de maduración (Barthod et al., 2018).

**Mesófila:** Los microorganismos se adaptan a su nuevo hábitat, aquí utilizan las fuentes básicas de N y C produciendo calor, la temperatura incrementa hasta los 45°C. Se descomponen compuestos solubles, los azúcares son mineralizados por comunidades microbianas y producen dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), ácidos orgánicos; el pH puede bajar a un rango de 4.0 – 4.5, dura entre dos a ocho días (Asses et al., 2018).

**Termófila o Estabilización:** Supera la temperatura de 45°C, alcanza un máximo. El rango de temperatura óptimo para el compostaje es de 40 a 65°C, (Barthod et al., 2018) haciendo que los microorganismos que se desarrollaban en la etapa anterior (microorganismos mesófilos) sean reemplazados por otros que crecen y se desarrollan a temperaturas mayores (microorganismos termófilos), éstos degradan fuentes más complejas de C como grasas, celulosa y lignina; el pH del medio sube debido a que los microorganismos transforman el N en amoníaco. Debido al incremento de temperatura por encima de 55°C, se eliminan organismos patógenos y contaminantes de origen fecal, convirtiéndose en un producto higienizado, esta fase dura desde días hasta varios meses (Asses et al., 2018).

**Mesófila II o Enfriamiento:** Las fuentes de C y N están reducidas, por lo que la actividad microbiana disminuye y esto a su vez, provoca un descenso lento de la temperatura, regresa nuevamente a 40 – 45°C, los microorganismos mesófilos empiezan nuevamente su actividad, continúan degradando estructuras de C que aún hayan quedado, el pH del medio disminuye levemente. Esta fase requiere de varias semanas y a veces se confunde con la fase de maduración (Barthod et al., 2018).

**Maduración:** Es la etapa final, demora meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones de condensación y polimerización de compuestos carbonados y se forman ácidos húmicos y fúlvicos, importantes para el suelo en el cual va a ser utilizado (Bohórquez, 2019).

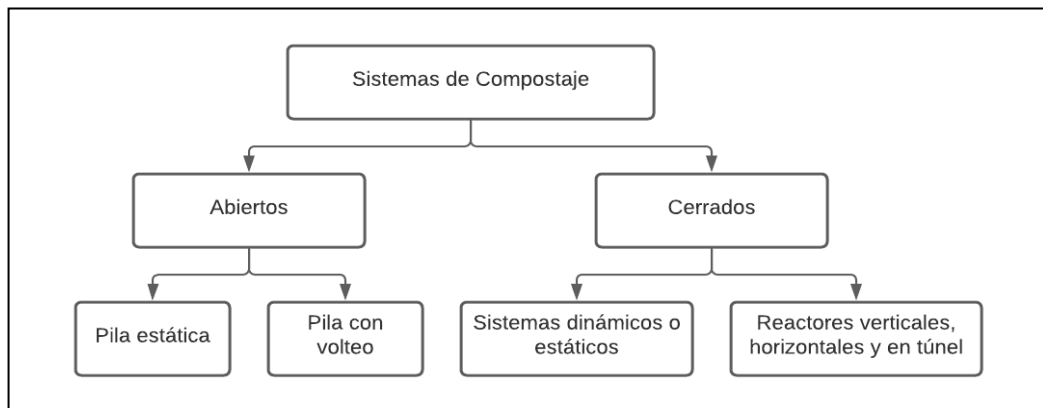


**Figura 2-3.** Fases del compostaje.  
**Fuente:** Puntocompost



## Sistemas de compostaje

Existen diversos sistemas de compostaje desde los más sencillos hasta los sistemas tecnológicos más complejos que permiten tratar un elevado volumen de residuos. La elección de un sistema dependerá del tipo de residuo a compostar de tal manera que resulte adecuado y eficiente para tratar un determinado volumen de residuos, generando un producto estable e higienizado. Los sistemas se clasifican en dos tipos: abiertos y cerrados (Figura 2-4) (Kwarciak, 2019).



**Figura 2-4.** Sistemas de compostaje.

**Fuente:** Kwarciak-Kozłowska (2019)

Los sistemas abiertos (Figura 2-5) son los más utilizados por su sencillez, están al aire libre, no necesitan de materiales complejos para su construcción, dentro de estos están:



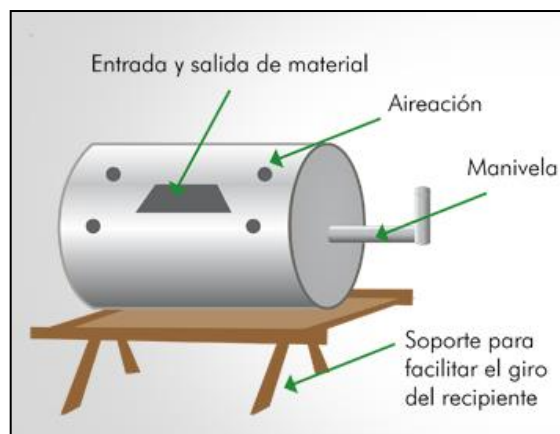
**Figura 2-5.** Sistemas abiertos-pilas de compostaje.

**Fuente:** Compostando ciencia

**Pilas Estáticas:** Son aquellas en las que se forman hileras del material a compostar y el material no se toca hasta terminar el compostaje y pueden ser aireadas de forma natural o mecánica (Ascanio et al., 2022).

**Pilas con volteo:** Se está mezclando constantemente el material de la pila y además provee la aireación del mismo, el volteo se puede hacer manual o mecánico (Ascanio et al., 2022).

Los sistemas cerrados se realizan separados del ambiente, el compostaje se lleva a cabo en recipientes conocidos como biorreactores (Figura 2-6) , a través de los cuales se puede controlar de mejor manera las condiciones del proceso. A diferencia de los anteriores, éstos tienen altos costos de construcción (Barthod et al., 2018) . Dentro de estos están:



**Figura 2-6.** Sistemas cerrados- reactor horizontal.

**Fuente:** Compostando ciencia

**Dinámicos o estáticos:** Se usa generalmente para la primera fase del compostaje que requiere mayor atención y control que la segunda fase, se lo hace con presencia o ausencia del movimiento del material dentro del biorreactor (Barthod et al., 2018).

**Horizontales y verticales:** Los biorreactores de flujo horizontal pueden tener un sistema de movimiento rotatorio o permanecer estáticos y los de flujo vertical que a su vez pueden ser continuos o discontinuos (Barthod et al., 2018).

La elección del sistema de compostaje de lodos depende del grado de estabilización de los mismos. Los lodos no estabilizados requieren un sistema cerrado y dinámico en la primera etapa para limitar el efecto del olor. En el caso de lodos estabilizados, que aseguran una buena estructura del montón de compost, el método adecuado es el de pilas con volteo que disminuye los costos del proceso (Kwarciak, 2019).

## **Variables que condicionan el compostaje**

Los parámetros que condicionan el compostaje son aquellos relacionados al crecimiento y reproducción de los microorganismos ya que ellos son los encargados de realizar el proceso biológico. Estos factores son: oxígeno o aireación, humedad del sustrato, temperatura, pH y relación C:N (Ascanio et al., 2022).

**Oxígeno o aireación:** Debido a que el compostaje es un proceso aerobio, necesita de una aireación adecuada para que los microorganismos puedan desarrollarse y cumplir con su metabolismo, desprendiendo CO<sub>2</sub>. Una elevada aieración produciría una disminución de la temperatura y pérdida de humedad. Mientras que una baja aireación no producirá la evaporación necesaria de agua y esto a su vez generará un exceso de humedad creando un ambiente anaerobio, malos olores y acidez. El rango debe ser entre el 5 y 10% de saturación de oxígeno. La aireación influye en los costes totales de operación, por lo que se considera una variable muy importante (Bohórquez, 2019).

**Humedad:** Variará según el estado físico y tamaño de las partículas, así como del sistema que utilice para el compostaje. Si el contenido de humedad es excesivamente bajo, disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso se hace lento. Por el contrario si el contendio de humedad es elevado no permitirá la oxigenación del material. El rango adecuado es del 45 – 60% de agua en peso de material base. La humedad de los materiales a compostar es la variable mas importante para la optimización del compostaje. Cuando hay un exceso de humedad, este puede ser reducido con mayor aireación, y cuando existe un buen control de la humedad y de la aireación, se controla adecuadamente la temperatura (Bohórquez, 2019).

**Temperatura:** El proceso empieza a temperatura ambiente, todo el material está a la misma temperatura, pero conforme van creciendo los microorganismos, se genera calor ocasionando el incremento de temperatura. El aumento de la temperartura es considerado como una de las variables fundamentales en el control del compostaje, existe una relación directa entre la tempertauro y la magnitud de degradación de la materia orgánica. La temperatura puede subir hasta los 65°C y después descender nuevamente hasta la temperatura ambiente, mientras mayor es la temperatura y el tiempo que dure

la misma, la velocidad de descomposición y la higienización es mayor (Bohórquez, 2019).

**pH:** Tiene una incidencia directa en el proceso de compostaje, ya que define la supervivencia de los microorganismos. Con el seguimiento de pH se obtiene una medida indirecta de la aireación de la pila, debido a que si no está aireada correctamente y se crean ambientes anaerobios, se crean ácidos orgánicos que provocan un descenso en el pH. El pH varía en cada etapa en un rango de 4.5 a 8.5, en la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH por la formación de ácidos orgánicos, en la fase termofílica, el pH sube y se vuelve un poco alcalino ya que se da la conversión del amonio presente en amoníaco, y en la tercera fase tiende a la neutralidad ya que se forman compuestos húmicos. Un compostaje con aireación adecuada da como resultado un producto final con un pH entre 7 y 8 (Bohórquez, 2019).

**Relación C:N:** Una relación adecuada de C:N permitirá un buen crecimiento y reproducción de los microorganismos, ya que el C lo utilizan como fuente de energía y el N para la síntesis proteica. Cuando hay exceso de C, el proceso tiende a enfriarse y a ralentizarse, es necesario adicionar materiales ricos en nitrógeno hasta obtener una adecuada relación C:N. Al contrario, cuando hay exceso de nitrógeno, el proceso tiende a calentarse en exceso y se producen malos olores debido a que se libera amoníaco, para esto, hay que agregar materiales con mayor contenido de carbono (aserrín, hojas secas). La relación óptima para un compost maduro es cercano a 10 (Gao et al., 2019).

### **Compostaje de lodos activados**

El propósito de la utilización de los lodos en la agricultura es el aprovechamiento de los nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio y la materia orgánica para fertilizar el suelo. Los lodos activados pueden ser utilizados en la agricultura siempre y cuando cumplan con las normas vigentes en cuanto a parámetros físico químicos y microbiológicos, aunque generalmente la cantidad de lodo se limita por los requerimientos nutricionales de los cultivos (Asses et al., 2018).

El compostaje es un método alternativo sencillo y rentable para los lodos de una PTAR de industrias alimenticias, a través de la descomposición de la materia orgánica, la producción de un residuo estabilizado y la eliminación de patógenos. Los compuestos

orgánicos de los lodos se convierten en sustancias húmicas generando una reducción del volumen del lodo (Saldaña et al., 2022).

Los lodos de las PTAR presentan ciertos problemas para poder compostarlos principalmente relacionados al alto contenido de agua (95%), estructura y composición (Asses et al., 2018). Su alta humedad reduce los espacios vacíos en el lodo dificultando la transferencia de oxígeno, esto hace que tenga una estructura de masa compacta que no permiten una buena fermentación. En cuanto a la composición los lodos, son ricos en nitrógeno, pero déficit de fósforo. Se debe encontrar un material rico en carbono que equipare el exceso de nitrógeno amoniacal presente en los lodos y a su vez, ayude a las variables para disminuir la humedad y aumentar la porosidad, es por esto que se utiliza materiales de soporte con el objeto de mejorar las características nutricionales y estructurales del lodo (Saldaña et al., 2022). Entre los materiales que más se utilizan están aquellos que contienen celulosa como: aserrín, corteza, paja, hojarasca, cascarilla de arroz (Delgado et al., 2019)

## **2.2. Antecedentes**

### **2.2.1. Perspectiva general de los lodos residuales**

Según Sánchez et al. (2020), en la actualidad, uno de los principales desafíos por los que pasan las empresas que tienen plantas de tratamiento de aguas residuales, es el método que deben usar para realizar la adecuada disposición de los lodos que se generan como subproducto, debido a que estos representan una importante fuente de contaminación. En su investigación llegan a la conclusión de que la disposición final de los lodos genera ciertos gastos económicos, puesto que requieren de la instalación de reactores o de sistemas de estabilización para el tratamiento. Es por ello que, en ciertas ocasiones, son vertidos sin tratamiento alguno a los cuerpos de agua, al igual que a los rellenos sanitarios, lo que aumenta la contaminación ambiental.

Durante una investigación realizada por Magee et al. (2018), corroboraron que los lodos residuales pueden contener diversos tipos de materiales inorgánicos como metales pesados, químicos, patógenos, bacterias, protozoarios, helmintos, entre otros. Esto causa que sea de gran preocupación la gestión que se les da a dichos residuos, ya que ponen en riesgo la salud y el medio ambiente. A su vez, Chu et al. (2020), mencionan en su investigación que los lodos residuales tienen un gran contenido de materia orgánica, brindando así múltiples oportunidades de implementar modelos o

estrategias de reutilización. Debido a esto, lodos residuales son objeto de procesos investigativos con el fin de implementar gestiones adecuadas para crear nuevos productos finales.

Con base a las diversas investigaciones que se han realizado alrededor del mundo, Saldaña et al. (2021) en su estudio identificó los posibles métodos de estabilización, los mismos que los clasifica en convencionales y sostenibles; dentro de los sostenibles menciona el compostaje. La necesidad de la estabilización o del tratamiento de los lodos depende de la disposición o reutilización que se pretenda darles, con tres propósitos fundamentales: la eliminación de olores, la disminución del potencial de putrefacción y la reducción de la carga patógena, además menciona que para la realización adecuada de los procesos de estabilización y eliminación de los lodos residuales es importante identificar características como la calidad, la cantidad, las condiciones físicas del lugar y los costos que se requieren para su manejo.

### **2.2.2. Aprovechamiento de lodos residuales**

Sánchez et al. (2020) analizaron alternativas para estabilizar lodos residuales utilizando normativas ambientales internacionales: U.S Environmental Protection Agency – Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la Norma oficial mexicana para biosólidos y lodos (NOM-004-SEMARNAT-2002) para determinar la clase de lodo, mediante la caracterización de los mismos en cuanto a: proteínas, nitrógeno volátil, humedad, materia orgánica, metales pesados y especificaciones microbiológicas.

Un modelo de economía circular o de gestión sostenible fue aplicado por Alonso et al. (2016) a las PTAR hacia la valorización agrícola de los lodos. Utilizaron 3 tipos de lodos provenientes de diferentes plantas de tratamiento, estudiaron diferentes parámetros de calidad para el compost, entre los cuales están: higienización, contenido de micro y macronutrientes, metales pesados, valores nutricionales, rendimiento de los cultivos, comportamiento en postcosecha. Además, para elaborar el compost utilizaron el sistema de pilas, las cuales estuvieron en capas, alternando lodos y residuos vegetales, con seguimiento de parámetros como: temperatura, agua aportada, humedad, volteos y olores.

Según Hoang et al. (2022), el compostaje es una de las alternativas para el aprovechamiento de los lodos residuales, menciona que este un proceso aerobio, donde

se convierten los lodos en una fuente de nutrientes para plantas y carbono orgánico estabilizado, de tal manera que puede ser empleado como acondicionador y fertilizante del suelo, sin embargo, esta aplicación puede conllevar a contaminar los suelos con metales pesados y patógenos, además de generar emisiones gaseosas (especialmente amoníaco) y olores molestos.

De igual forma, Muñoz et al. (2019), mencionan que el compostaje de lodos residuales permite nutrir los suelos por su carga orgánica, mejorando notablemente las propiedades físicas del terreno como el color, estructura, porosidad, densidad aparente, permeabilidad, entre otros, y aumentando la actividad biológica del mismo, por el porcentaje de materia orgánica. Las ventajas de este caso de aplicación pueden ser: cambio en la estructura logrando mayor estabilidad, aumento de impermeabilidad al lograr solidez de los agregados, incremento de resistencia mecánica del suelo y mayor estabilidad del suelo logrando el sello superficial.

### **2.2.3. Características de un buen compost**

Para el compostaje de lodos, se requieren los siguientes valores: un contenido de humedad del 50-60%, un pH entre 5 y 9, una proporción de C:N entre 25 y 35, contenido de materia orgánica de 20-80% y un tamaño de partícula entre 12 y 60mm. La adición de un agente de carga es necesaria para el compostaje de lodos residuales y, dependiendo de los agentes de carga, se pueden mejorar las propiedades del sustrato, como el espacio de aire, el contenido de humedad, la proporción de C:N, la densidad de partículas, el pH y la estructura mecánica. Los productos lignocelulósicos, como las astillas de madera y el aserrín, se utilizan comúnmente como agentes de carga (Pascual et al., 2018).

Según Barthod et al. (2018), se pueden agregar varios sustratos a los lodos durante el proceso de compostaje. Se les considera agentes de carga, cuando solo actúan sobre la estructura física del compost (aireación), pero en su mayoría, tienen efectos directos o indirectos sobre otros parámetros del compostaje y se los considera aditivos. Estos permiten reducir la lixiviación y emisiones de gases, ayudan a mejorar la aireación del compost, aceleran la degradación de la materia orgánica y mejoran el contenido y la disponibilidad de nutrientes en el producto final.

Kwarciak (2019) realiza un estudio acerca del compostaje de lodos residuales y material vegetal, señala que para el compostaje se requiere material adicional para

lograr el contenido de agua deseado y crear las condiciones de aireación adecuadas. Establece que la ventaja del compostaje de lodos crudos es el elevado contenido de materia orgánica, que es la fuente de carbono orgánico (18%-25%), pero este tipo de lodos pueden estar contaminados con microorganismos patógenos. Analizan desde un punto de vista tecnológico el sistema de compostaje, y señalan que para los lodos crudos se puede realizar en montones o reactores con o sin aditivos de material. Determinan que la elección del sistema de compostaje depende del grado de estabilización de los lodos y de los tipos de residuos utilizados para el compostaje, los lodos no estabilizados requieren un sistema cerrado y dinámico en la primera etapa para limitar el efecto del olor o también en una pila estática con aspiración forzada, que de igual manera permite controlar la limpieza del aire contaminado. El sistema que recomiendan son las pilas con volteo. Indican que el compostaje solo de los lodos residuales produce un compost de baja calidad por su elevado contenido de humedad, baja permeabilidad del aire, altos contenidos de compuestos nitrogenados y metales pesados, propone que, para controlar estos parámetros, mezclar los lodos con aserrín, cascarilla de arroz, pasto, hojas secas, residuos de poda.

Jain et al. (2019), informan que una configuración adecuada de las pilas de compostaje es con una relación C:N = 30:1, ya que alcanza una temperatura  $> 45^{\circ}\text{C}$  (termofílica) durante más de 20 días y el producto se vuelve estable pasado los 90 días. De acuerdo a esta investigación, la física del compostaje es una característica muy importante, dentro de los parámetros físicos están: densidad aparente, porosidad, humedad, espacio libre de aire, densidad de partículas; ya que el proceso es afectado por la disponibilidad de agua y aire. Una variación de estos parámetros podría ocasionar efectos en el proceso, es por esto que este estudio se basó en la física del compostaje durante el proceso, agregando aserrín y estiércol de vaca, al finalizar el proceso, se determinó que pocos parámetros físicos están correlacionados entre sí, como la densidad aparente y el espacio libre, y que el contenido de humedad y el espacio libre si se relaciona fuertemente.

Una comparación entre los efectos del compost y un fertilizante inorgánico en la calidad del suelo y los cultivos fue realizada por Abdul et al. (2017), en la que midió el contenido de metales pesados. Los 2 fertilizantes utilizados tenían diferentes propiedades físico químicas, se aplicaron en suelos y en cultivos, las muestras fueron tomadas 2 veces por semana en la que se registró pesos y se midió el crecimiento,



además del contenido de metales pesados. De acuerdo a los datos que se obtuvo demostraron que el compost tuvo mayor rendimiento en los cultivos comparados con el fertilizante inorgánico, además sugirieron que se deben hacer investigaciones a largo plazo por lo menos 5 años, para poder determinar correctamente el efecto del compost a base de lodos residuales en la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos.

En una investigación realizada por Castellanos et al. (2019), analiza el compostaje en pilas con volteo menores a  $1\text{m}^3$ , y espaciamiento entre 1 y 2m entre ellas, además utilizaron material de soporte como cáscaras de huevo, restos de poda y cañas de maíz. Durante el proceso de compostaje se midieron las propiedades físico químicas y microbiológicas para determinar si es factible la elaboración del compost en pilas con un volumen reducido. Con todos los resultados obtenidos se demostró que, si es posible compostar lodos en pilas de ese tamaño, pero utilizando materiales de soporte que aceleren el proceso.

#### **2.2.4. Evaluación de riesgos del compostaje de lodos activados residuales**

Lasaridi et al. (2018) evalúan los peligros para el hombre y el medio ambiente durante el compostaje de lodos residuales. Consideran al compostaje como un método eficaz de tratamiento para suprimir los problemas relacionados con el uso agrícola de los lodos, como la presencia de patógenos, ciertos contaminantes y la fermentación incontrolada de materia orgánica inestable. De igual forma disminuye el contenido de contaminantes orgánicos y una reducción en la biodisponibilidad de metales pesados durante el compostaje. Sin embargo, mencionan que el compost no siempre es un producto inofensivo, puesto que algunos sustratos que se utilizan incluidos los lodos residuales pueden contener contaminantes químicos y biológicos que pueden representar riesgosos para la salud y el medio ambiente. Los peligros más importantes están relacionados con la presencia de contaminantes patógenos y a el grado de estabilidad del compost, para erradicar estos problemas, mencionan que es necesario tener un buen control de las variables durante todo el proceso. Para lograr una mayor tasa de estabilización es necesario una mayor proporción de agentes de carga y para la reducción o eliminación de patógenos, alcanzar temperaturas altas en la etapa termofílica para una buena higienización.

El tratamiento de los lodos residuales ha generado preocupaciones ambientales en lo que tiene que ver a las emisiones gaseosas que se producen durante su estabilización

que se generan por la descomposición de la materia orgánica, compuestos de nitrógeno y azufre, compuestos volátiles que son los que generan inconvenientes por los olores, es por esto que González et al. (2019), en su investigación, estudian el impacto que se produce al aumentar el tiempo de residencia de los residuos de compostaje sobre las emisiones de amoníaco y compuestos orgánicos volátiles, el tiempo aumentaron de 4 a 14 días, al final del proceso de compostaje se observó una evolución favorable en cuanto al incremento de temperatura y nivel de degradación de nutrientes, además las emisiones gaseosas se reducen sobre todo en el amoníaco generado .

En una investigación realizada por Shen et al. (2020) describe que en el compostaje se pueden generar ciertos gases como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) dependiendo de diferentes factores como la temperatura, humedad, pH y aireación. Durante la primera fase se produce  $\text{CO}_2$ , debido a la degradación de la materia orgánica y que durante los primeros volteos se libera al ambiente, pero debido a que este gas es de origen biológico no se considera como gas de efecto invernadero. El  $\text{CH}_4$  igualmente se produce durante la degradación de la materia orgánica, pero en condiciones anaeróbicas y el  $\text{NH}_3$ , se produce por la descomposición de las proteínas en la fase termofílica, y este aumenta cuando hay pH alcalinos y humedades alrededor o superiores al 60%.

Un compost que no está bien estabilizado puede producir problemas una vez utilizado en el suelo, por el consumo de oxígeno de algunas sustancias y también en la fácil solubilidad de nutrientes y contaminantes, como lo explican Bożym et al. (2018) en su estudio, a través de la cual evaluaron el impacto que produce la etapa de maduración de los lodos compostados en la calidad del compost, tomó muestras solo en la etapa de maduración en las cuales además de analizar los parámetros físico químicos se enfocó en el grado de estabilidad, el cual es una característica muy importante para evaluar la calidad del compost, basándose en los índices de respiración aeróbica. Demostraron que el proceso de maduración influye en las características del compost en cuanto a niveles de materia orgánica, metales pesados y nutrientes.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ubicación

Esta investigación se realizó en la empresa Agrocompost Chiquicha en la provincia de Tungurahua, cantón Pelileo, parroquia Chiquicha (Figura 3-1).



**Figura 3-1.** Ubicación Agrocompost Chiquicha.

**Fuente:** Autor

#### 3.2. Equipos y materiales

**Tabla 3-1.** EQUIPOS Y MATERIALES.

Descripción	Equipos y materiales
Equipos y utensilios para elaborar compost	<ul style="list-style-type: none"><li>• Volqueta</li><li>• Bobcat</li><li>• Volteadora</li><li>• Palas</li><li>• Medidor portátil de temperatura, humedad y pH</li></ul>
Materiales e insumos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aserrín</li><li>• Cal</li><li>• Lodo activado residual</li><li>• Agua</li><li>• Sacos de polipropileno</li></ul>

**Tabla 3-2.** EQUIPOS Y MATERIALES (continuación).

Descripción	Equipos y materiales
Equipos informáticos y software	<ul style="list-style-type: none"><li>• Laptop</li><li>• Cámara fotográfica</li><li>• Software estadístico</li></ul>
Suministros de oficina	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lápices</li><li>• Esferos</li><li>• Libreta de campo</li></ul>

**Elaborado por:** Autor

### 3.3. Tipo de investigación

Esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo debido a que siguió un método sistemático para su solución, se partió de un problema concreto y delimitado seguido de los objetivos a los cuales se quiso alcanzar. Además, se utilizó los resultados del análisis de los lodos lo que permitió probar la hipótesis de su posible transformación y reutilización como materia prima conjuntamente con material de soporte para la elaboración de compost. Se aplicaron pruebas sustentadas en revisión bibliográfica que permitieron determinar la eficiencia del compost elaborado.

También tuvo una modalidad experimental pues se manipuló la variable independiente que corresponde al aprovechamiento y estabilización del lodo activado residual, combinándola con un material de soporte en distintas concentraciones, para así observar el efecto que produce en la variable dependiente que corresponde a la elaboración de compost. Para la obtención y recolección de los datos se estableció diferentes formulaciones que permitieron manipular las variables. El resultado de la investigación fue medido pues se determinaron datos de diferentes variables durante todo el proceso de compostaje, los mismos que basados en pruebas estadísticas permitieron evaluar la efectividad de la propuesta de una alternativa sustentable para la disposición final de los lodos activados residuales.

De igual forma tuvo una modalidad bibliográfica – documental ya que se indagó e interpretó información bibliográfica sobre temas e investigaciones relacionadas al aprovechamiento de los lodos residuales mediante la elaboración de compost. Toda la información que se recolectó, sirvió como base para realizar la investigación planteada. La búsqueda de la información bibliográfica se fundamentó en los objetivos que se quisieron alcanzar, de esta manera se evitó realizar investigaciones ya

ejecutadas, se modificó los parámetros que utilizaron en investigaciones anteriores y así se obtuvieron nuevos resultados para investigaciones futuras.

### **3.4. Prueba de hipótesis – pregunta científica – idea a defender**

#### **3.4.1. Hipótesis nula**

**H<sub>0</sub>:** La mezcla de material de soporte con lodos activados residuales generados en una PTAR de empresas de alimentos no permiten mejorar las condiciones para el aprovechamiento y reutilización de los mismos, a través de la elaboración de compost.

#### **3.4.2. Hipótesis alternativa**

**H<sub>1</sub>:** La mezcla de material de soporte con lodos activados residuales generados en una PTAR de empresas de alimentos permiten mejorar las condiciones para el aprovechamiento y reutilización de los mismos, a través de la elaboración de compost.

### **3.5. Población o muestra**

#### **3.5.1. Población**

La población para esta investigación correspondió a la producción mensual de lodo activado residual generado en la PTAR, que es una cantidad aproximada de 240m<sup>3</sup> (225120kg).

#### **3.5.2. Muestra**

El tamaño de la muestra fue lo equivalente a la producción semanal de lodo que es aproximadamente 56m<sup>3</sup> (52528kg) y sirvió como base para la elaboración de las diferentes formulaciones del compost.

### **3.6. Recolección de información**

#### **3.6.1. Caracterización del lodo activado residual**

Primero fue necesario verificar que el lodo activado residual generado en la PTAR de la industria alimenticia no es un residuo peligroso, para esto se realiza un análisis CRETIB (corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso) lo que permite certificar que el lodo puede ser aprovechado como alternativa sustentable dentro de lo que se plantea en esta investigación.

Para la caracterización inicial del lodo, la empresa de alimentos tiene dentro su responsabilidad ambiental, el monitoreo de dicho material con periodicidad anual por medio de una muestra puntual, cuyos análisis los realizan un laboratorio externo acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriana (SAE). Como medio de verificación se utilizó el último informe CRETIB realizado al lodo en la empresa.

Después fue necesario una segunda caracterización para que pueda ser utilizado con fines agrícolas, a través del cual se determinó si cuenta con los nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos y determinó su factibilidad en la elaboración de compost. Para esto se envió una muestra representativa de 1kg de lodo, a un laboratorio para la cuantificación de los siguientes parámetros: relación C:N, materia orgánica, carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, sodio y pH.

### **3.6.2. Compostaje**

#### **Conformación de las pilas de compostaje**

Para la elaboración del compost se utilizó un sistema abierto mediante pilas con volteo mecánico.

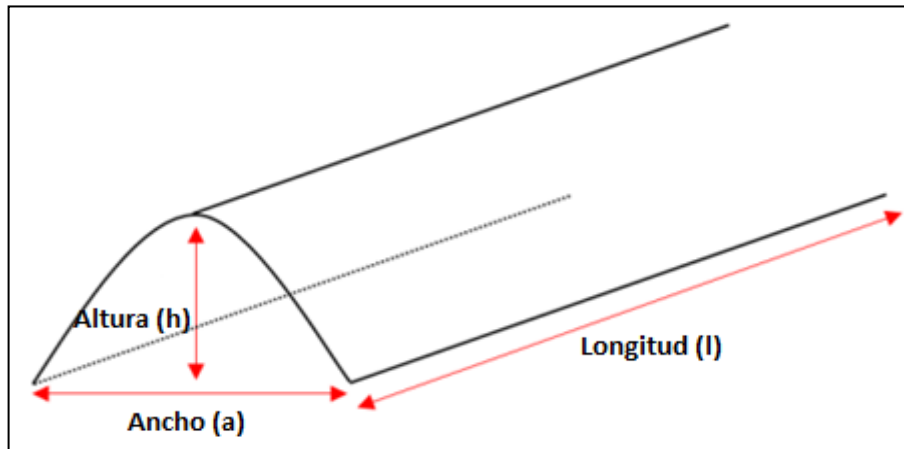
Se ejecutó 5 ensayos con diferentes formulaciones de mezclas homogéneas de lodo activado residual y aserrín como material de soporte, además de un blanco que correspondió a solo lodo activado. Los ensayos permitieron determinar las proporciones adecuadas para obtener un compost idóneo y que aporte con los nutrientes necesarios para que el suelo mejore sus propiedades agrícolas.

#### **Dimensionamiento de las pilas de compostaje**

El tamaño de las pilas depende del contenido de humedad del lodo para lograr las alturas y espesores adecuados, que garanticen un ambiente adecuado para que ocurran las diferentes reacciones bioquímicas durante el proceso de compostaje. Generalmente las pilas de compostaje tienen la forma de un domo o un paralelepípedo como se observa en la Figura 3-2. Basados en bibliografía (Ascanio et al., 2022), se realizaron pilas de 0,60m de altura, 1.5m de ancho y la longitud se determinó con la ayuda de la fórmula del volumen de un paralelepípedo ( $V=a \times h \times l$ ) que es la medida aproximada al volumen de la pila por su semejanza en la forma.

Para determinar el volumen de los materiales fue necesario conocer la densidad de cada uno de ellos. Para la cual se determinó la densidad del lodo conociendo su peso

y volumen, y para el aserrín se utilizó la densidad aparente de  $450\text{kg/m}^3$  reportada por Garibay et al. (2019).



**Figura 3-2.** Dimensionamiento de la pila de compostaje.

**Fuente:** Autor

### **Variables a medir durante el proceso de compostaje**

Se midió 3 variables durante todo el proceso de compostaje a través de las cuales se evidenciaron todas las etapas que cursa el material a compostar hasta la obtención del producto final. Para la medición de estas variables se utilizó un medidor portátil de temperatura, humedad, pH y luz de suelos (4 en 1) marca MED, modelo MED, con sonda sensible.

Para la medición de las variables de temperatura y humedad se siguió la metodología de la norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, la cual indica que estos parámetros deben ser registrados diariamente, introduciendo la sonda del equipo hasta aproximadamente la mitad de la altura de la pila. De igual forma, sugiere realizar la medición en 3 puntos a lo largo de la pila: a la mitad de la longitud de la pila y en los extremos de la pila descartando los primeros y últimos 2 metros.

Para el pH se adaptó la metodología de la norma mexicana explicada anteriormente, con la diferencia de que estos datos fueron tomados con una frecuencia semanal ya que en la norma solo indica que debe ser medidos periódicamente.

Para evitar la aparición de vectores y proliferación de los mismos durante el proceso de compostaje, se usó cal.

### **Frecuencia de volteo**

Durante los primeros 15 días el material en proceso de compostaje permaneció en reposo, posteriormente se realizó el primer volteo con el fin de oxigenar el material y evitar que entre en una fase anaerobia (sin oxígeno) perdiendo sus propiedades bioquímicas para el compostaje. Después los volteos se realizaron 1 vez por semana como lo recomienda Ascanio et al. (2022), durante aproximadamente 90 días que fue el tiempo que duró el proceso de elaboración de compost, tomando en cuenta los factores ambientales: clima, humedad relativa, temperatura ambiental. Para los volteos se utilizó una máquina volteadora que removió y mezcló toda la pila para garantizar un material homogéneo.

### **Caracterización del compost**

Al tratamiento que presentó mayor eficiencia otorgada por el control de temperatura en cada uno de ellos, mediante la observación de la finalización de la etapa de maduración en las curvas de temperatura de los diferentes tratamientos; y por el diseño experimental aplicado, se procedió a caracterizar el compost que resultó el mejor de todos los ensayos.

Para la caracterización se recolectó una muestra representativa siguiendo la metodología de muestreo de la norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 que indica que dependiendo del volumen de la pila hay que tomar 10 submuestras pequeñas a lo largo de la misma, formar una mezcla compuesta homogénea y de esta tomar 1kg para constituir la muestra final. La muestra se envió a analizar a un laboratorio, los parámetros analizados fueron: Relación C:N, materia orgánica, fósforo, potasio, nitrógeno y carbono; los mismos que son los más importantes para evaluar la calidad del compost obtenido.

### **3.7. Procesamiento de la información y análisis estadístico**

Con los datos de la caracterización del lodo activado residual se pudo identificar si es un lodo peligroso o no peligroso, y a su vez se comparó con ciertos parámetros establecidos en la Norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para lodos y biosólidos que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, para comprobar que los lodos eran aptos para la elaboración de compost.



Para la toma de datos de temperatura, pH y humedad se aplicó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA), considerando como unidades experimentales los diferentes tratamientos (pilas) y como variables respuesta: los valores de temperatura, pH y humedad.

Para determinar el mejor ensayo de las 5 formulaciones de compost y el blanco, se basó únicamente en el análisis de las curvas de temperatura obtenidas de todos los tratamientos durante todo el proceso de compostaje, utilizando como filtros aspectos como: culminación de todo el proceso de compostaje en menor tiempo, identificación clara de las 4 fases del compostaje y temperaturas máximas alcanzadas en la fase termofílica; hasta llegar a un solo tratamiento que resulte el mejor.

Además, esta selección del mejor tratamiento se corroboró con los cálculos estadísticos del DCA, para esto se utilizó solo los datos de temperatura de la fase termofílica de cada tratamiento, primero se verificó que los datos siguen una distribución normal mediante un gráfico de probabilidad normal (Q-Q Plot), posteriormente se aplicó la prueba de Tukey-Kramer que permitió determinar las diferencias significativas entre los tratamientos e identificar cuál fue la mejor formulación de compost elaborada. Estos cálculos fueron procesados en el software estadístico Infostat versión 2020.

Finalmente, los datos de caracterización del mejor compost obtenido se compararon con los parámetros establecidos en las Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 y la Norma Chilena Oficial NCh2880.Of2004, relacionadas a la clasificación y requisitos que debe tener el compost.

### 3.8. Variables respuesta o resultados alcanzados

#### 3.8.1. Variable Independiente: Aprovechamiento y reutilización de lodos activados residuales

**Tabla 3-3.** VARIABLE INDEPENDIENTE.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítem básico	Técnicas e instrumentos
Los lodos activados residuales son una mezcla de agua y sólidos correspondientes a la concentración y acumulación de sólidos existentes en el efluente tratado en la PTAR, que pueden ser reutilizados y aprovechados luego de un proceso de estabilización.	Caracterización de lodos activados residuales	<p>Concentraciones de parámetros de análisis de verificación de residuo no peligroso.</p> <p>Concentraciones de parámetros necesarios para la utilización agrícola.</p>	<p>¿Qué análisis se debe evaluar para determinar que el lodo activado es un residuo no peligroso?</p> <p>¿Qué parámetros son necesarios evaluar para la utilización agrícola de los lodos?</p>	<p>Análisis CRETIB en laboratorio acreditado (métodos EPA y NOM-052-SEMARNAT-2005).</p> <p>Análisis de parámetros físico-químicos: relación C:N (espectrofotometría), materia orgánica (NEN 5754-2005), carbono (volumetría), nitrógeno (espectrofotometría), fósforo, potasio (métodos EPA), humedad (secado en estufa) y pH (métodos EPA).</p>

Elaborado por: Autor

### 3.8.2. Variable Dependiente: Elaboración de compost

**Tabla 3-4. VARIABLE DEPENDIENTE.**

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítem básico	Técnicas e instrumentos
El compost es un abono orgánico que se obtiene a partir de la descomposición controlada de la materia orgánica, aporta diversos beneficios al suelo y a las plantas, se lo utiliza en lugar de los fertilizantes químicos que causan daños al medio ambiente	Diferentes formulaciones de compost: material de soporte (aserrín) + lodo activado residual.	Parámetros físico-químicos de las 5 formulaciones y el blanco.	¿Cuáles son los principales parámetros físico-químicos a evaluar en las 5 formulaciones y el blanco?	Medición de parámetros físico-químicos durante todo el proceso de compostaje: temperatura, humedad, pH (NMX -AA-180-SCFI-2018).
	Caracterización del mejor compost obtenido	Parámetros físico-químicos y contenido de nutrientes del compost.	¿Cuáles son los parámetros físico-químicos y nutrientes necesarios para determinar la calidad del compost?	Análisis de parámetros físico-químicos: relación C:N, materia orgánica (NEN5754-2005), fósforo (ICP), potasio (ICP), nitrógeno (volumetría), carbono (volumetría), humedad (secado en estufa) y pH (NMX -AA-180-SCFI-2018).
	Rendimiento	Cantidad de compost obtenida en relación a la cantidad de materia prima utilizada.	¿Cuál será el rendimiento del producto final obtenido?	Cálculos de rendimiento en relación materia prima, producto obtenido.

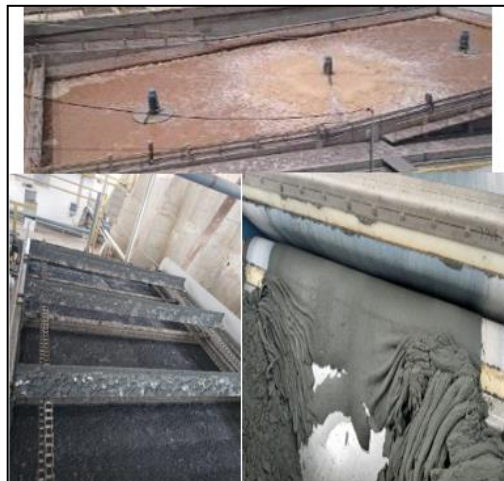
**Elaborado por:** Autor

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Caracterización del lodo activado residual

La composición de los lodos depende de las características de las aguas residuales que se tratan y además del proceso de tratamiento que se utiliza en las PTAR, a través de los cuales se obtienen estos residuos (Argudo et al., 2017). La empresa proveedora de estos lodos activados residuales utiliza un método biológico (Figura 4-1) para tratar el agua residual proveniente de los procesos de elaboración de gelatina.



**Figura 4-1.** Obtención de lodos activados residuales.

**Fuente:** Autor

Debido a que el proceso productivo no varía en cuanto a composición de materias primas e insumos, los lodos residuales mantienen las concentraciones de los diferentes compuestos dentro de los límites, sin embargo, para esta investigación se verificó que los lodos utilizados no son un residuo peligroso. Según la NTE INEN 2266 define a un residuo peligroso como “residuos sólidos, pastosos, líquidos o gaseosos resultantes de un proceso de producción, transformación, reciclaje, utilización o consumo y que contengan alguna sustancia que tenga características corrosivas, reactivas, tóxicas, inflamables, biológico –infecciosas, explosivas y/o radioactivas o explosivas (código C.R.E.T.I.B.), que representen un riesgo para la salud humana y el ambiente de acuerdo a las disposiciones legales aplicables; y, Residuos que, posterior a un proceso controlado de limpieza pueden ser transformados en residuos especiales”.

El Ecuador no dispone de una legislación propia para hacer comparaciones CRETIB por lo que para esta investigación se utilizó normas establecidas por el organismo de seguridad y protección ambiental SEMARNAT en México, que establecen regulaciones para la clasificación y uso de estos residuos basados en la calidad. Para determinar que el lodo residual utilizado no es un residuo peligroso es necesario realizar un análisis CRETIB, por lo que se utilizó el último informe de análisis que la empresa de alimentos lo realiza anualmente como parte de su responsabilidad ambiental para controlar el lodo residual producido en la PTAR (Anexo 1), y se lo comparó con los límites permisibles de la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

Como se puede observar en la Tabla 4-1, los resultados obtenidos de los análisis físico químicos y microbiológicos están dentro de especificaciones, la norma considera a los residuos como tóxicos cuando presenta concentraciones de metales pesados superiores a los límites máximos permisibles establecidos en la misma, el contenido de metales pesados del lodo residual resultó muy por debajo de los límites, por lo que no se considera como un residuo tóxico ambiental.

No es reactivo ya que según la norma cuando el residuo se pone en contacto con agua, ácido o algún álcali, reacciona espontáneamente y genera gases inflamables, o sin una fuente de energía suplementaria genera calor; según el informe de análisis, el lodo residual no reaccionó ni con agua ni con ácidos. De igual forma según la norma es reactivo cuando el residuo posee en su constitución cianuros o sulfuros liberales, que cuando se expone a condiciones ácidas genera gases en cantidades mayores a 250mg de ácido cianhídrico (HCN) por kg de residuo o 500mg de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) por kg de residuo; y como se observa en los resultados se obtuvo concentraciones de <0,01mg/kg de HCN y 0,06mg/kg de H<sub>2</sub>S por lo tanto no se considera como reactivo.

Igualmente, la norma considera a un residuo como corrosivo cuando es un líquido acuoso o es un sólido que al mezclar con agua destilada presenta un pH  $\leq 2,0$  o  $\geq 12,5$ ; o cuando es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón a una velocidad de 6,35mm o más por año a una temperatura de 55°C, como se visualiza en los resultados obtenidos el lodo presentó un pH de 7,56 y la velocidad de corrosión fue de 0,05mm/año, por lo tanto, no es un residuo corrosivo.

Se considera explosivo cuando es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva solo o en presencia de una fuente de energía, o si es calentado bajo confinamiento, la muestra analizada no reaccionó ni se descompuso por lo que el lodo residual utilizado no es explosivo.

Así mismo, la norma considera a un residuo como inflamable cuando el líquido que contiene sólidos en solución cuyo punto de inflamación es inferior a 60,5°C, exceptuando las soluciones acuosas que tienen un porcentaje de alcohol menor al 24%. Cuando no es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción; o es un gas comprimido, inflamable u oxidante. El lodo analizado no es líquido acuoso ni tampoco gas y no es capaz de provocar fuego, por lo que no se lo catalogó como residuo inflamable.

Finalmente, la norma considera a un residuo como biológico-infeccioso cuando hay la presencia de microorganismos capaces de producir enfermedades cuando están en concentraciones suficientes y en un ambiente propicio. Los principales microorganismos patógenos analizados para catalogar a un residuo como biológico-infeccioso son: coliformes fecales, *Salmonella* y huevos de helminto en concentraciones superiores a  $2 \times 10^6$  NMP o UFC/g, 1000/g y 15/g respectivamente; en los resultados del análisis microbiológico de los lodos se observó que está dentro de especificaciones por lo tanto el lodo residual tampoco es un residuo biológico-infeccioso.

Según Escalante (2021), el 98% de lodos residuales provenientes de la industria alimentaria no son peligrosos y se encuentran dentro de los límites permisibles de toxicidad, pudiendo darles una alternativa para su disposición final, como es el caso del lodo residual utilizado para esta investigación.

En el Ecuador se estableció el Acuerdo ministerial 142, en el 2012, donde se enlista las sustancias químicas peligrosas y desechos peligrosos, dentro del cual no se categoriza a los lodos residuales provenientes de industrias alimenticias como desechos peligrosos. Sin embargo, es necesario que la autoridad ambiental emita un certificado de que declare a esos lodos residuales como desechos no peligrosos, ya que basados en el Art. 228 del Código Orgánico del Ambiente (2017) que menciona que “De la política para la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos. La gestión de los residuos sólidos no peligrosos, en todos los niveles y formas de gobierno, estará

alineada a la política nacional dictada por la Autoridad Ambiental Nacional y demás instrumentos técnicos y de gestión que se definan para el efecto.”

**Tabla 4-1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CRETIB DEL LODO ACTIVADO RESIDUAL.**

<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Valor límite permisible</b>
Arsénico	mg/L	<0,01	5,0
Cadmio	mg/L	<0,004	1,0
Níquel	mg/L	<0,05	5,0
Plomo	mg/L	0,06	5,0
Cromo	mg/L	<0,02	5,0
Reacción con agua	-	No reacciona	No reacciona
Reacción con ácidos	-	No reacciona	No reacciona
Reacción con álcali	-	No reacciona	No reacciona
Generación de HCN	mg/kg	<0,01	250
Generación de H <sub>2</sub> S	mg/kg	0,06	500
pH	Unidades de pH	7,56	≥2 ≤12,5
Velocidad de corrosión	mm/año	0,05	6,35
<i>Salmonella</i>	-	Ausencia	1000/g
Coliformes fecales	NMP/g	21000	Media geométrica de 7 muestras o igual a 2x10 <sup>6</sup> NMP o UFC/g
Huevos de parásitos	-	Presencia	15/g
Constante de explosividad	-	No aplica	Constante menor a dinitrobenceno

**Tabla 4-2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CRETIB DEL LODO ACTIVADO RESIDUAL (continuación).**

<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Valor límite permisible</b>
Reacción o descomposición detonante o explosiva	-	No reacciona, no se descompone	No reacciona, no se descompone
Contenido de alcohol si es acuoso	-	No lo es	<24%
Punto de inflamación si es líquido	-	No lo es	>60°C
Capaz de provocar fuego si no es líquido	-	No es capaz	No es capaz
Es gas comprimido inflamable y oxidante	-	No lo es	No lo es

**Elaborado por:** Autor

NMP: número más probable

UFC: unidades formadoras de colonias

**Fuente:** Informe de resultados No. LD-024-21 (LABCESTTA)

Con este análisis CRETIB se demostró que el lodo residual que se utilizó para esta investigación no es un residuo peligroso y por lo tanto no es un factor limitante para su aprovechamiento en la elaboración del compost. Y de igual forma la empresa proveedora de los lodos residuales posee el certificado emitido por la autoridad ambiental de que no son desechos peligrosos, basados en el análisis CRETIB.

Una segunda caracterización fue necesaria realizar a los lodos activados residuales con el fin de evaluar la disponibilidad de fitonutrientes necesarios y útiles para la elaboración del compost. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-2, los mismos que permitieron corroborar que el lodo residual utilizado para esta



investigación fue apto para su utilización. El informe emitido por el laboratorio externo se visualiza en el Anexo 2.

**Tabla 4-2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FITONUTRIENTES EN EL LODO ACTIVADO RESIDUAL.**

<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
Fósforo	mg/kg	>1000
Potasio	mg/kg	2424,97
Materia orgánica	%	90,32
Nitrógeno total	%	8,94
Carbono orgánico	%	51,12
Relación C:N	-	5,72

**Elaborado por:** Autor

**Fuente:** Informe de resultados N° LD-011-21

Como se observa en el lodo analizado existió la presencia de los fitonutrientes esenciales para el proceso de compostaje como son: fósforo, potasio, nitrógeno (Jiménez et al., 2018). La presencia de nitrógeno y potasio se debe a la composición de la materia prima utilizada en la empresa de alimentos la cual corresponde a piel de ganado vacuno (carnaza), el fósforo es por la utilización de ácido fosfórico como nutriente para los microorganismos que trabajan en el tratamiento del agua residual, como se explicó anteriormente la PTAR trabaja bajo un sistema biológico. Por lo tanto, tuvo un alto contenido de materia orgánica y de igual forma, carbono orgánico.

El lodo residual se caracteriza por tener un relación C:N baja, generalmente entre 4.8 -13 (Ozdemir et al., 2019), como se evidencia el resultado obtenido fue de 5,72; es por esto que Lu et al. (2020), consideran añadir un material de enmienda o de soporte que aumente este valor para poder tener un buen proceso de compostaje, este parámetro es muy importante ya que el C y N son fundamentales, el C (fuente de energía) y el N (fuente de proteína) necesarias para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos que compostan el material.

Debido a la presencia de nutrientes y materia orgánica en el lodo, se comprueba que se trata de un biosólido (Figura 4-2) según la definición establecida en la norma NOM-004-SEMARNAT-2002.



**Figura 4-2.** Biosólido (lodo activado residual).

**Fuente:** Autor

#### **4.1.1. Clasificación y uso del lodo activado residual en cuanto al límite permisible de metales pesados y análisis microbiológicos según la norma NOM-004-SEMARNAT-2002**

Esta norma clasifica a los biosólidos en Excelentes y Buenos según el contenido de metales pesados, como se observa en la Tabla 4-3, el contenido de metales pesados está muy por debajo de los límites permisibles por lo que el biosólido utilizado se lo consideró como Excelente.

**Tabla 4-3.** CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS DEL BIOSÓLIDO Y COMPARACIÓN CON LA NORMA MEXICANA.

<b>Contaminante (determinados en forma total)</b>	<b>Resultado mg/kg <sup>a</sup></b>	<b>EXCELENTES mg/kg en base seca <sup>b</sup></b>	<b>BUENOS mg/kg en base seca <sup>b</sup></b>
Arsénico	<10	41	75
Cadmio	<0,25	39	85
Cromo	<50	1200	3000
Cobre	60,46	1500	4300
Plomo	<10	300	840
Níquel	<10	420	420
Zinc	162,62	2800	7500

**Elaborado por:** Autor

**Fuente:** <sup>a</sup> Informe de resultados N° LD-011-21 (LABCESTA)

<sup>b</sup> NOM-004-SEMARNAT-2002

De igual forma, la norma clasifica a los lodos residuales en: A, B y C según el contenido de indicadores biológicos de contaminación, parásitos y patógenos. De acuerdo a los valores reportados en el análisis CRETIB el lodo residual utilizado se lo considera de clase C, puesto que el contenido de coliformes fecales es menor que el límite permisible como se observa en la Tabla 4-4, cuando el lodo residual se clasifica como C no es necesario analizar patógenos (*Salmonella*) y parásitos (huevos de helminto), sin embargo, en el informe se reporta ausencia de *Salmonella* y presencia de huevos de helminto.

**Tabla 4-4.** ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL BIOSÓLIDO Y COMPARACIÓN CON LA NORMA MEXICANA.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A <sup>a</sup>	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B <sup>a</sup>	Menos de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C <sup>a</sup>	Menor de 2000000	Menor de 300	Menor de 35
<b>Resultado<sup>b</sup></b>	2100	Ausencia	Presencia

**Elaborado por:** Autor

(a) Huevos de helminto viables  
NMP número más probable

**Fuente:** <sup>a</sup> NOM-004-SEMARNAT-2002

<sup>b</sup> Informe de resultados N° LD-024-21 (LABCESTA)

Una vez categorizado el lodo residual de tipo Excelente y de clase C, según esta norma, se verificó que el lodo residual utilizado en este proyecto puede ser aprovechado para usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas, como se visualiza en el numeral 2.1.2. Tabla 2-1.

## 4.2. Compostaje

### 4.2.1. Conformación de pilas de compostaje

Debido a que el lodo residual (Figura 4-3) presentó una relación C:N de 5,72 (Tabla 4-2), indicando que hay gran cantidad de N, se mezcló con un material de soporte rico en C para compensar el exceso de N y mejorar la relación C:N, en este caso se utilizó aserrín (Figura 4-4) que tiene una relación de C:N de 400, que según (Jiménez et al., 2018) es un material rico en C de lenta descomposición que además ayuda a disminuir el contenido de humedad de la mezcla, mejora la aireación, reduce las pérdidas de N, aporta con C adicional para la actividad microbiana optimizando el proceso y mejorando el producto final.



**Figura 4-3.** Materia prima (lodo activado residual).

**Fuente:** Autor



**Figura 4-4.** Material de soporte (aserrín).

**Fuente:** Autor

Se tomó la decisión de que cada pila estuviese formada por un total de mezcla de 10000kg, ya que se considera una cantidad idónea para obtener un buen proceso con excelentes resultados, basados en la producción semanal de lodo.

Siendo el lodo residual la parte medular de esta investigación, el principal criterio para la selección de la cantidad del mismo en los diferentes tratamientos fue asegurar como mínimo el 50% en cada pila. Una pila se usó como blanco, la misma que solo estuvo conformada por el 100% de lodo residual, esto con el propósito de evaluar la influencia de la adición de material de soporte en la evolución del proceso de compostaje. Por otro lado, para la conformación de 4 pilas se probó las proporciones de 50, 60, 70 y 80% de lodo, complementados con aserrín, basadas en una investigación realizada por Lu et al. (2020).

Otra pila se conformó de tal manera que iniciara con una relación C:N=30, que según Ascanio et al. (2022), recomienda que este valor inicial de la mezcla debe estar entre 25 – 35, para esto se realizó un balance de materia considerando un estado estacionario, es decir, no hay generación ni acumulación de materia y las sustancias inertes presentes en el compost son mínimas que no interfieren en el balance final y por ende en el proceso de compostaje, ecuación (1)

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \quad (1)$$

Desarrollando la ecuación se obtuvo:

$$M_{Lodo} * C:N_{Lodo} + M_{Aserrin} * C:N_{Aserrin} = M_{Total} * C:N_{Total} \quad (2)$$

$$M_{Total} = M_{Lodo} + M_{Aserrin} \quad (3)$$

Donde:

$M_{Lodo}$ = Cantidad de lodo

$C:N_{Lodo}$ = Relación carbono/nitrógeno del lodo

$M_{Aserrin}$ = Cantidad de aserrín

$C:N_{Aserrin}$ = Relación carbono/nitrógeno del aserrín

$M_{Total}$ = Cantidad total de la pila

$C:N_{Total}$ : Relación carbono/nitrógeno de toda la pila

Reemplazando la ecuación (3) en la ecuación (2):

$$M_{Lodo} * C:N_{Lodo} + M_{Aserrin} * C:N_{Aserrin} = (M_{Lodo} + M_{Aserrin}) * C:N_{Total} \quad (4)$$

Despejando  $M_{Aserrín}$  de la ecuación (4):

$$M_{Aserrín} = \frac{M_{Lodo} * (C:N_{Total} - C:N_{Lodo})}{C:N_{Aserrín} - C:N_{Total}} \quad (5)$$

Mediante la utilización de la ecuación (5) se determinó la cantidad de aserrín necesario para partir de una mezcla con una relación C:N = 30, para este cálculo se consideró de igual forma la masa total de la pila indicada anteriormente y los criterios relacionados a la cantidad de lodo residual, se usó aproximadamente el 90% de lodo, específicamente 9400kg, resultando un valor de 617kg de aserrín necesarios para la elaboración de esta pila. El resumen de cómo estuvo conformado cada tratamiento se visualiza en la Tabla 4-5.

**Tabla 4-5. CANTIDAD DE LODO RESIDUAL Y ASERRÍN POR TRATAMIENTO.**

Tratamiento	Masa de lodo (Kg)	Masa de aserrín (Kg)
Blanco	10000	0
1	9400	617
2	8000	2000
3	7000	3000
4	6000	4000
5	5000	5000

**Elaborado por:** Autor

Además de los 5 tratamientos se experimentó con un blanco, el cual correspondió a una pila solo de lodo residual, sin aserrín.

#### 4.2.2. Dimensionamiento y conformación de las pilas de compostaje

Para determinar las dimensiones de cada pila se utilizó la fórmula del volumen de un paralelepípedo, ecuación (6), por su semejanza en forma a las pilas.

$$V = a * h * L \quad (6)$$

Donde: V= volumen

a= ancho

h= altura

L= longitud

Despejando L de la ecuación (6):

$$L = \frac{V}{a * h} \quad (7)$$

El valor de la altura y el ancho de la pila fueron constantes para todas las pilas, 0,60m y 1,5m respectivamente; el volumen de las diferentes cantidades de lodo residual y aserrín se determinó mediante la fórmula de la densidad, ecuación (8).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Donde:  $\rho$ = densidad

m= masa

v= volumen

Despejando V en la ecuación (8):

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (9)$$

Para determinar la densidad del lodo residual se utilizó un balde (Figura 4-5) de 29cm de diámetro y un peso de 0,75kg, en éste se colocó el lodo, hasta una altura de 32,5cm y un peso de 20,88kg (peso balde vacío + peso balde con lodo), por lo tanto, el peso del lodo puro fue 20,13kg, el volumen se calculó con la fórmula del volumen de un cilindro, ecuación (10).

$$V = \pi * r^2 * h \quad (10)$$

El volumen resultó 21,47L, al reemplazar los valores del peso y volumen del lodo determinados en la ecuación (8), se calculó la densidad del lodo residual correspondiente a 938kg/m<sup>3</sup>. La densidad aparente del aserrín utilizada fue 450kg/m<sup>3</sup>.



**Figura 4-5.** Determinación de la densidad del lodo activado residual.

**Fuente:** Autor

Los volúmenes de cada material y la longitud de cada pila calculados con las ecuaciones (9) y (7) respectivamente, se detallan en la Tabla 4-6.

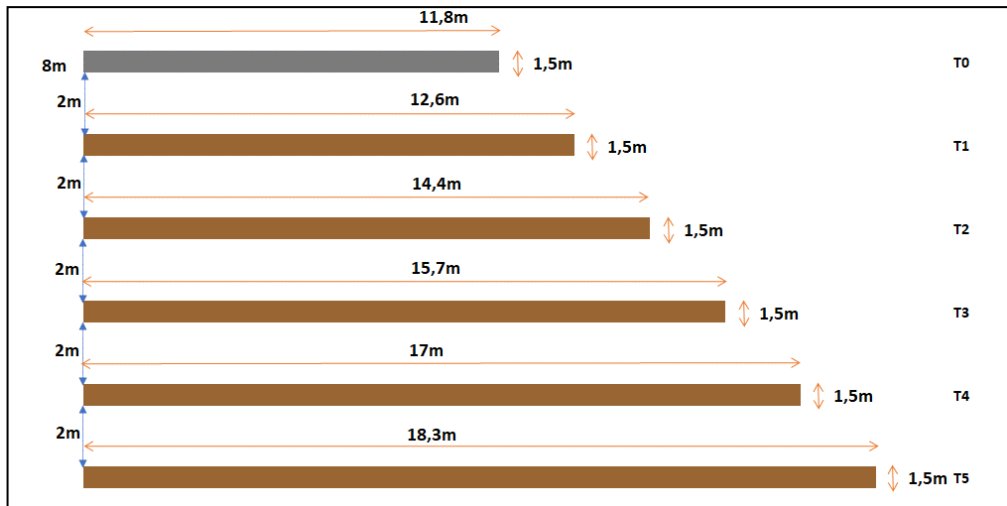
**Tabla 4-6.** DIMENSIONAMIENTO DE LAS PILAS DE COMPOSTAJE.

Tratamiento	Masa de lodo (Kg)	Densidad del lodo (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen lodo (m <sup>3</sup> )	Masa de aserrín (Kg)	Densidad del aserrín (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen aserrín (m <sup>3</sup> )	Volumen total (m <sup>3</sup> )	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)
Blanco T0	10000	938	10,7	0	450	0	10,7	11,8	1,5	0,6
T1	9400		10,0	600		1,3	11,4	12,6	1,5	0,6
T2	8000		8,5	2000		4,4	13,0	14,4	1,5	0,6
T3	7000		7,5	3000		6,7	14,1	15,7	1,5	0,6
T4	6000		6,4	4000		8,9	15,3	17,0	1,5	0,6
T5	5000		5,3	5000		11,1	16,4	18,3	1,5	0,6

**Elaborado por:** Autor

El diseño y conformación de las 6 pilas correspondientes al blanco y a los 5 tratamientos se lo ilustra en la Figura 4-6 y Figura 4-7.





**Figura 4-6.** Diseño de las pilas de compostaje.

**Fuente:** Autor



**Figura 4-7.** Conformación de las pilas de compostaje.

**Fuente:** Autor

Es importante mencionar que transcurridos los 7 primeros días de armadas las pilas, se colocó cal a cada pila (Figura 4-8) para evitar la proliferación de vectores, después a los 14 días y finalmente a los 21 días. Según Acatrinei et al. (2019) en una investigación menciona que colocó 2kg de cal por cada 100kg de residuo, en este caso en cada pila se agregó 200kg de cal durante todo el proceso.



**Figura 4-8.** Pilas de compost con cal.

**Fuente:** Autor

### 4.2.3. Evaluación del proceso de compostaje

En una investigación realizada por (Guerrini et al., 2017), el compostaje de lodos residuales con material de enmienda o soporte dura entre 3 a 5 meses dependiendo del clima, el material y la cantidad a compostar, el producto final está listo para su uso una vez que haya pasado por todas las fases: mesófila, termófila, mesófila II o enfriamiento y maduración; estas fases se identifican claramente en el monitoreo de la temperatura de las pilas. Los 5 tratamientos y el blanco iniciaron el proceso de compostaje el día 01/02/2022, correspondiente al día N°1, a partir de este día se midieron diferentes variables (Figura 4-9) para ver el comportamiento de cada una de las pilas, los datos fueron tomados durante 92 días que fue el tiempo en que una de las pilas completó todas las fases del proceso y finalmente se obtuvo el mejor tratamiento. El día en que se obtuvo el producto final del mejor tratamiento fue el 03/05/2022.



**Figura 4-9.** Medición de variables.

**Fuente:** Autor

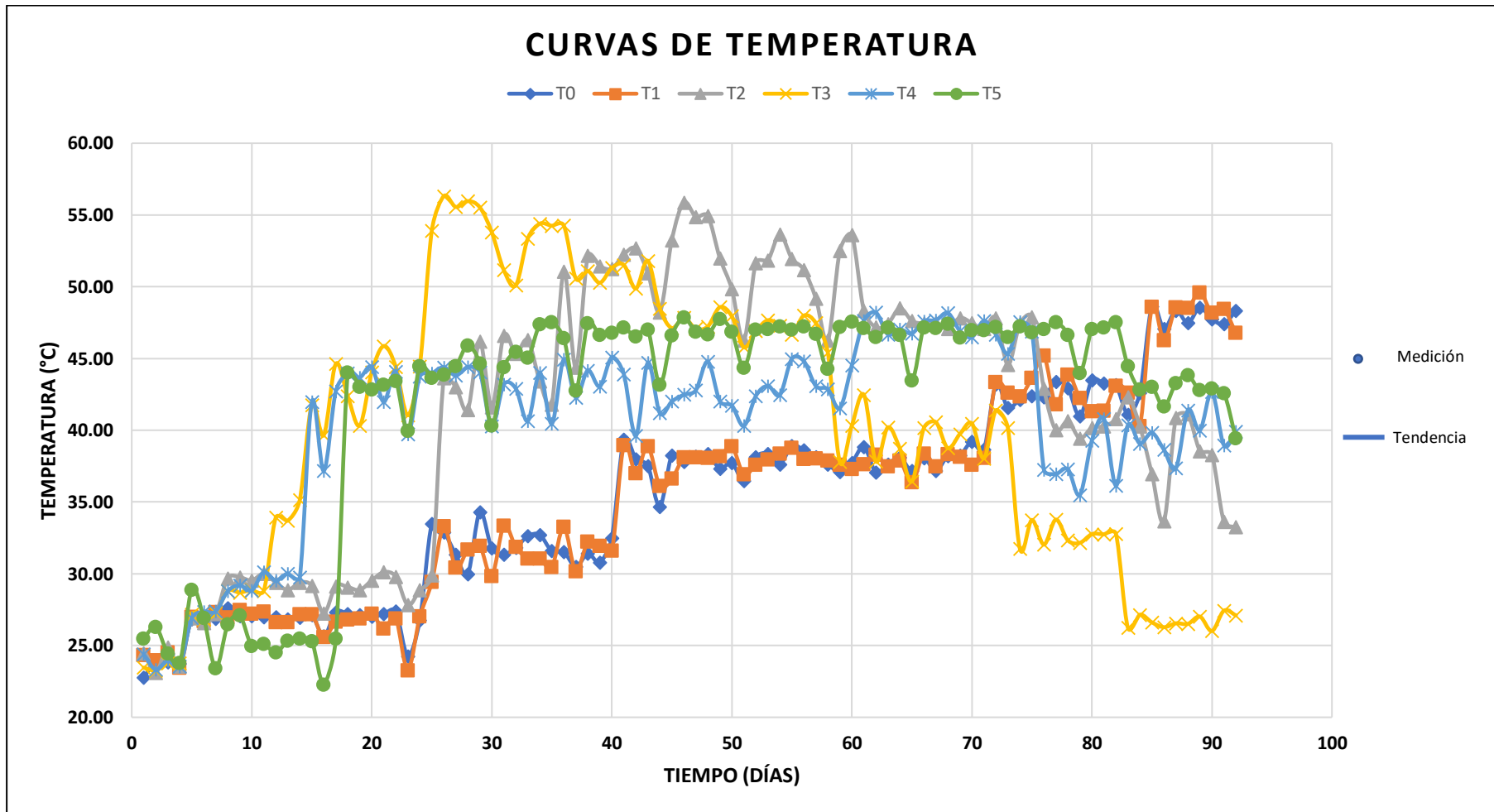
### **Variables medidas durante el proceso de compostaje**

#### **Temperatura**

La temperatura es un parámetro muy importante durante el proceso de compostaje ya que permite identificar las diferentes etapas que ocurren durante todo el proceso y de esta manera determinar si el mismo ha culminado (Barthod et al., 2018). En el Anexo 3, se puede observar los datos de temperatura de cada uno de los tratamientos realizados, que se tomaron diariamente con 3 repeticiones en cada pila, durante todo el proceso. En el Anexo 4 se presenta los datos promedio diarios de temperatura.

Todos los tratamientos iniciaron el proceso en un rango de temperaturas de 22,78 a 25,48°C, y en todas las pilas se observó un incremento de temperatura, según (Asses et al., 2018), esto se debe a la acción de los microorganismos presentes en el lodo residual que empiezan a degradar la materia orgánica. Algunos tratamientos se demoraron mucho más días que otros en incrementar la temperatura, es decir en pasar de la fase mesofílica a la termofílica. En los datos de temperatura reportados en el Anexo 4, se observa algunos valores en coloración verde, estos corresponden al día en que termina una fase y comienza otra en cada uno de los tratamientos, estos días se identificaron según las especificaciones de temperatura establecidas para cada etapa.

En la Figura 4-10, se observa las curvas de temperatura que se formaron durante todo el proceso de compostaje de los diferentes tratamientos, algunos completaron todo el proceso, necesitando menos tiempo para obtener el producto final, exactamente 92 días fue el tiempo requerido para obtener compost listo para su uso en uno de los tratamientos, con las temperaturas adecuadas en la fase termofílica, que es la más importante dentro de todo el proceso; mientras que otros solo llegaron a la fase termofílica en el mismo tiempo en que otros tratamientos ya concluyeron el proceso y además, no llegaron a las temperaturas necesarias para obtener un producto de calidad. Esta diferencia en las pilas se debió a las diferentes cantidades de material a compostar que hubo en cada una.



**Figura 4-10.** Comportamiento de temperatura de compostaje en los diferentes tratamientos.

**Fuente:** Autor

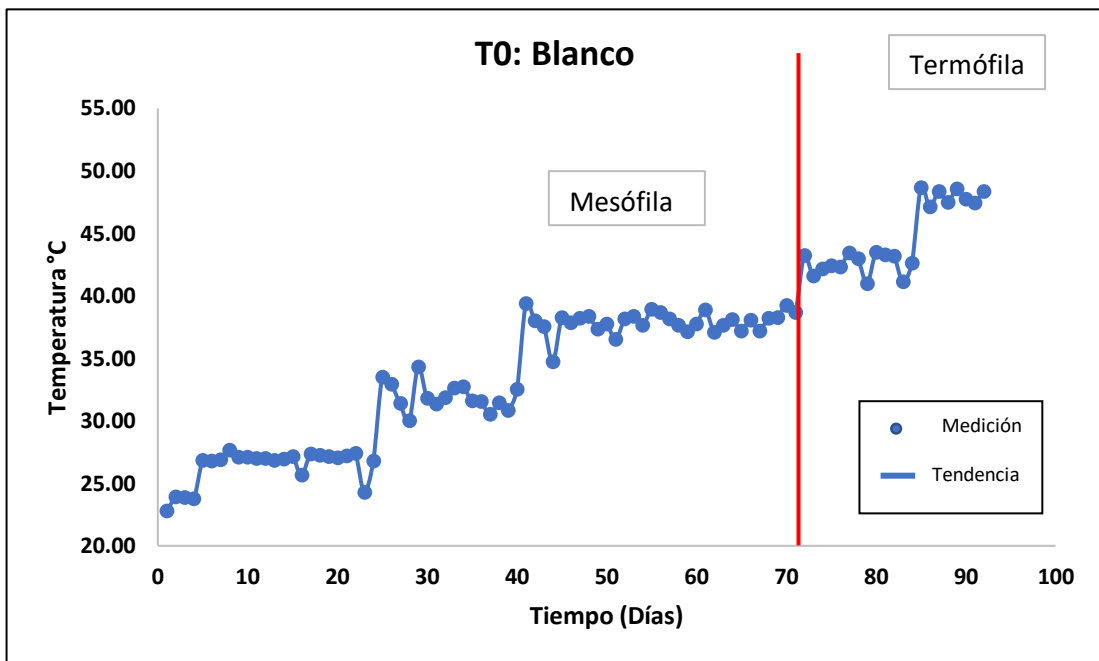
A continuación, en la Tabla 4-7 se observa el tiempo de duración de la fase mesofílica de cada tratamiento, la temperatura máxima alcanzada durante todo el proceso. Según Barthod et al. (2018) un rango óptimo de temperatura de la fase termofílica es de 40 a 65°C, a temperaturas >55°C los microorganismos patógenos se mueren produciéndose la higienización completa del compost. Por otro lado, la norma chilena NCh2880.Of2004, establece que, para los procesos de compostaje en pilas con volteos, la temperatura del compost debe permanecer en un rango  $\geq 55^{\circ}\text{C}$  durante al menos 3 días consecutivos antes de realizar un volteo para garantizar una correcta eliminación de patógenos, o por lo menos la temperatura debe permanecer en un rango de 45 a 50°C por 12 días consecutivos, en la Tabla 4-7 se observa que de acuerdo a esta norma, únicamente el T3 cumplió con el requisito para que el producto final esté completamente inocuo, basándose en el parámetro más estricto; mientras que tomando la otra alternativa, los tratamientos T2, T3, T4 y T5 cumplieron con esa especificación de control del proceso.

**Tabla 4-7.** NÚMERO DE DÍAS DE LA FASE MESOFÍLICA EN CADA TRATAMIENTO Y TEMPERATURA MÁXIMA ALCANZADA EN LA FASE TERMOFÍLICA.

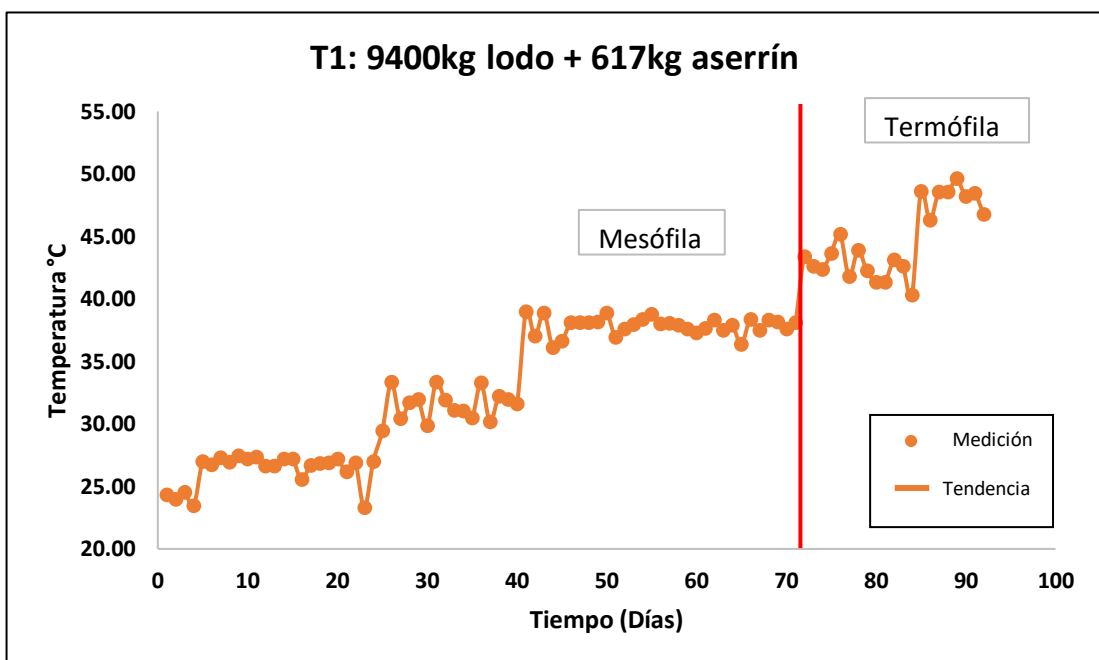
<b>Tratamiento</b>	<b>N° días fase mesofílica</b>	<b>Temperatura máx (<math>^{\circ}\text{C}</math>) en fase termofílica</b>	<b>Días consecutivos con temperaturas <math>\geq 55^{\circ}\text{C}</math></b>	<b>Días consecutivos con temperaturas 45 – 50°C</b>
T0	71	48,63	-	7
T1	71	49,60	-	8
T2	25	55,87	1	38
T3	14	56,32	4	34
T4	14	48,21	-	15
T5	17	47,83	-	13

**Elaborado por:** Autor

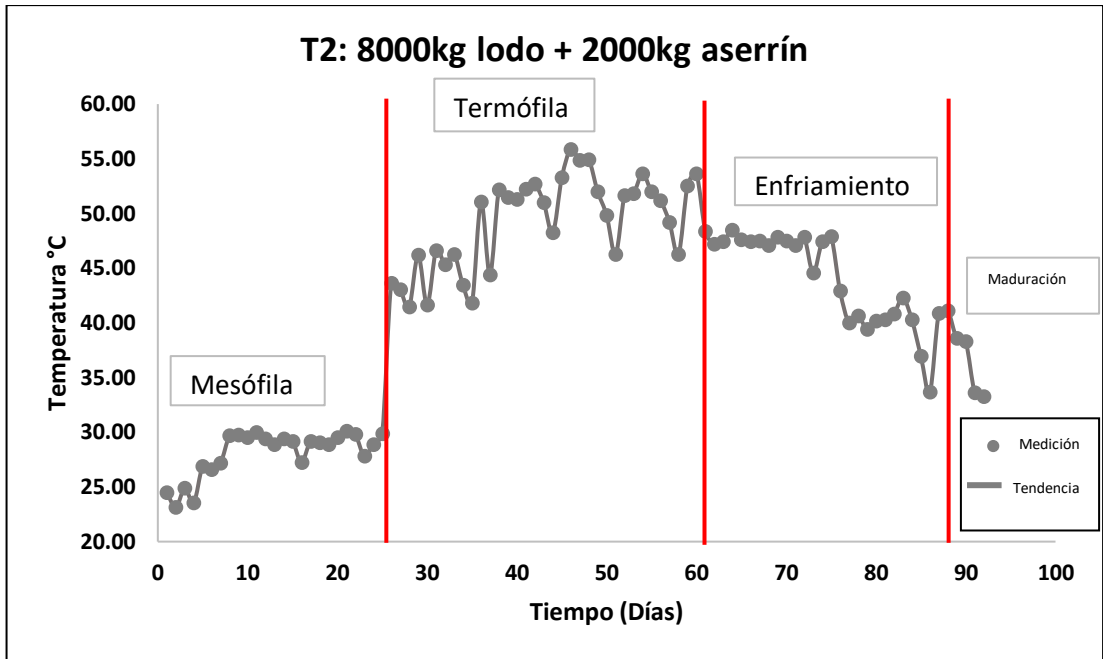
A continuación, se observa el comportamiento de las temperaturas promedio diarias medidas de cada uno de los tratamientos realizados de forma individual y más detallada; y, de igual manera se identifican las diferentes fases del compostaje.



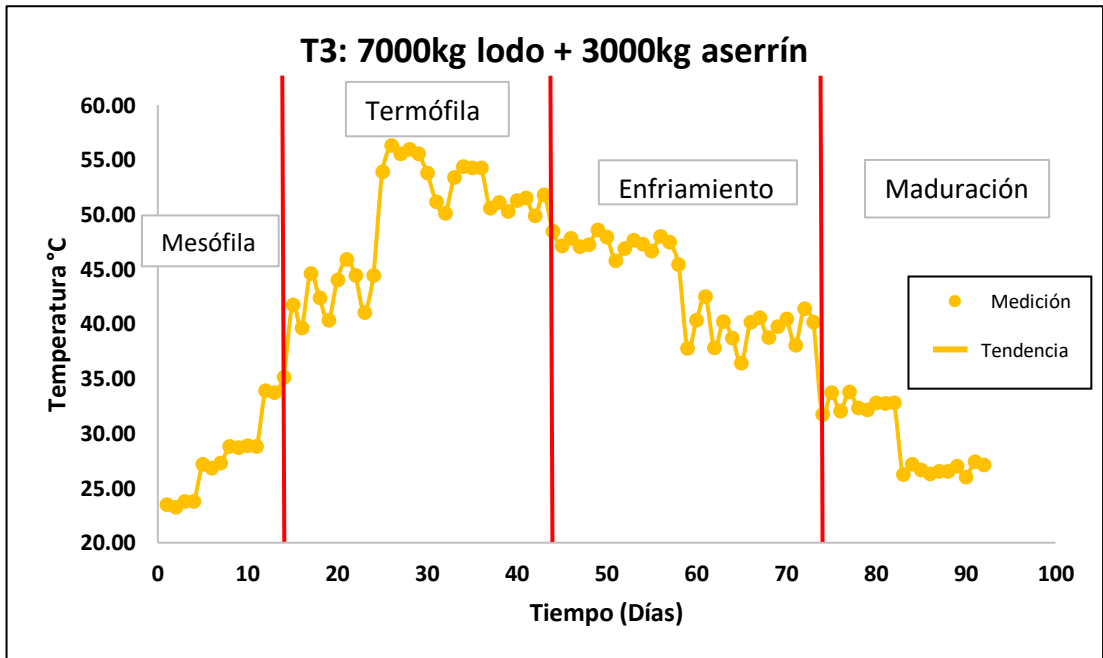
**Figura 4-11.** Comportamiento de la temperatura del blanco.  
**Fuente:** Autor



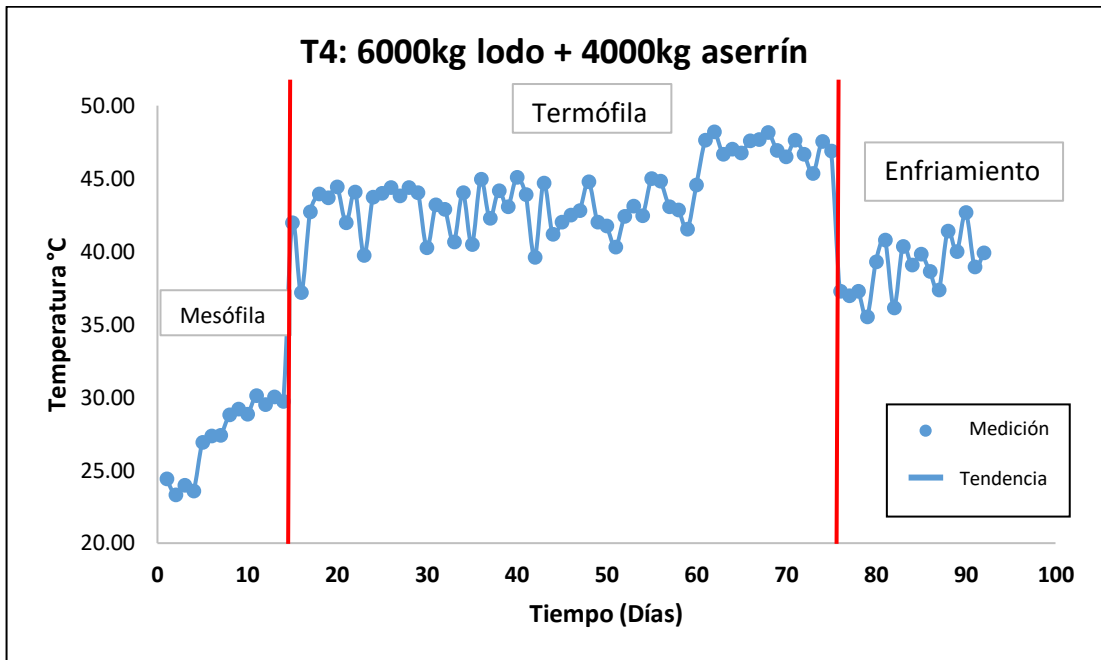
**Figura 4-12.** Comportamiento de la temperatura del T1.  
**Fuente:** Autor



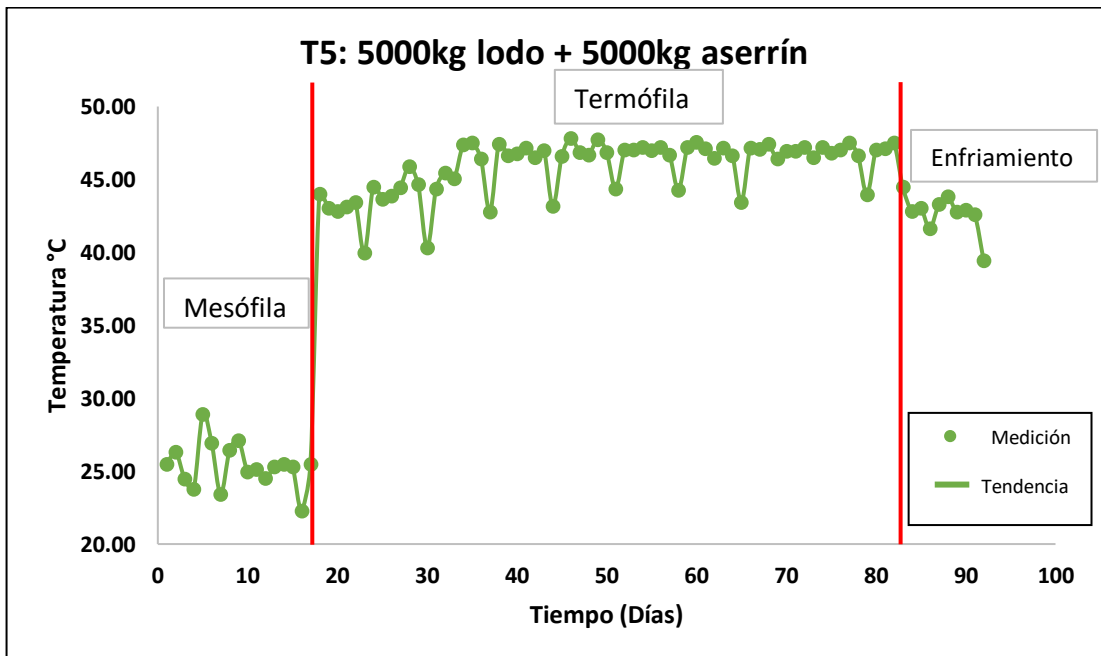
**Figura 4-13.** Comportamiento de la temperatura del T2.  
**Fuente:** Autor



**Figura 4-14.** Comportamiento de la temperatura del T3.  
**Fuente:** Autor



**Figura 4-15.** Comportamiento de la temperatura del T4.  
**Fuente:** Autor



**Figura 4-16.** Comportamiento de la temperatura del T5.  
**Fuente:** Autor



El T0, (Figura 4-11), partió de una temperatura aproximada de 22,78°C, pasó por una etapa mesófilica de alrededor de 71 días, tuvo un comportamiento similar al T1 mostrando un retraso en empezar la fase termofílica a diferencia del resto de tratamientos. A partir del día 72, la temperatura incrementó en un rango de 41,10 a 48,63°C pudiendo visualizar que empezó la fase termofílica, sin embargo hay que resaltar que no alcanzó las temperaturas sugeridas para la higienización del producto y que no se completó todo el proceso en el tiempo que los otros tratamientos ya lo hicieron. Esto se debe a que el T0 solo contenía lodo residual sin material de soporte que ayude a mejorar el proceso y le brinde las condiciones necesarias para acelerar y optimizar el compostaje.

El T1, (Figura 4-12), partió de una temperatura de 24,31°C, como ya se explicó anteriormente se demoró en iniciar la fase termofílica y a partir del día 72 igualmente la temperatura incrementó considerablemente en un rango de 40,29°C a 49,60°C y como se visualiza, solo llegó hasta la fase termofílica en los 92 días, señalando que las proporciones de las materias primas en este tratamiento no son las adecuadas ya que el proceso no es el óptimo tardándose mucho más tiempo para obtener el producto final, pese a que en esta pila se partió de la relación C:N de 30 como lo recomiendan varios autores, destacando que para este tipo de lodo residual usado para la investigación no se recomienda partir de esa relación C:N.

El T2 (Figura 4-13), inició con una temperatura de 24,48°C, en este tratamiento la fase mesofílica se redujo a 25 días, a partir del día 26 empezó la fase termofílica con un rango de temperatura de 41,44°C a 55,87°C; por aproximadamente 35 días, en este tratamiento ya se alcanzó temperaturas dentro del rango óptimo de la fase termofílica. Además, se observa que el proceso pasó por las 4 etapas necesarias ya que al día 61, la temperatura empezó a descender hasta 40°C aproximadamente, durante un período de 28 días, es decir pasó por la etapa de enfriamiento, al día 89, el proceso inició la última etapa, la de maduración, disminuyendo la temperatura a valores <40°C. Así, se demostró que este tratamiento es mejor que el T0 y T1, indicando que las cantidades de materiales utilizados en esta pila es mejor y ayuda a que se acelere el proceso.

El T3 (Figura 4-14), empezó con una temperatura de 23,46°C, teniendo temperaturas hasta 40°C durante los primeros 14 días, (fase mesofílica), a partir del día 15 la temperatura ascendió en un rango de 40,33 a 56,32°C, correspondiente a la fase

termofílica, con una duración aproximada de 30 días, esta pila igualmente alcanzó temperaturas  $>55^{\circ}\text{C}$ , garantizando la inocuidad del producto. A partir del día 45 la temperatura entró en la fase enfriamiento ya que la temperatura descendió hasta alrededor de los  $40^{\circ}\text{C}$  por un período de 29 días; finalmente a partir del día 74 el proceso entró en la etapa de maduración donde las temperaturas disminuyeron hasta un rango de  $30$  a  $20^{\circ}\text{C}$ . la etapa final duró 19 días, y según Kwarciak (2019) el rango óptimo para el período de maduración del compostaje de lodos residuales es de 10 – 30 días. Teniendo un compost listo para su uso en el día 92 después de que inició el proceso, pasando por las 4 etapas fundamentales. Con esto, se demostró que este tratamiento T3 fue mucho mejor que el T0, T1 y T2 ya que se obtuvo un compost maduro listo para su uso más rápido que los demás.

El T4 (Figura 4-15), comenzó en una temperatura de  $24,39^{\circ}\text{C}$ , al igual que el T3, éste tuvo un período de 14 días de fase mesofílica, a partir del día 15 la temperatura empezó a subir en un rango de  $37,17$  a  $48,21^{\circ}\text{C}$  durante aproximadamente 60 días, lo que indica que la fase termofílica de este tratamiento se demoró más que el T2 y T3, durante este período de tiempo, al igual que en el T2 las temperaturas estuvieron en el rango aceptable pero no llegaron a  $>55^{\circ}\text{C}$ . Al día 76 la temperatura empezó a descender hasta alrededor de  $40^{\circ}\text{C}$  iniciando la fase de enfriamiento, pero no completó el ciclo del compostaje a los 92 días cuando ya se tuvo un compost estable y maduro en el T3, consecuentemente este tratamiento requiere de mayor tiempo para obtener un compost maduro, pero que no se ha higienizado en su totalidad.

Finalmente en el T5 (Figura 4-16), el proceso inició a una temperatura de  $25,48^{\circ}\text{C}$ , y es en el día 18 cuando la temperatura empezó a subir, por lo tanto la fase mesofílica duró 17 días, dando inicio a la fase termofílica, en esta pila, las temperaturas de esta fase alcanzaron un rango de  $39,94^{\circ}\text{C}$  a  $47,83^{\circ}\text{C}$ , al igual que en el T2 y T4 las temperaturas estuvieron en el rango aceptable de la fase termofílica pero no llegaron a  $>55^{\circ}\text{C}$ , permaneciendo en esta fase alrededor de 65 días, al día 82 la temperatura descendió dando inicio a la fase de enfriamiento, pero llegando a una temperatura de  $39,43^{\circ}\text{C}$  el día 92, por lo tanto en este tratamiento tampoco se obtuvo el producto final en el tiempo en el que el T3 ya completó su ciclo.

En el T2 y T3 se obtuvo un compost maduro ya que cumplieron todas las fases del proceso en menor tiempo, a diferencia del T0, T1, T4 y T5 que aún el compost estaba

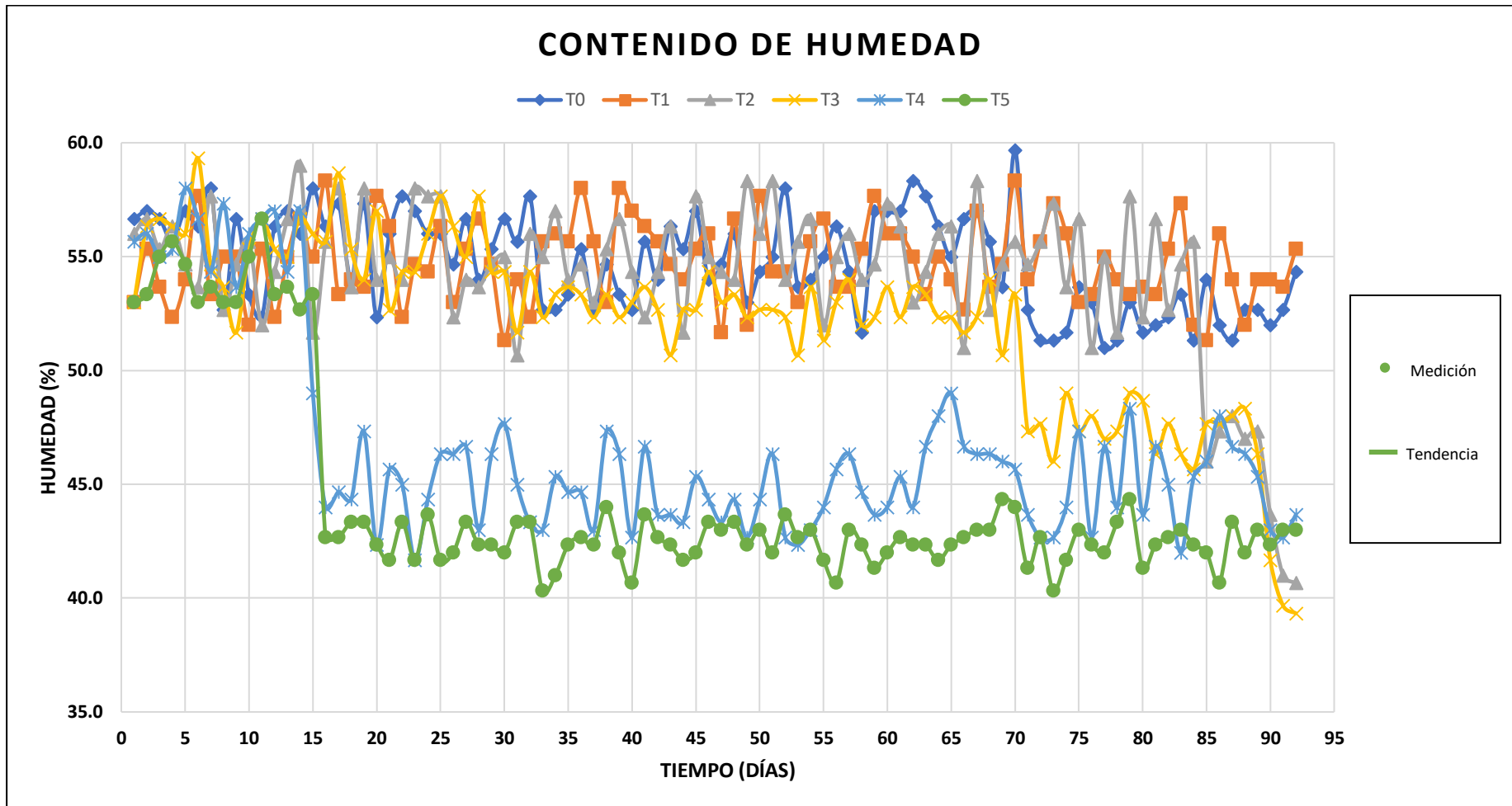
inmaduro en el tiempo que los otros tratamientos ya culminaron el proceso, este producto no puede ser utilizado en los cultivos ya que, según Delgado et al. (2019), puede provocar efectos negativos en los cultivos como: disminución de la concentración de oxígeno en las raíces, elevación de temperaturas ya que continúa con el proceso de compostaje en el suelo, acumulación de sustancias fitotóxicas y posiblemente no se destruyeron en gran medida los organismos patógenos.

### **Humedad**

Según Nguyen et al. (2019), la humedad es el parámetro más importante para la actividad microbiana ya que utilizan el agua para transportar los nutrientes y elementos energéticos para continuar con su metabolismo, el rango de humedad para un proceso óptimo de compostaje debe estar entre 40 – 60%, lo que se corrobora con la Norma Mexicana NMX -AA-180-SCFI-2018 que establece el mismo rango, esencial para que el proceso se mantenga en condiciones aerobias y no se produzcan malos olores, si presenta una humedad superior al rango, se crean condiciones anaerobias y esto no permite que los microorganismos degraden la materia orgánica o puede haber acumulación de ácidos orgánicos como ácido acético, lo cual puede ser tóxico para las plantas, caso contrario si está por debajo del rango, disminuye la actividad microbiana, lo que impedirá que se cumplan todas las fases de degradación y no se establezca biológicamente el producto de forma adecuada (Bohórquez, 2019).

En el Anexo 5, se puede observar los datos de humedad de cada uno de los tratamientos realizados, que se tomaron diariamente con 3 repeticiones en cada pila, durante todo el proceso de compostaje. Mientras que en el Anexo 6, se presenta los datos promedio diarios de humedad.

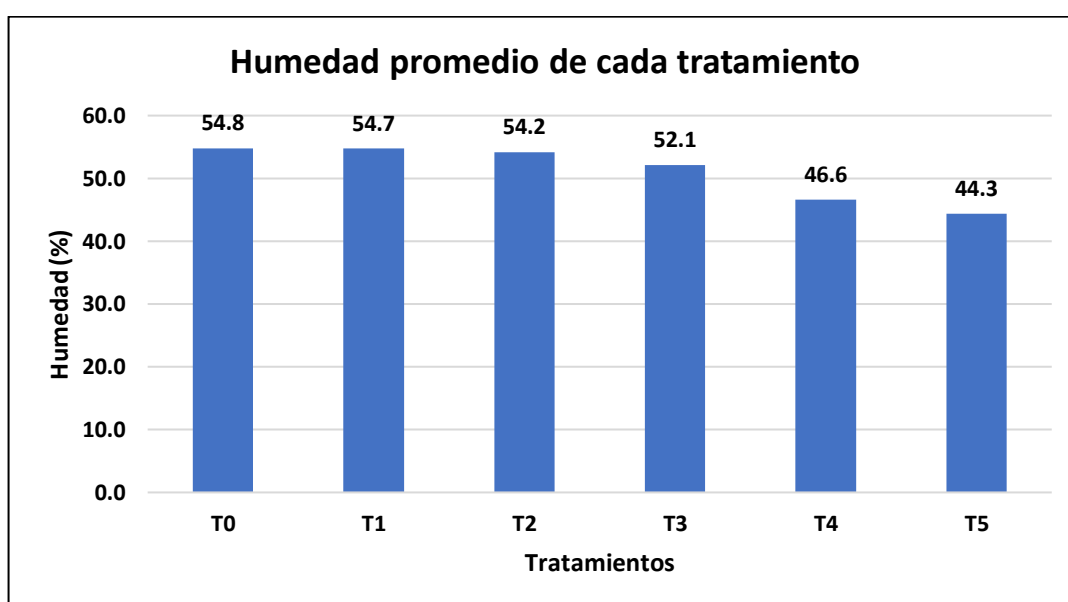
Como se puede visualizar todos los tratamientos presentaron un contenido de humedad en un rango de 39,3 a 59,7%, por lo tanto, estuvieron dentro del rango óptimo para un buen proceso de compostaje, indicando que el contenido de agua fue el adecuado para el desarrollo de microorganismos. Es importante mencionar que la humedad no es un parámetro esencial para determinar o seleccionar un buen compost, debido a que puede variar, ya sea disminuir o aumentar en condiciones como secarlo al sol o regarlo con agua respectivamente (Abdul et al., 2017). A continuación, en la Figura 4-17, se visualiza el comportamiento del contenido de humedad de cada uno de los tratamientos a lo largo del tiempo de compostaje.



**Figura 4-17.** Contenido de humedad de los diferentes tratamientos.

**Fuente:** Autor

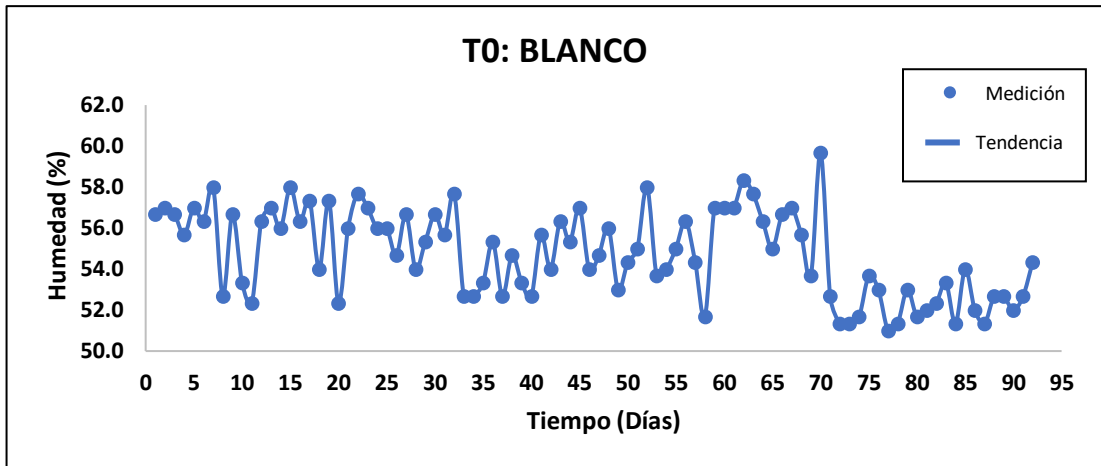
Los tratamientos T0, T1, T2 y T3 presentaron un comportamiento similar, en los cuales el contenido de humedad osciló en un rango de 39,3 a 59,7 %, mientras que los tratamientos T4 y T5, aproximadamente a los 15 días de iniciado el proceso la humedad disminuyó, llegando hasta valores de 40,3°C en algunos días. La cantidad de material de soporte añadido en cada tratamiento influyó en el contenido de humedad, puesto que el aserrín es un material absorbente que ayuda a controlar la humedad del lodo residual y además evita que se produzcan lixiviados durante todo el proceso, como se puede apreciar en la Figura 4-18, a medida que aumenta la cantidad de aserrín en cada tratamiento, el contenido promedio de humedad disminuye, pero en todos los casos estuvo dentro de los límites permisibles y óptimos.



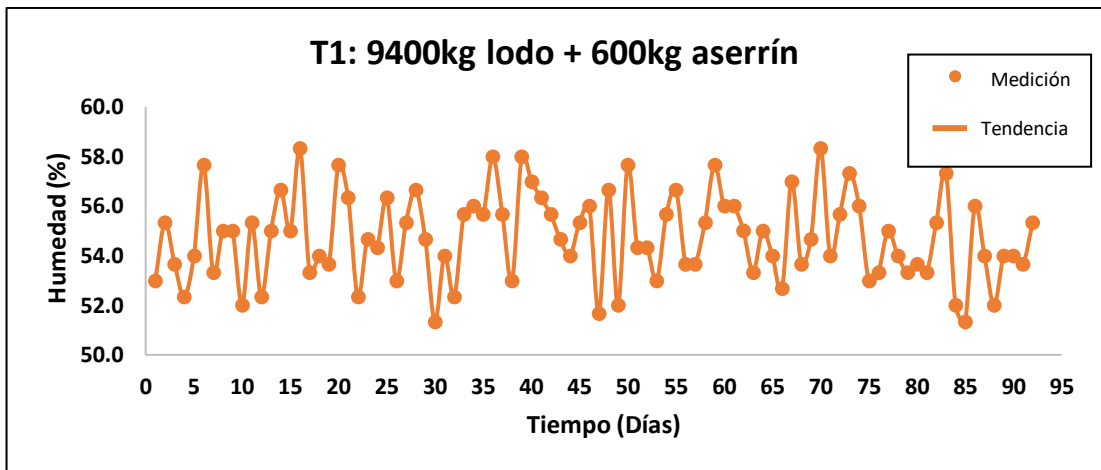
**Figura 4-18.** Contenido de humedad promedio de cada tratamiento.

**Fuente:** Autor

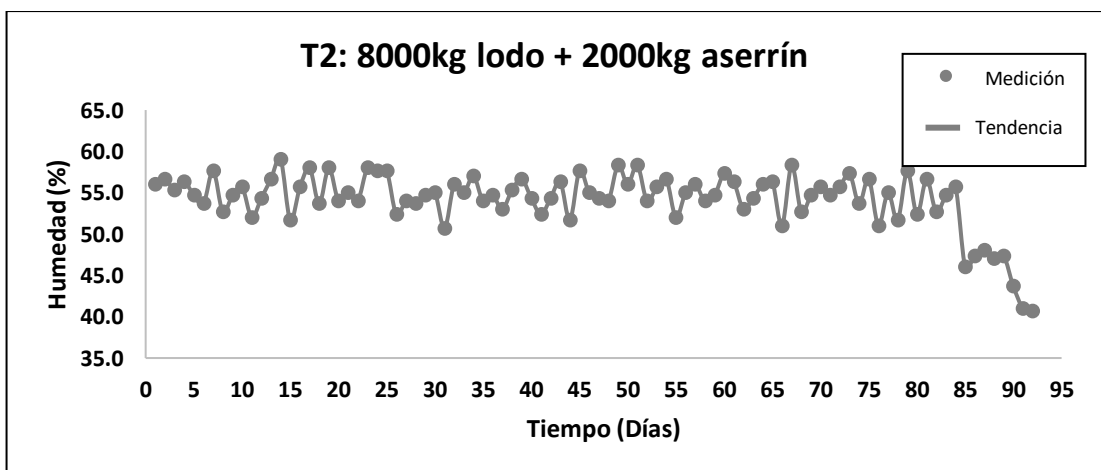
A continuación, se visualiza el comportamiento individual de la humedad de cada pila durante todo el proceso que corresponde a los 92 días que en base a los datos de temperatura ya se obtuvo un compost maduro en una de las pilas.



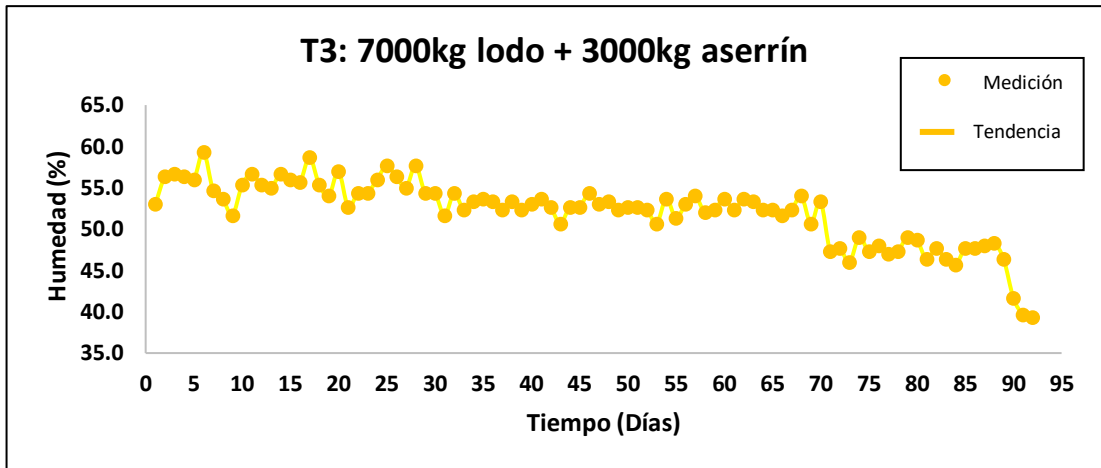
**Figura 4-19.** Comportamiento de la humedad del T0.  
Fuente: Autor



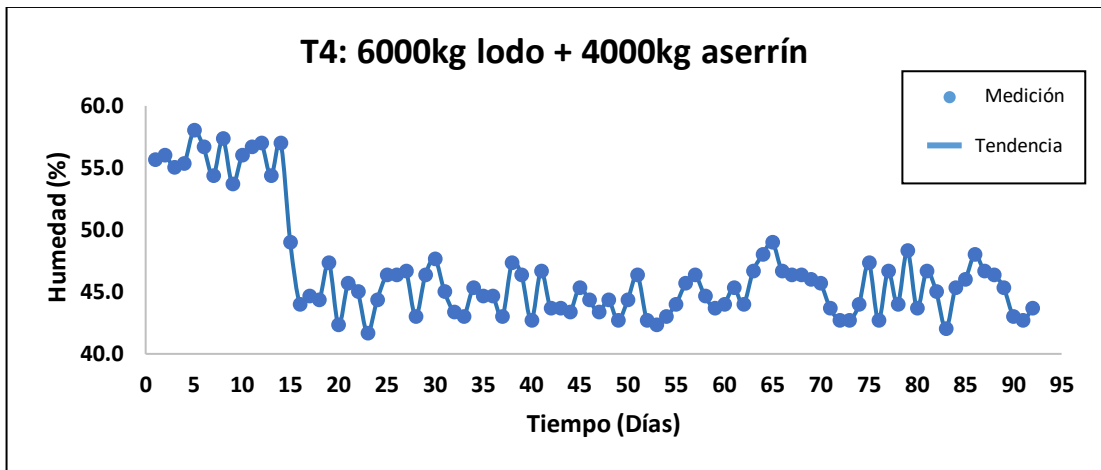
**Figura 4-20.** Comportamiento de la humedad del T1.  
Fuente: Autor



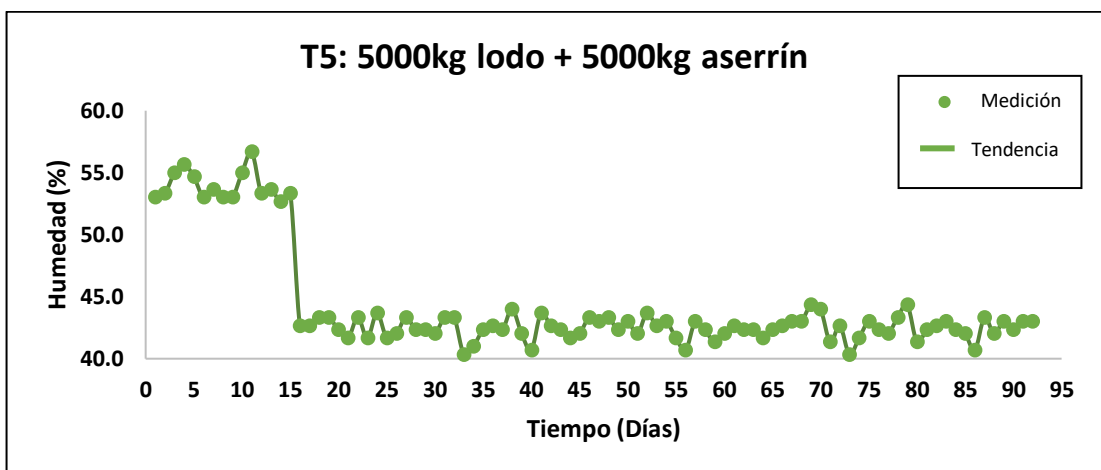
**Figura 4-21.** Comportamiento de la humedad del T2.  
Fuente: Autor



**Figura 4-22.** Comportamiento de la humedad del T3.  
Fuente: Autor



**Figura 4-23.** Comportamiento de la humedad del T4.  
Fuente: Autor



**Figura 4-24.** Comportamiento de la humedad del T5.  
Fuente: Autor

El T0 (Figura 4-19), empezó con una humedad de 56,7% en el día 1, a medida que transcurrió el tiempo la humedad osciló dentro del rango adecuado, llegando hasta un máximo de 59,7% y un mínimo de 51%, al día 92 la pila terminó con un 54,3% de humedad, fue la pila que más contenido de humedad presentó, debido a que corresponde al blanco, conformada solo por lodo residual sin material de soporte. El contenido promedio de humedad de esta pila fue de 54,8%.

En el T1, (Figura 4-20), se observa que empezó con una humedad de 53% y presentó un comportamiento similar al del T0, debido a que esta pila solo tuvo el 6% de aserrín del total de la pila, la humedad máxima que alcanzó fue de 58,3% y un mínimo de 51,3%, terminando con un valor de 55,3% el último día, el contenido de humedad promedio de esta pila fue de 54,7%; es decir que el aserrín absorbió un poco de humedad a diferencia del T0.

El T2 (Figura 4-21), inició con un 56% de humedad, durante todo el proceso de compostaje en los 92 días la humedad se mantuvo en un rango de 59 a 40,7%, en esta pila la humedad ya llega a valores más bajos comparados con el T0 y T1, debido a que ésta contiene más cantidad de aserrín, exactamente el 20% del contenido total de la pila, es por esto que el contenido promedio de humedad de esta pila fue de 54,2%; un valor menor que los 2 tratamientos anteriores. Hay que recalcar que este tratamiento fue uno de los que completó todo el proceso basado en las temperaturas del mismo.

El T3 (Figura 4-22), al día 1 empezó con 53% de humedad, llegando un valor máximo de 59,3% y un mínimo de 39,7% de humedad, esta pila contenía el 30% de material de soporte lo que explica la disminución del valor promedio de humedad de este tratamiento a lo largo de todo el proceso con un valor de 52,1% comparado con el T0, T1 y T2. De igual forma este fue otro tratamiento que completó todas las fases del compostaje.

En la Figura 4-23 , correspondiente al T4 se visualiza que la humedad comenzó en 55,7%; en esta pila ya se notó una disminución considerable comparada con las otras pilas, ya que ésta estuvo conformada por el 40% de aserrín, lo que indica que absorbió más la humedad de la mezcla total, este tratamiento se mantuvo en un rango de 58 a 41,7% de humedad, permaneciendo de igual manera dentro de los límites adecuados para el compostaje, el contenido promedio de humedad de esta pila fue de 46,7% .



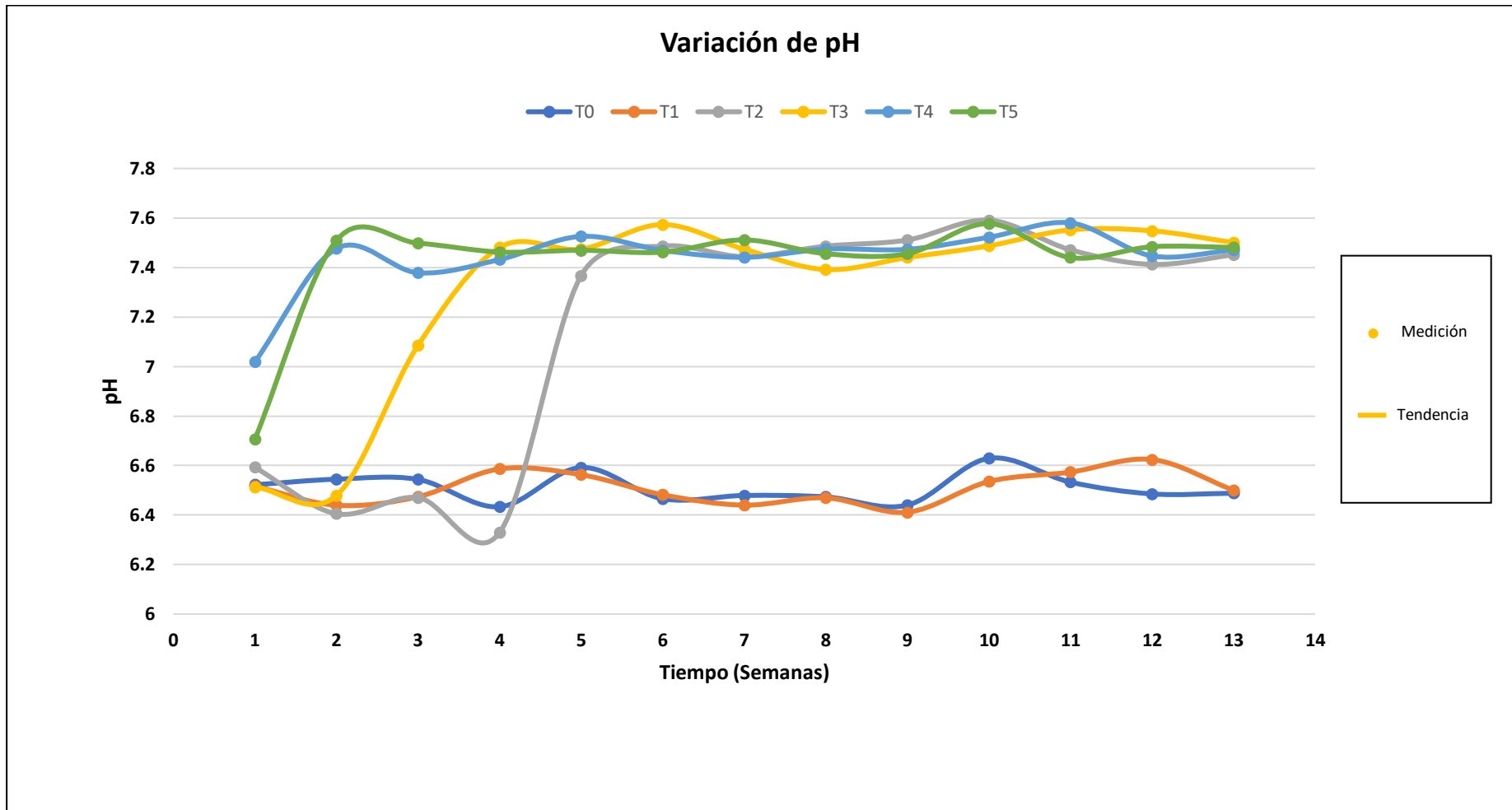
Finalmente, el T5 (Figura 4-24), comenzó con 53% de humedad, llegando a valores máximos de 56,7% y mínimos de 40,3% durante todo el proceso, aquí ya se obtuvo valores más bajos de humedad comparados con las otras pilas, pero dentro del rango óptimo, esto se debe a que en este tratamiento la composición fue del 50% de aserrín, la cantidad del material de soporte fue la mitad de toda la pila por lo que absorbió más humedad. El contenido de humedad promedio de toda la pila durante los 92 días que se compostaron todas las pilas fue de 44,3%, siendo el valor más bajo de los 6 tratamientos.

## **pH**

Según Guerrini et al. (2017), el pH brinda las condiciones óptimas para que los microorganismos realicen la actividad biológica y degraden la materia orgánica, además de acuerdo al rango de pH se desarrollan las diferentes poblaciones microbianas en cada fase, de esta manera las bacterias se desarrollan en un pH cercano al neutro que oscile en un rango de 6 a 7,5, en cambio los hongos prefieren un pH ácido para su desarrollo tolerado un rango más amplio de 5 a 8.

Durante todo el compostaje puede existir un amplio rango de pH (3 a 11), sin embargo, el óptimo va de 5,5 a 8 (Bohórquez, 2019). Según la norma NMX -AA-180-SCFI-2018, el pH durante todo el proceso de compostaje debe ser de 4 a 9. En el Anexo 7, se puede observar los datos de pH de cada uno de los tratamientos, que se tomaron semanalmente con 3 repeticiones en cada pila, durante todo el proceso. Mientras que en el Anexo 8, se presenta los datos promedio semanales de pH.

Conforme a los datos obtenidos se observa que todos los valores de pH estuvieron dentro del rango óptimo, en promedio se encontraron en el rango de 6,17 a 7,75; sin embargo, cada tratamiento presentó comportamientos diferentes en la variación del pH, pero manteniéndose dentro de los límites aptos que condicionan un buen compostaje, en la Figura 4-25 se puede observar el comportamiento del pH de cada pila durante los 92 días que duró el proceso.

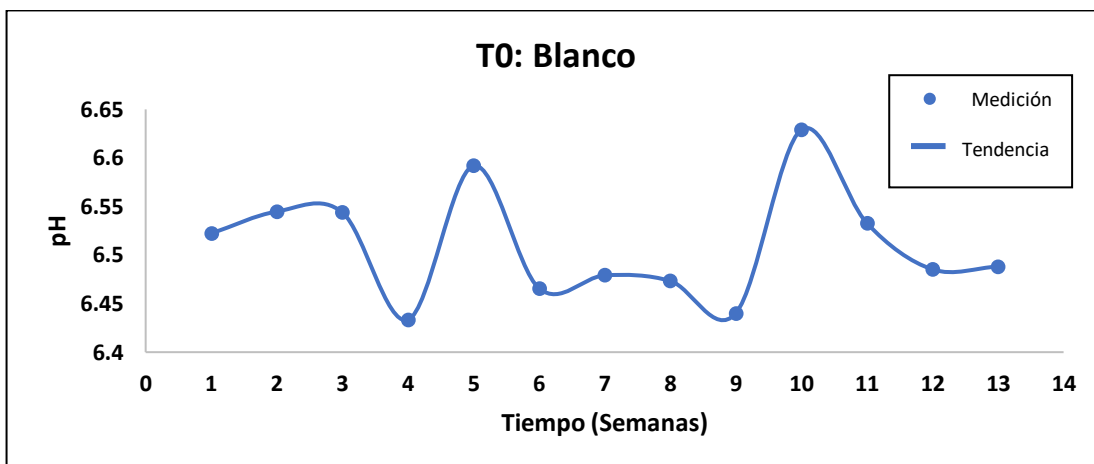


**Figura 4-25.** Comportamiento del pH en los diferentes tratamientos

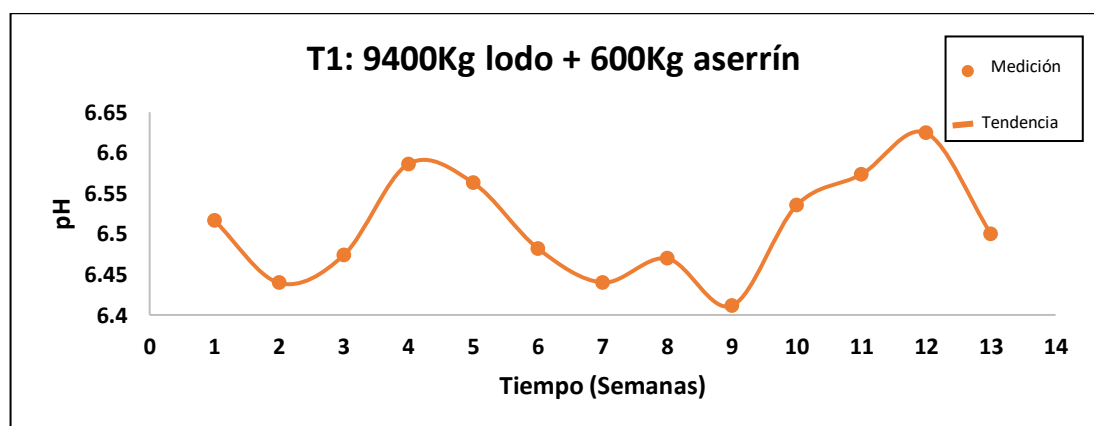
**Fuente:** Autor

Los tratamientos T0 y T1 presentaron una tendencia similar, manteniéndose valores de pH ligeramente ácidos en un rango de 6,41 a 6,63 durante todo el proceso. Los tratamientos T2 y T3 las primeras semanas tuvieron una disminución de pH, según Guerrini et al. (2017), esto se debe a la formación de ácidos orgánicos durante la primera fase, el rango en el que oscilaron estos tratamientos fue de 6,33 a 7,59 hasta llegar finalmente a valores cercanos la neutralidad. Finalmente, los tratamientos T4 y T5, sufrieron un incremento de pH en las primeras semanas y después se mantuvo alrededor de la neutralidad durante el resto de semanas hasta el final del proceso, los valores de pH de estas pilas estuvieron en un rango de 6,71 a 7,58.

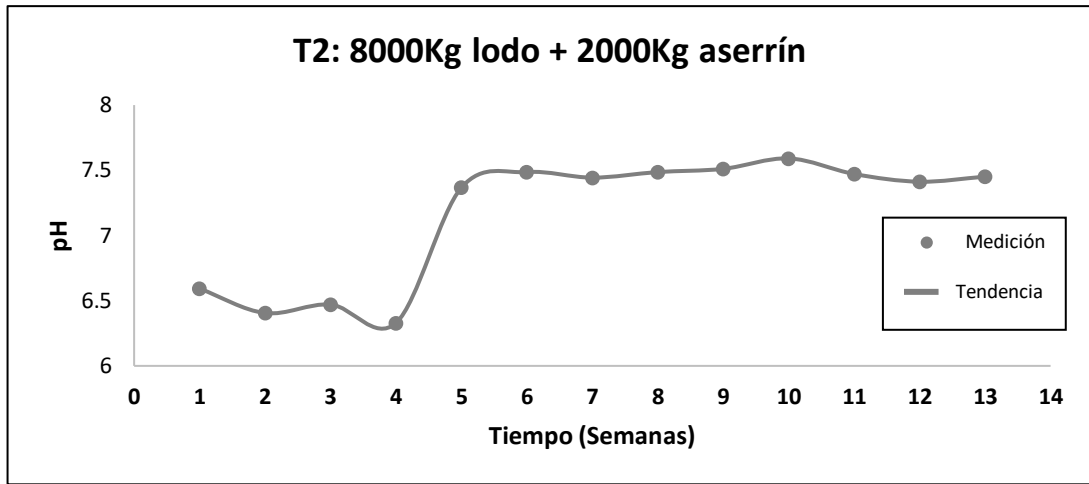
A continuación, se visualiza el comportamiento individual de pH de cada pila durante los 92 días que en base a los datos de temperatura ya se obtuvo un compost maduro en una de las pilas.



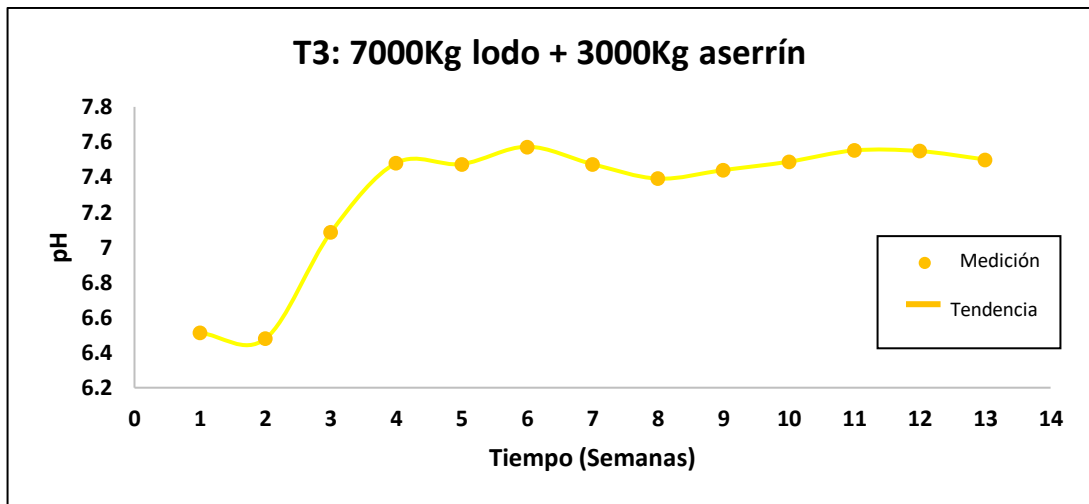
**Figura 4-26.** Comportamiento del pH del T0.  
Fuente: Autor



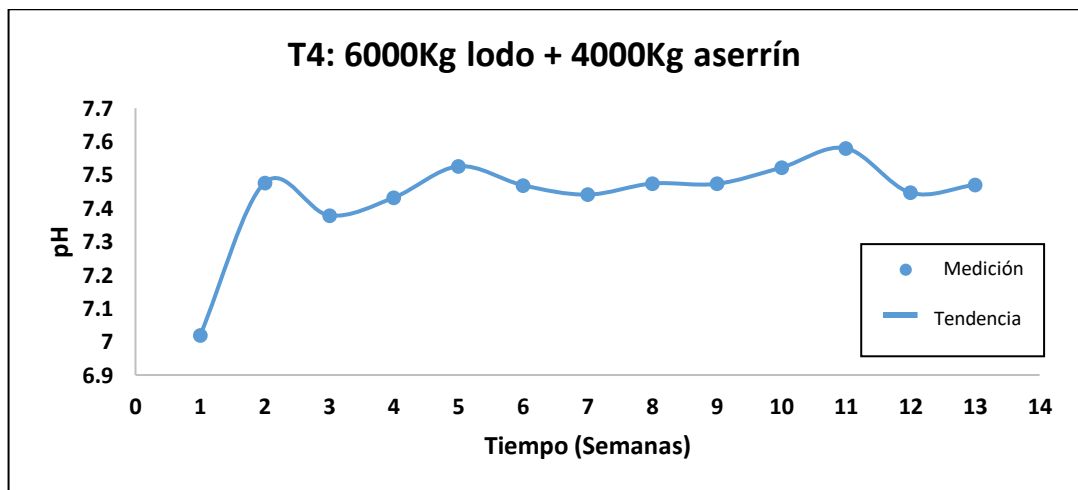
**Figura 4-27.** Comportamiento del pH del T1.  
Fuente: Autor



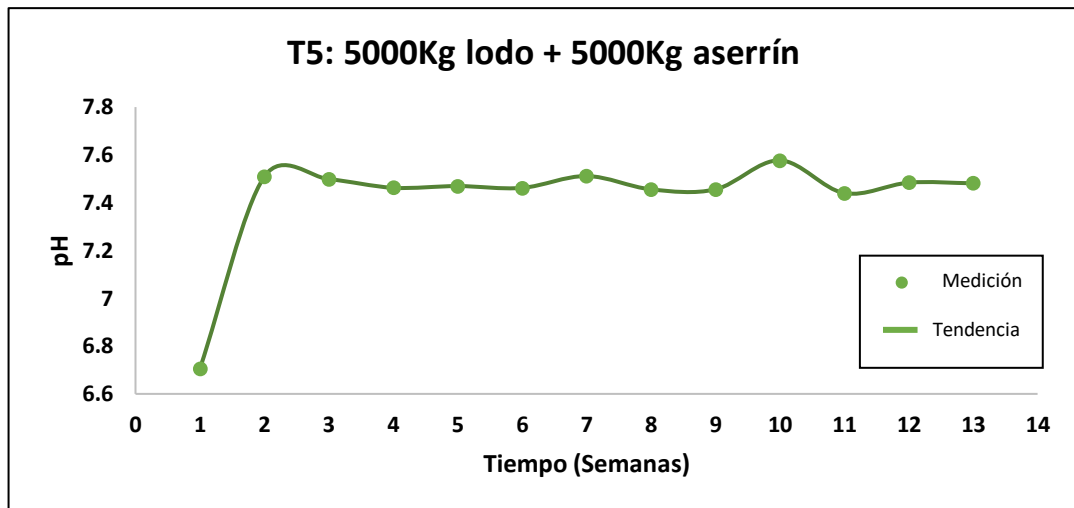
**Figura 4-28.** Comportamiento del pH del T2.  
Fuente: Autor



**Figura 4-29.** Comportamiento del pH del T3.  
Fuente: Autor



**Figura 4-30.** Comportamiento del pH del T4.  
Fuente: Autor



**Figura 4-31.** Comportamiento del pH del T5.

**Fuente:** Autor

Según Bohórquez, (2019), el comportamiento del pH a lo largo del compostaje se da en 3 fases, al inicio se liberan ácidos orgánicos debido a que los microorganismos empiezan a descomponer la materia orgánica, por esto se observa una disminución del pH. Después en la segunda fase ocurre una alcalinización ya que se pierden algunos ácidos orgánicos y se descomponen proteínas liberando amoníaco y finalmente en la tercera fase el pH oscila alrededor de la neutralidad ya que se forman compuestos húmicos necesarios para el suelo. Si el pH se mantiene por arriba de 7,5 o cercano indica que hay una adecuada descomposición.

El T0 (Figura 4-26), inició con un pH promedio de 6,52; se mantuvo ligeramente ácido durante todo el proceso de compostaje en un rango de 6,43 a 6,63; debido a que este tratamiento no completó todo el proceso, la mayor parte del tiempo permaneció en la fase mesofílica que es donde se producen ácidos orgánicos, esta pila apenas llegó a la fase termófila, además que solo estaba conformado por lodo residual, según lo mencionado por Bohórquez, (2019), esta pila permaneció solo en la primera fase de la evolución del pH, finalmente a los 92 días se tuvo un pH de 6,49.

El T1 (Figura 4-27), partió de un pH promedio de 6,52 similar al T0, esta pila igualmente se mantuvo en un rango ligeramente ácido en un rango de 6,41 a 6,62; indicando que no cumplió con las 3 fases de evolución del pH, permaneció en la primera fase, llegando a un pH final de 6,50.

El T2 (Figura 4-28), ya se observa un comportamiento del pH similar al reportado por Bohórquez, (2019) en el que se evidencian las 3 fases, inició con un pH de 6,59; a

partir de la segunda semana se observó una disminución del pH hasta un valor mínimo de 6,33; a partir de la semana 4 existió una ligera alcalinización llegando hasta un valor máximo de 7,59; y finalmente el pH tendió a la neutralidad hasta llegar a un valor final de 7,45; indicando que se produjeron compuestos húmicos.

En el T3 (Figura 4-29), de igual manera se evidencia el cumplimiento de las 3 fases de comportamiento del pH, este tratamiento partió de un pH inicial de 6,51, a partir de la semana 2 se observó una ligera disminución del pH hasta 6,48; a continuación en la semana 3 el proceso se alcalinizó hasta llegar a un valor máximo de 7,57 y a partir de la semana 7, el pH empezó a acercarse a la neutralidad, indicando que llegó a la 3 fase y terminando con un pH final de 7,58.

El T4 (Figura 4-30), empezó con un pH de 7,02, en esta pila la composición de la misma hizo que partiera de un pH neutro e inmediatamente se alcalinizó a partir de la semana 2, manteniéndose todo el tiempo de compostaje en un ambiente alcalino, esta pila estuvo en un rango de pH de 7,2 a 7,58; y no se visualizó las 3 etapas de evolución de pH, la última semana terminó con un valor de pH de 7,47.

El T5 (Figura 4-31), inició con un pH ligeramente ácido de 6,71 en la semana 1, a partir de la semana 2 se alcalinizó el producto hasta la última semana, el rango de pH que esta pila permaneció fue de 6,71 a 7,58; finalmente la última semana se llegó a un pH de 7,48.

Hay que destacar que todas las pilas estuvieron dentro del rango óptimo del proceso de compostaje, sin embargo, solo el T2 y T3 cumplieron con las 3 fases del pH, indicando que en estas pilas los microorganismos cumplieron con sus actividades metabólicas y llegando a obtener un compost maduro y estable.

### **Aireación**

Según Bohórquez, (2019), la aireación permite aportar oxígeno al compostaje, además de un control de temperatura, humedad y eliminación de CO<sub>2</sub> y otros gases que se producen durante la descomposición de la materia orgánica. Las 6 pilas tuvieron una frecuencia de volteo semanal a partir del día 15, las 2 semanas iniciales permanecieron en reposo para que los microorganismos cumplan con su metabolismo y se adapten al medio. Los volteos se realizaron con una máquina volteadora que la misma empresa fabricó (Figura 4-32).



**Figura 4-32.** Máquina volteadora.

**Fuente:** Autor

La aireación fue la adecuada en todas las pilas, indicando que no se produjeron condiciones anaerobias o si se produjeron fueron mínimas, ya que el pH aumentaba ligeramente, además también ayudó a mantener la humedad dentro del rango óptimo evitando que exceda el límite produciendo menor disponibilidad de oxígeno y por ende un ambiente anaerobio y finalmente colaboró en el control de la temperatura, igualmente evitando que excedan el límite superior de temperaturas puesto que el compost perdería propiedades necesarias para el crecimiento vegetal.

Basado en la investigación de Shen et al. (2020), como el compostaje se lo realizó mediante un proceso aerobio y ya se explicó anteriormente que no se produjeron condiciones anaerobias por lo tanto no hubo producción de  $\text{CH}_4$ . De igual forma durante los volteos existió un ligero olor a  $\text{NH}_3$ , debido a que los valores de pH fueron ligeramente alcalinos con un máximo de 7,50 y la humedad máxima de las pilas fue de 59,7%.

#### **4.3.Determinación del mejor tratamiento**

Basado en el numeral 4.2.3., donde se analizó los datos de temperatura de cada uno de los tratamientos con sus respectivas curvas se descartó el T0, T1, T4 y T5 ya que no completaron las fases del proceso en el tiempo que los otros tratamientos ya lo consiguieron, se escogió los tratamientos T2 y T3 que en 92 días ya culminaron todo el proceso y se pudo visualizar claramente las 4 fases del compostaje, el T3 tuvo más días de maduración que el T2. El T0 y T1 solo llegaron a la fase termofílica en los 92 días, el T4 y T5 llegaron a la fase de enfriamiento en ese tiempo de compostaje. Por otra parte, no en todas las pilas se obtuvo las temperaturas adecuadas para la

higienización del compost, de esta manera únicamente el T3 se obtuvieron temperaturas  $>55^{\circ}\text{C}$  como sugiere Barthod et al. (2018) para lograr obtener un producto inocuo. De esta manera, fundamentado en el análisis de la evolución de la temperatura en cada una de las pilas se llegó a la conclusión de que el T3 conformado por 7000kg de lodo y 3000kg de aserrín fue el mejor tratamiento en el que se obtuvo un compost estable y maduro, que cumplió con todo el proceso más rápido que los otros tratamientos.

#### 4.4. Cálculos estadísticos y verificación de hipótesis

En lo que tiene que ver con los cálculos estadísticos del DCA para determinar el mejor tratamiento se utilizó los datos promedio de temperatura de la fase termofílica de cada pila, ya que según la norma mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 en el Apéndice B menciona que la temperatura promedio entre las 3 lecturas tomadas diariamente corresponde al valor representativo de la pila y únicamente de la fase termofílica ya que en ésta, se produce la higienización del compost (Barthod et al., 2018), por lo tanto se la considera como un punto crítico de control del proceso. A continuación, se muestran en la Tabla 4-8 los datos de cada pila que fueron utilizados para los cálculos estadísticos, cabe mencionar que cada en tratamiento las fases termofílicas se desarrollaron en diferente número de días y por ende la cantidad de datos de temperatura de cada uno fueron diferentes, esto indica que para cada tratamiento hubo diferente número de observaciones, según Braga (2021), se trata de un diseño con datos desbalanceados.

**Tabla 4-8.** DATOS DE TEMPERATURA DE LA FASE TERMOFÍLICA DE CADA TRATAMIENTO.

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )						
N $^{\circ}$	T0	T1	T2	T3	T4	T5
1	43,18	43,35	43,63	41,75	41,96	43,99
2	41,58	42,61	43,02	39,66	37,17	43,02
3	42,14	42,33	41,44	44,62	42,72	42,81
4	42,39	43,63	46,21	42,37	43,96	43,14
5	42,30	45,18	41,61	40,33	43,68	43,43
6	43,39	41,78	46,60	44,05	44,41	39,94
7	42,96	43,88	45,34	45,87	41,97	44,47
8	40,98	42,22	46,28	44,42	44,08	43,65



**Tabla 4-8. DATOS DE TEMPERATURA DE LA FASE TERMOFÍLICA DE CADA TRATAMIENTO (continuación).**

N°	Temperatura (°C)					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
9	43,48	41,31	43,43	41,05	39,72	43,88
10	43,26	41,34	41,81	44,46	43,74	44,45
11	43,17	43,09	51,07	53,90	43,97	45,91
12	41,10	42,61	44,39	56,32	44,40	44,64
13	42,59	40,29	52,16	55,56	43,82	40,30
14	48,63	48,58	51,44	55,97	44,40	44,36
15	47,09	46,28	51,26	55,54	44,05	45,46
16	48,34	48,54	52,25	53,80	40,27	45,04
17	47,48	48,52	52,67	51,16	43,19	47,37
18	48,55	49,60	50,97	50,10	42,90	47,51
19	47,72	48,19	48,22	53,36	40,64	46,40
20	47,42	48,43	53,26	54,40	44,02	42,77
21	48,32	46,77	55,87	54,25	40,45	47,44
22	-	-	54,88	54,27	44,94	46,63
23	-	-	54,93	50,57	42,28	46,79
24	-	-	52,00	51,09	44,17	47,14
25	-	-	49,83	50,27	43,05	46,51
26	-	-	46,26	51,31	45,08	47,01
27	-	-	51,67	51,52	43,91	43,15
28	-	-	51,84	49,87	39,61	46,58
29	-	-	53,64	51,81	44,70	47,83
30	-	-	51,97	48,48	41,20	46,87
31	-	-	51,18	-	42,01	46,68
32	-	-	49,19	-	42,48	47,75
33	-	-	46,26	-	42,79	46,86
34	-	-	52,49	-	44,79	44,36
35	-	-	53,61	-	42,03	47,02
36	-	-	-	-	41,73	47,04
37	-	-	-	-	40,30	47,21
38	-	-	-	-	42,39	47,01
39	-	-	-	-	43,10	47,21

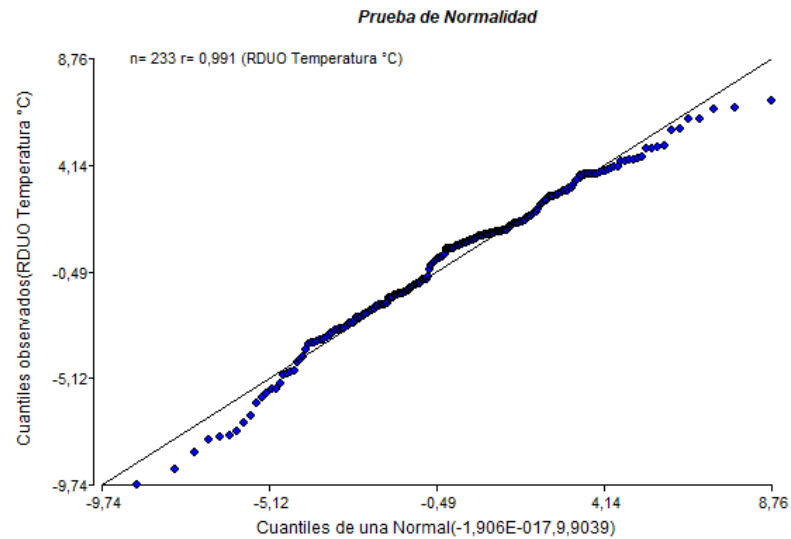
**Tabla 4-8.** DATOS DE TEMPERATURA DE LA FASE TERMOFÍLICA DE CADA TRATAMIENTO (continuación).

N°	Temperatura (°C)					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
40	-	-	-	-	42,46	46,70
41	-	-	-	-	44,98	44,28
42	-	-	-	-	44,82	47,20
43	-	-	-	-	43,08	47,57
44	-	-	-	-	42,86	47,13
45	-	-	-	-	41,54	46,47
46	-	-	-	-	44,54	47,16
47	-	-	-	-	47,64	46,64
48	-	-	-	-	48,21	43,44
49	-	-	-	-	46,68	47,16
50	-	-	-	-	47,03	47,10
51	-	-	-	-	46,75	47,41
52	-	-	-	-	47,61	46,43
53	-	-	-	-	47,67	46,95
54	-	-	-	-	48,17	46,97
55	-	-	-	-	46,93	47,19
56	-	-	-	-	46,49	46,49
57	-	-	-	-	47,62	47,23
58	-	-	-	-	46,68	46,81
59	-	-	-	-	45,35	47,05
60	-	-	-	-	47,56	47,50
61	-	-	-	-	46,90	46,64
62	-	-	-	-	-	43,97
63	-	-	-	-	-	47,02
64	-	-	-	-	-	47,13
65	-	-	-	-	-	47,50

**Elaborado por:** Autor

Con el gráfico Q-Q plot se verificó que los datos presentan una distribución normal (Figura 4-33), este gráfico permite observar qué tan cerca está la distribución de un conjunto de datos a alguna distribución ideal, en este caso la normal. Es importante mencionar que para este gráfico es necesario utilizar los valores de los residuos que el

software mismo los calcula. Según Cajal (2020), los residuos es el resultado de la diferencia entre los valores de la variable dependiente observados y los valores que predice el software a partir de la recta de regresión.



**Figura 4-33.** Prueba de normalidad de los datos de temperatura  
**Fuente:** Autor

Se puede observar que los datos se alinean sobre la recta de 45° y presenta un coeficiente de correlación de  $r = 0,991$ , lo que indica que los datos de temperatura utilizados para los cálculos estadísticos, siguen una distribución normal, puesto que mientras este valor  $r$  mas se acerque a 1 es más fuerte la relación lineal.

Seguidamente, los resultados de los cálculos estadísticos que se obtuvieron del ANOVA, se muestran en la Tabla 4-9.

**Tabla 4-9.** ANÁLISIS DE VARIANZA.

	Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
	Temperatura °C	233	0,32	0,30	6,90
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1057,86	5	211,57	20,90	<0,0001
Tratamientos	1057,86	5	211,57	20,90	<0,0001
Error	2297,71	227	10,12		
Total	3355,57	232			

**Elaborado por:** Autor

Se realizó con un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0,05. Al analizar los resultados obtenidos, se observa un valor de probabilidad (p-valor) de <0,0001; la regla de decisión dice que cuando el p-valor es menor que el nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula que señala que la mezcla de material de soporte con lodos activados

residuales generados en una PTAR de empresas de alimentos no permiten mejorar las condiciones para el aprovechamiento y reutilización de los mismos, a través de la elaboración de compost.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa que menciona que la mezcla de material de soporte con lodos activados residuales generados en una PTAR de empresas de alimentos permite mejorar las condiciones para el aprovechamiento y reutilización de los mismos, a través de la elaboración de compost.

Debido a que se trata de datos paramétricos, se aplicó la prueba de Tukey (Cajal, 2020), con un  $\alpha=0,05$  y se determinó que existe diferencia significativa entre los tratamientos, cuyos resultados se muestran a continuación en la Tabla 4-10.

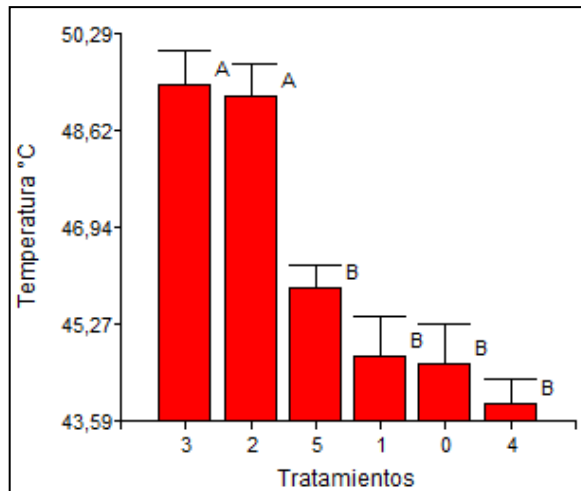
**Tabla 4-10. PRUEBA DE TUKEY KRAMER.**

<i>Error: 10,1221 gl: 227</i>				
<i>Tratamientos</i>	<i>Medias</i>	<i>n</i>	<i>E.E.</i>	
3	49,40	30	0,58	A
2	49,22	35	0,54	A
5	45,89	65	0,39	B
1	44,69	21	0,69	B
0	44,57	21	0,69	B
4	43,90	61	0,41	B

**Elaborado por:** Autor

Las medias con una letra común no son significativamente diferentes, por lo tanto, el T2 y T3 tuvieron comportamiento similar con una media de temperatura más alta que el resto de tratamientos, de igual forma, entre los tratamientos T5, T1, T0 y T4 no hubo diferencia significativa entre las temperaturas de la fase termofílica, sin embargo, entre los tratamientos T3, T2 versus el T5, T1, T0 y T4 si existió diferencia significativa. Con esto se determina que el T2 y T3 son los mejores tratamientos, siendo el T3 el mejor con una media de temperatura mayor que los demás, corroborando estadísticamente con lo que se concluyó anteriormente en base al comportamiento de las temperaturas a lo largo del compostaje.

Se puede observar que, al aplicar la prueba de Tukey Kramer, el software ordena los tratamientos de forma descendente en cuanto a los valores promedio de temperatura de la fase termofílica, lo que se puede apreciar de una mejor manera en la Figura 4-34.



**Figura 4-34.** Valores promedio de temperaturas de la fase termofílica de cada tratamiento.

**Fuente:** Autor

#### 4.5. Caracterización del compost obtenido

El compost obtenido del mejor tratamiento correspondiente al T3, resultó ser un producto estable y maduro cuyo proceso se demoró 92 días, en este se observó las 4 fases del compostaje: mesófila, termófila, enfriamiento y maduración.

##### 4.5.1. Análisis sensorial

El compost tuvo un color marrón oscuro (Figura 4-35), con un olor característico a tierra húmeda de bosque, la textura fue granulosa y no se diferenció la materia prima utilizada para el proceso, según Ascanio et al. (2022), estas características son indicativas de que el compost ha madurado.



**Figura 4-35.** Compost.

**Fuente:** Autor

#### 4.5.2. Análisis físico químicos

Los parámetros físico químicos sirvieron para evaluar la estabilidad, madurez y calidad agronómica del compost, determinando así su valor como fertilizante. Los más comunes son: pH, humedad, temperatura, materia orgánica, relación C:N, nutrientes totales (N, P, K) (Ascanio et al., 2022).

Los resultados de los análisis físico químicos que se realizaron al compost del mejor tratamiento obtenido se muestran a continuación en la Tabla 4-11, dentro de estos están aquellos que se realizaron en las mediciones de campo y los análisis químicos realizados en un laboratorio externo. El informe emitido por el laboratorio externo se puede visualizar en el **Error! Reference source not found.**

**Tabla 4-11. ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DEL COMPOST.**

Ensayo	Unidad	Resultado
Humedad	%	34,5 <sup>a</sup>
pH	-	7,5 <sup>a</sup>
Materia Orgánica	%	29,43 <sup>b</sup>
Carbono orgánico	%	15,2 <sup>b</sup>
Nitrógeno total Kjeldahl	%	1,3 <sup>b</sup>
Relación C:N	-	11,69 <sup>b</sup>
Temperatura	°C	27,1 <sup>a</sup>
Fósforo	%	1,02 <sup>b</sup>
Potasio	%	1,09 <sup>b</sup>

**Elaborado por:** Autor

**Fuente:** <sup>a</sup>Variables medidas en la fase de campo

<sup>b</sup>Informe de resultados N° Q-006-22 (LABCESTA)

Para comprobar que el compost cumple con especificaciones se comparó con los parámetros establecidos para compost terminados en la norma NMX-AA-180-SCFI-2018 y la norma NCh2880.Of2004, los mismos que se encuentran en la Tabla 4-12.

**Tabla 4-12.** COMPARACIÓN DE ESPECIFICACIONES DEL COMPOST CON LA NORMA MEXICANA Y CHILENA.

Ensayo	Resultado	NMX-AA-180-SCFI-2018	NCh2880.Of2004	
			Clase A	Clase B
Color	Marrón Oscuro	Marrón o pardo oscuro	Marrón oscuro	Marrón oscuro
Olor	Tierra húmeda	Tierra húmeda de bosque	Característico sin olores desagradables	Característico sin olores desagradables
Humedad	34,5%	25 - 45% en peso	30 - 45%	30 - 45%
pH	7,5	6,7 - 8,5	5 -8,5	5 -8,5
Materia Orgánica	29,43%	≥20%MS	≥20%MS	≥20%MS
Carbono orgánico total (C)	15,20%	≥10%	-	-
Nitrógeno Total (N)	1,30%	1 - 3% MS	≥0,5%	≥0,5%
Relación C:N	11,69%	15-25	≤25	≤30
Temperatura	27,1°C	25 - 35°C	-	-
Fósforo (P)	1,02%	1 - 3% MS	-	-
Potasio (K)	1,09%	1 - 3% MS	-	-

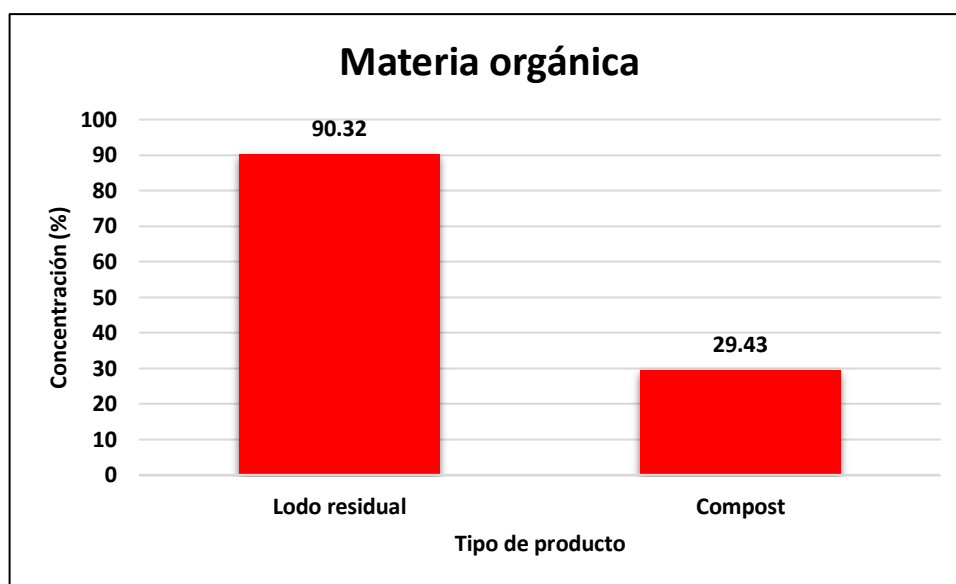
**Elaborado por:** Autor

Se puede observar que el compost cumplió con los parámetros establecidos tanto por las 2 normas, lo cual indica que es un abono de gran calidad agronómica.

El contenido de materia orgánica (M.O.) es un factor muy importante en el compost puesto que ayuda a mejorar las características físicas, químicas y actividades biológicas del suelo, mejorando las condiciones del mismo, además que aporta carbono que ayuda a mantener la biodiversidad (Bohórquez, 2019). Como se puede observar, el contenido de M.O. fue de 29,43% superior al 20% que establece como mínimo las 2 normas utilizadas en esta investigación.

Al comparar el contenido de M.O. del lodo residual con el compost (Figura 4-36), se puede observar que disminuyó considerablemente de 90,32% a 29,43% respectivamente, esto es debido a que durante todo el proceso se degradó, dejándole

dentro de límites permisibles, puesto que un exceso de M.O. resultaría tóxico para el suelo y los cultivos, produciendo un olor desagradable de la tierra, los cultivos se enferman debido a la invasión de hongos (Bohórquez, 2019).

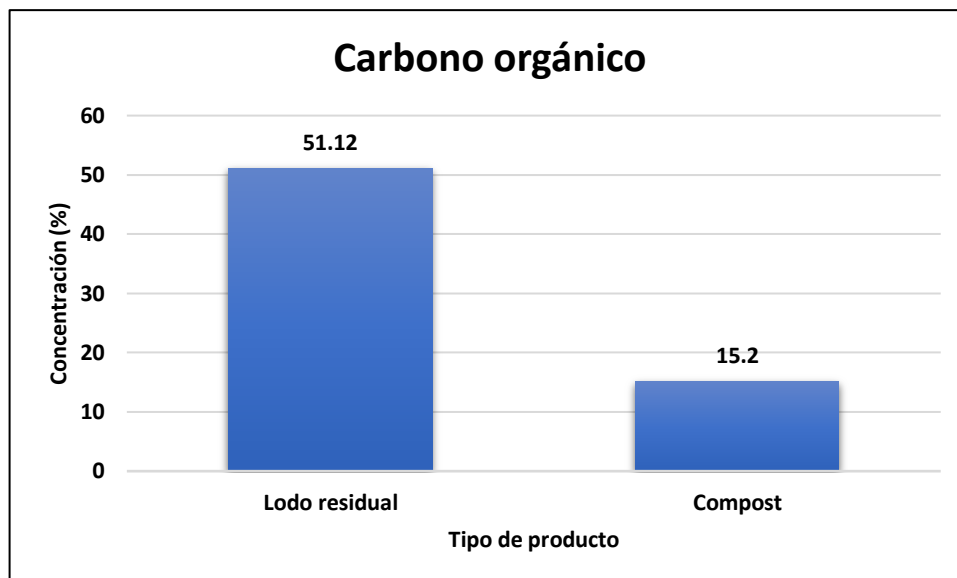


**Figura 4-36.** Comparación del contenido de M.O. del lodo residual y compost.  
**Fuente:** Autor

El contenido de C ayuda a la estructura del suelo, es una fuente de nutrientes de las plantas y los microorganismos que están en el suelo, favoreciendo al crecimiento y desarrollo de los cultivos (Bohórquez, 2019). El contenido de C en el compost fue de 15,20%; cumpliendo con la especificación de la norma mexicana, no se pudo comparar con la norma chilena debido a que ésta no establece especificaciones para este elemento.

De igual forma al comparar el contenido de C que hubo en el lodo residual al inicio con el del compost final, se pudo ver que disminuyó de 51,12% a 15,2% (Figura 4-37), esto es debido a que en las 2 primeras fases del proceso de compostaje el carbono presente en grasas, lignina, celulosa se descompone y una cierta cantidad se pierde debido a la producción de CO<sub>2</sub> (Asses et al., 2018). Un exceso de carbono aumentaría la relación C:N y por ende no estaría dentro de especificaciones indicando que no hubo una correcta degradación.



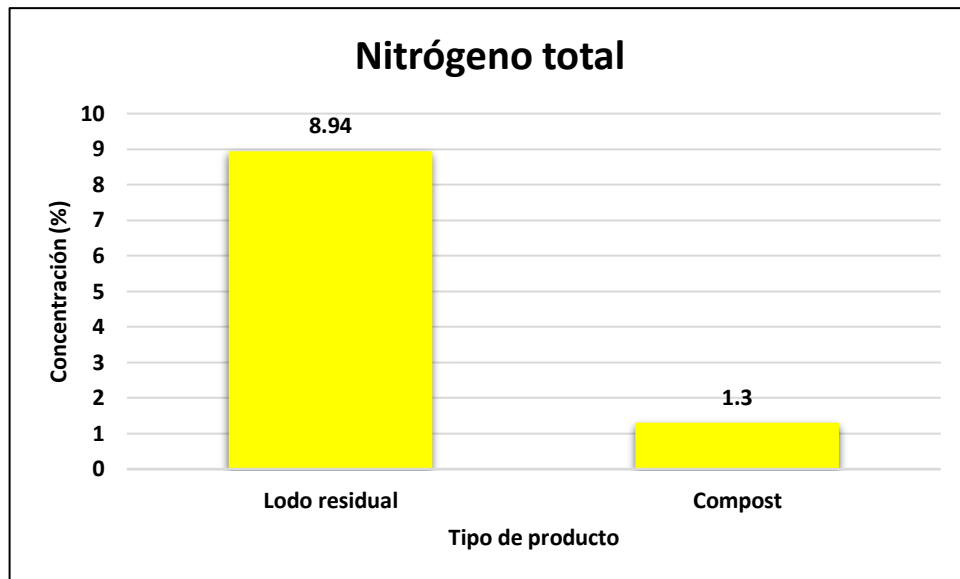


**Figura 4-37.** Comparación del contenido de C del lodo residual y compost.

**Fuente:** Autor

Por otro lado, el contenido de N es importante para los cultivos, ya que interviene en todos los procesos del desarrollo de las plantas, es el constituyente principal de las proteínas y ayuda a la nutrición y otros procesos básicos de las plantas (Bohórquez, 2019). El contenido de N fue de 1,30%, valor que cumple con las especificaciones establecidas por las 2 normas utilizadas, para un compost de buena calidad.

Haciendo una comparación entre el contenido de N del lodo residual y del compost obtenido (Figura 4-38), se puede observar que se redujo de 8,94 a 1,3%, esto se debe a que durante la fase termofílica el nitrógeno orgánico se descompone en amoníaco (Jiménez et al., 2018). En esta investigación la producción de amoníaco fue mínima debido que se controlaron correctamente las variables (pH, temperatura y humedad) durante todo el proceso. Esta reducción es importante debido a que un exceso de nitrógeno provoca que las plantas se vuelven más susceptibles a plagas y a enfermedades, debido a que presentan un crecimiento acelerado (Delgado et al., 2019).

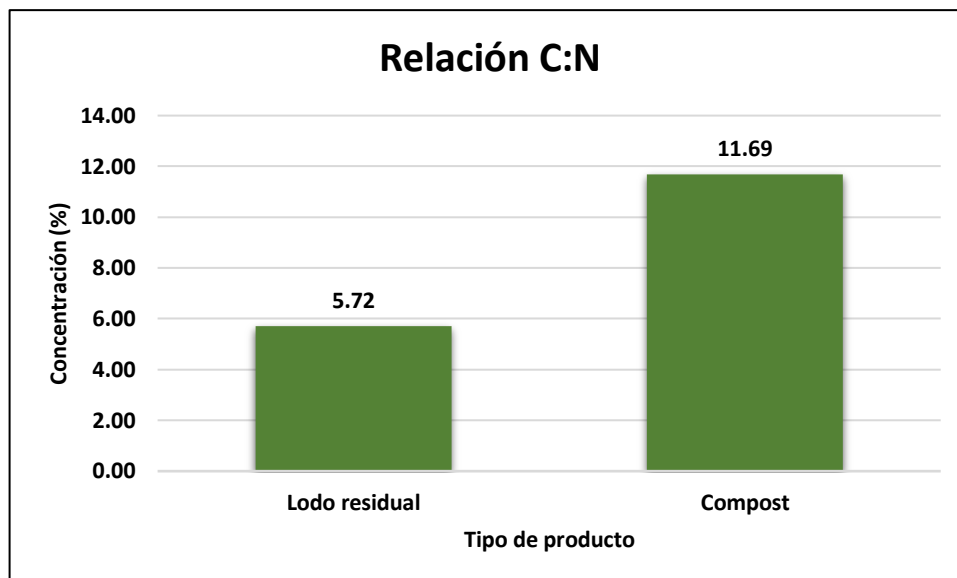


**Figura 4-38.** Comparación del contenido de N del lodo residual y compost.

**Fuente:** Autor

En cuanto a la relación C:N, el compost presentó un valor de 11,69%, según la norma mexicana este valor debe estar entre 15-25, por lo que no cumplió con especificaciones para esta norma, sin embargo, la norma chilena clasifica en 2 tipos de compost según la relación C:N, clase A y B como se puede observar en la Tabla 4-12, según el valor obtenido del análisis del compost, éste es un compost de Clase A, puesto que la relación C:N es <25, según esta norma, esta clase de compost es un producto de alto nivel de calidad sin restricciones de uso. Por otro lado, según Delgado et al., (2019), para que un compost esté estable y maduro debe tener una relación C:N <20, por otra parte, según Ascanio et al. (2022), sugiere como indicador de madurez una relación C:N 10 - 15. Por lo tanto el compost obtenido tuvo una relación C:N adecuada para que pueda ser aprovechada por las plantas en su desarrollo.

La relación C:N del lodo residual antes de compostar con la que se obtuvo en el producto final se puede observar (Figura 4-39) que aumentó de 5,72 a 11,69 respectivamente, esto se debió a la adición del aserrín como material de soporte ya que como se explicó anteriormente este material es rico en carbono y permitió obtener una relación C:N que cumple con los requisitos que debe tener un compost de calidad.

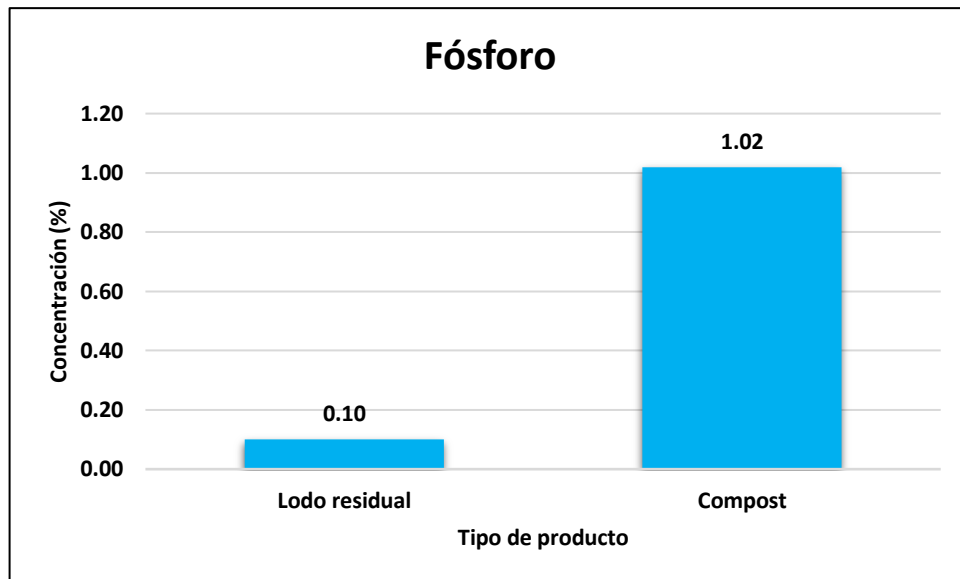


**Figura 4-39.** Comparación de la relación C:N del lodo residual y compost.

**Fuente:** Autor

El P es otro nutriente esencial para el desarrollo de las plantas, principalmente en la fotosíntesis que realizan las plantas, para la transferencia de energía (Bohórquez, 2019). El contenido de P obtenido en el compost fue de 1,02%, según la norma mexicana el valor de este nutriente debe estar entre 1 - 3% en base seca, por lo que cumple con especificaciones. La norma chilena no determina especificaciones para este nutriente por lo que no se le comparó con la misma. Un exceso de P intervendría en las plantas en la absorción de otros elementos y por ende deficiencia de los mismos ((Delgado et al., 2019).

Al comparar el contenido de P del lodo residual sin compostar con la que se obtuvo en el compost final, se observó que éste aumenta de 0,10 a 1,02% (Figura 4-40), esto se debió igualmente a la mezcla del lodo residual con el material de soporte, puesto que el aserrín aporta con P al producto final (Gayosso et al., 2018).

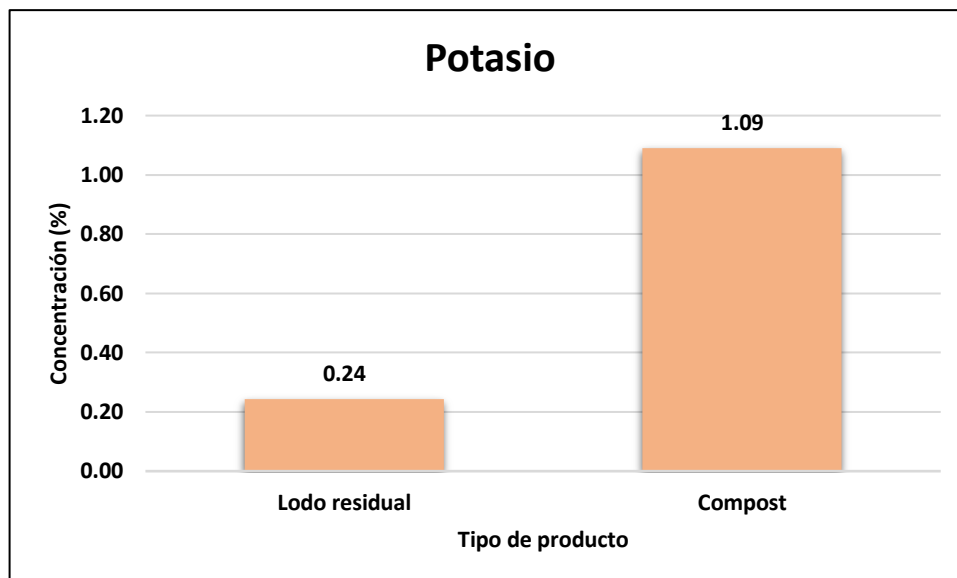


**Figura 4-40.** Comparación del contenido de P del lodo residual y compost.

**Fuente:** Autor

Finalmente, el último macronutriente esencial, el K, ayuda a proteger a la planta de enfermedades relacionadas a la sequía, heladas y salinidad; ya que tiene un rol importante en la estructura de la planta (Barbaro et., 2019). El análisis realizado al compost obtenido indica que tuvo una concentración de 1,09%. Según la norma mexicana el rango en el que debe estar este macronutriente es de 1 a 3% en base seca, lo que indica que cumple con especificaciones. La norma chilena no determina parámetros para este elemento por lo tanto no se la comparó con esta. Un exceso de K en el abono obstruiría de igual forma la absorción de otros elementos, causando deficiencia de los mismos.

El contenido de K en el producto final aumentó con relación al del lodo residual, de 0,24 a 1,09% (Figura 4-41). Esto se debe de igual forma a la mezcla con aserrín que aporta con este macronutriente, además por el metabolismo de los microorganismos (Gayosso et al., 2018).



**Figura 4-41.** Comparación del contenido de K del lodo residual y compost.

**Fuente:** Autor

Igualmente, los análisis físicos que se realizaron al compost en campo se encontraron dentro de parámetros. Es así, la humedad del producto terminado fue aproximadamente de 34%, según la norma mexicana un compost de buena calidad debe tener una humedad en el rango de 25 a 45%, por lo tanto, cumplió con ese parámetro. La norma chilena establece que debe estar en un rango de 30 a 45%, de igual manera el compost obtenido cumplió con las especificaciones de dicha norma.

En lo referente a la temperatura del producto final, esta fue de 27,1°C; según la norma mexicana este parámetro debe estar en un rango de 25 - 35°C, indicando que el compost estuvo dentro de esa especificación, la norma chilena no determina rangos para este parámetro para una composta terminada. Según Guerrini et al. (2017) la disminución de la temperatura a valores cercanos a la temperatura ambiente en el producto final es uno de los indicadores más básicos de estabilidad del compost.

Finalmente, el pH del producto terminado fue de 7,58; según la norma mexicana, el pH debe estar entre 6,5 – 8,5; y para la norma chilena el rango se aumenta de 5 – 8,5; para cualquiera de las 2 normas, el valor obtenido en el compost se encontró dentro de especificaciones.

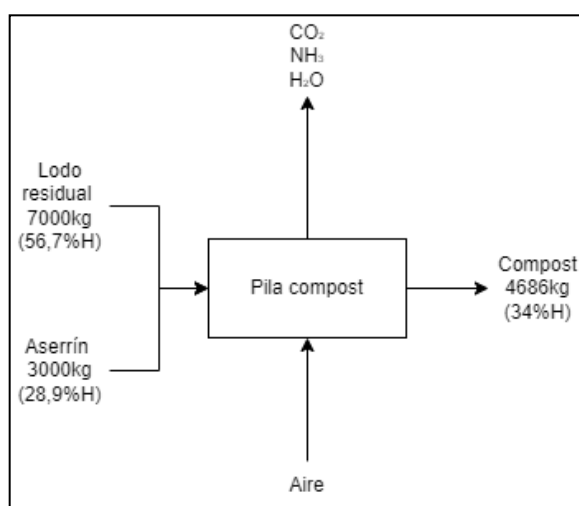
Una vez analizado cada uno de los parámetros del compost, se pudo concluir que se obtuvo un producto de calidad, estable y maduro listo para ser utilizado como abono orgánico, que cuenta con los nutrientes esenciales y necesarios para satisfacer las necesidades de las plantas. Según la norma mexicana se trata de un compost terminado

de buena calidad y de acuerdo a la norma chilena, el compost obtenido es de Clase A, un producto de calidad, sin limitaciones para su utilización.

En el Anexo 9 se puede observar la metodología a seguir para la obtención de compost con las características y parámetros del mejor tratamiento obtenido.

#### 4.6. Eficiencia o rendimiento del proceso de compostaje

En todo proceso se busca aprovechar o utilizar al máximo las materias primas para obtener el producto final. Esto se lo puede determinar mediante un balance de masa para cuantificar la cantidad de producto final obtenido por cantidad de materia prima utilizada. En la Figura 4-42, se puede observar el esquema general del balance de masa del compostaje para el mejor tratamiento resultante, en el cual la masa inicial de materia prima fue 10000kg (7000kg de lodo residual y 3000kg de aserrín) y al final del proceso se obtuvo 4686kg aproximadamente, equivalente a 104 sacos de abono de 45kg cada uno (Figura 4-43).



**Figura 4-42.** Esquema general del balance de masa del compostaje.

**Fuente:** Autor



**Figura 4-43.** Compost obtenido (sacos de 45kg).

**Fuente:** Autor

El rendimiento del proceso fue 46,86%, el cual se determinó mediante la ecuación (11).

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Cantidad compost obtenido}}{\text{Cantidad materia prima utilizada}} * 100 \quad (11)$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{4686\text{Kg}}{10000\text{Kg}} * 100$$

$$\text{Rendimiento} = 46,86\%$$

Hay que aclarar que este rendimiento es tomando en cuenta los pesos en base húmeda (B.H.), es decir con el contenido de humedad que posee tanto las materias primas como el producto terminado. Sin embargo, también se determinó el rendimiento en base seca (B.S.) de los materiales que entran y salen, utilizando la misma ecuación (11). A continuación, en la Tabla 4-13 y Tabla 4-14, se muestran un resumen de los pesos y rendimientos obtenidos tanto en B.H. como en B.S.

**Tabla 4-13. PESOS DE MATERIA PRIMA Y PRODUCTO TERMINADO EN B.H. Y B.S.**

	<b>Material</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Peso en B.H.</b>	<b>Peso en B.S.</b>
<b>Materia Prima</b>	Lodo residual	56,7	7000	3031
	Aserrín	28,9	3000	2133
<b>Producto terminado</b>	Compost	34	4686	3092,76

**Elaborado por:** Autor

**Tabla 4-14. RENDIMIENTOS DEL COMPOSTAJE CALCULADOS EN B.H. Y B.S.**

	<b>B.H.</b>	<b>B.S.</b>
<b>Materia prima inicial (kg)</b>	10000	5164
<b>Compost final (Kg)</b>	4686	3092,76
<b>Rendimiento o eficiencia (%)</b>	46,86	59,89

**Elaborado por:** Autor

Como se puede observar, el rendimiento calculado en B.S. es mayor que el de B.H., sin embargo, el rendimiento real del proceso de compostaje es el determinado con las cantidades en B.H., es decir 46,86%.

#### **4.7. Beneficios del compostaje y del compost obtenido**

Mediante la propuesta del aprovechamiento de los lodos residuales provenientes de la PTAR, se puede observar que tiene varios beneficios tanto ambientales como económicos.

##### **4.7.1. Beneficios ambientales**

La gran mayoría corresponden a beneficios ambientales, dentro de los que se pudieron identificar están:

- Reutilización y aprovechamiento del residuo que puede provocar impactos negativos ambientales sino son tratados previamente antes de su disposición final.
- Reducción del volumen del lodo residual para su fácil almacenamiento, transporte y uso.
- Eliminación de patógenos
- Disminución y control de malos olores producidos por los lodos.

##### **4.7.2. Beneficios económicos**

El compostaje de los lodos residuales también tiene beneficios económicos, puesto que al reutilizar el residuo que normalmente es un desecho que va a los rellenos sanitarios, se puede obtener un producto de gran utilidad para el campo agrícola. Según Bohórquez (2019), el compost está teniendo gran acogida en la agricultura por su contenido de nutrientes, su naturaleza orgánica y por su precio accesible.

#### **Costo de producción**

De acuerdo Meleán et al. (2021), los costos de producción son los gastos necesarios para fabricar un bien o generar un servicio. Dentro de los costos de producción se consideran variables como materia prima e insumos, mano de obra, maquinaria, consumo de energía entre otros. Es necesario conocer con exactitud lo que cuesta elaborar un producto para de esta manera establecer una política adecuada de precios.



Se realizó una estimación del costo de producción, de lo que sería producir 1 saco de compost de 45kg, tomando en cuenta una máxima capacidad productiva para un año de producción y generación de lodos residuales. La PTAR de la empresa de alimentos produce aproximadamente 8m<sup>3</sup> diarios de lodo residual, estimando una producción anual de 2880m<sup>3</sup> (2701440kg), considerando el rendimiento de 46,86% obtenido en esta investigación para una cantidad de 7000kg de lodo, se tendrá una producción aproximada de 1806105,6kg de compost al año.

Para la determinación del costo de producción se consideró costos variables y costos fijos. Según Meleán et al. (2021), los costos variables son aquellos que varían de acuerdo al volumen de producción, mientras que los costos fijos se mantienen constantes por un período de tiempo independientemente del volumen de producción.

Este análisis se elaboró para el tratamiento que resultó ser el mejor, con la cantidad de materia prima, insumos y maquinaria que se requirieron para ese tratamiento, aproximando a un año de generación de lodos, además se consideró costos estimados de mano de obra y servicios básicos.

Dentro de los costos variables se consideró a la materia prima, insumos y mano de obra como se puede observar en la Tabla 4-15.

**Tabla 4-15. COSTOS VARIABLES.**

Detalle	Unidad	Costo unitario (USD)	Cantidad (7000kg de lodo)	Cantidad anual	Costo anual (USD)
Aserrín	Kg.	0,005	3.000	1.157.760	5.788,8
Cal	Kg.	0,29	200	77.184	22.383,36
Sacos de polipropileno	unid.	0,25	104	40.136	10.034
Viajes volqueta con lodo	unid.	60	1	386	23.160
Combustible bobcat y volteadora	Gal.	1,75	70	27.000	47.250
Mano de obra	hora/hombre	1,77	-	864	1.529,28
<b>Total</b>					<b>110.145,44</b>

**Elaborado por:** Autor

El costo de la mano de obra se calculó considerando que se requerirá la presencia de 2 obreros por aproximadamente 3 horas diarias por 3 días a la semana. Para esto se

determinó el costo de la hora/hombre tomando como base el sueldo básico actual correspondiente a 425USD y las 240 horas de labores al mes, resultando un valor de 1,77USD hora /hombre.

Dentro de los costos fijos se consideró la maquinaria (depreciación anual) y una estimación del costo de servicios básicos (Tabla 4-16).

**Tabla 4-16. COSTOS FIJOS.**

Detalle	Costo (USD)
Depreciación anual	7.022,7
Servicios (agua, luz)	600
<b>Total</b>	<b>7.622,7</b>

**Elaborado por:** Autor

Para la depreciación anual, se basó en el tiempo de vida útil de cada máquina o equipo establecida por el Reglamento de la Ley Orgánica de Régimen Tributario Interno (LORTI), específicamente en el Art. 28 numeral 6 (Tabla 4-17).

**Tabla 4-17. DEPRECIACIÓN ANUAL.**

Detalle	Costo (USD)	Vida útil (años) <sup>a</sup>	Depreciación anual (USD)
Báscula	355	10	35,5
Cosedora de sacos	110	10	11
Bobcat	49.500	10	4.950
Volteadora	20.000	10	2.000
Medidor temperatura, humedad y ph de suelo	100	4	25
Palas	12	10	1,2
<b>Total</b>			<b>7.022,7</b>

**Elaborado por:** Autor

**Fuente:** <sup>a</sup> LORTI

Con los costos variables y fijos obtenidos se tiene un costo total anual de 117.768,14USD; considerando una producción aproximada de 1.806.105,6kg de compost resulta que costará 0,065USD/kg compost. De esta manera 1 saco de 45kg de compost tendrá un costo de producción aproximado de 2,93USD; que, al ser vendido a un precio de 4,50USD que es un precio accesible y aceptado en el mercado, se tendrá una utilidad de 1,57USD en cada saco. Considerando ese P.V.P. de cada saco de 45kg se tiene que cada kg de compost tiene un P.V.P. de 0,10USD. A continuación, en la

Tabla 4-18 se detalla el beneficio económico que se tendrá al producir compost a partir de lodos residuales.

**Tabla 4-18.** Beneficios económicos de la producción de compost a partir de lodos residuales.

<b>Detalle</b>	<b>Rubro (USD)</b>
Costos fijos anuales (1)	\$ 7.622,7
Costos variables anuales (2)	\$ 110.145,44
Costo total (1+2)	\$ 117.768,14
Ingresos (kg fabricados al año por P.V.P)	\$ 180.610,56
Utilidad (ingresos – costo total)	\$ 62.842,42

**Elaborado por:** Autor

Hay que recalcar que los costos totales fueron calculados para una producción de un año, lo que indica que al vender toda la producción de compost se tendrá un ingreso aproximado de 180.610,56 USD anuales, teniendo una utilidad anual aproximada de 62.842,42 USD.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

#### 5.1. Conclusiones

- Con la alternativa sustentable propuesta en esta investigación, se muestra la viabilidad del uso del compostaje como una opción de manejo y aprovechamiento de lodos activados residuales producidos en PTAR de empresas de alimentos para su disposición final, ingresando este desecho a la cadena de producción, generando un producto de gran utilidad para la agricultura. Así, se evita que estos desechos generen impactos negativos ambientales, ocupando una gran área, produciendo malos olores y provocando la aparición de vectores.
- La caracterización físico-química y microbiológica de los lodos residuales utilizados en esta investigación determinan que no son un desecho peligroso, y que pueden ser aprovechados para usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas. Además, se identifica la presencia de fitonutrientes y materia orgánica esenciales para la elaboración de compost, por lo que se le considera como un biosólido de gran utilidad.
- Se realizan 6 biopilas (tratamientos) de compost y basado en la evolución de los datos de temperatura de cada tratamiento, corroborando con el análisis estadístico se determina que la pila conformada por 7000kg de lodo y 3000kg de aserrín resulta ser la mejor, ya que logra temperaturas adecuadas para la correcta higienización del producto, se obtiene el compost más rápido, cumpliendo con todas las fases del proceso, con parámetros dentro de rango y logrando tener un compost de calidad, estable y maduro que aporta los nutrientes esenciales para el desarrollo y mejoramiento del suelo y los cultivos.
- Mediante un balance de masa se cuantifica que para el mejor tratamiento resultante se inicia con 10000kg de materia prima, finalizado el proceso se obtiene aproximadamente 4686kg de compost, lo que indica que presenta un

rendimiento del 46,86%. Con este rendimiento, se concluye que además de que el compostaje es una alternativa para la estabilización y tratamiento de los lodos residuales de industrias alimenticias, mejorando la calidad del mismo para su aprovechamiento, también permite la reducción del desecho para el transporte y requerimiento de espacio para su disposición.

- La reutilización de los lodos activados residuales tiene grandes beneficios tanto ambientales como económicos. En lo que tiene que ver con el medio ambiente evita la producción de malos olores, aparición de vectores y reducción del volumen del residuo para su disposición final. En lo referente al aspecto económico, el producto final obtenido de la reutilización de este residuo que a simple vista parecería que no tiene valor, resulta de gran importancia y utilidad en el campo agrícola, cuyo costo de producción a gran escala es relativamente bajo y permitirá obtener una utilidad aproximada anual de 62.842,42USD, al ser vendido el abono a un precio accesible en el mercado.

## **5.2. Recomendaciones**

- Incentivar a las empresas a procesos de producción más limpia relacionados a la generación de lodos en las PTAR, mediante un adecuado aprovechamiento de los mismos como mejoradores de suelo y abonos orgánicos.
- Evaluar el uso de otros materiales de soporte para mezclar con el lodo residual que añadan otros nutrientes y mayor cantidad de carbono orgánico, mejorando la calidad del compost final.
- Monitorear y evaluar el desprendimiento de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> en las diferentes etapas del proceso, con el fin de minimizar las mismas mediante el adecuado control de variables como temperatura, humedad y pH.
- Realizar análisis microbiológicos al compost final para verificar la correcta inocuidad del producto, determinar los microorganismos que pudieran estar presentes, si son benéficos o patógenos y la cantidad aproximada. De igual manera se recomienda realizar pruebas para la identificación de otros parámetros complementarios que determinen la calidad de un compost maduro.

- Evaluar la influencia de las condiciones ambientales como temperatura y humedad, durante todo el proceso de compostaje.
- Utilizar geomembrana para proteger el área donde se lleve a cabo el proceso para evitar que los lixiviados que se producen durante el proceso penetren en el suelo y afecten la calidad del mismo. De igual manera construir un sistema de recolección de estos lixiviados para estabilizarlos y posterior utilización en preparados para nutrición vegetal o descarga.
- Proponer como línea de investigación la utilización microorganismos eficientes (EM) en las pilas de compostaje, debido a que estudios realizados indican que estos incrementan la velocidad de degradación de la materia orgánica por ende aceleran el proceso de compostaje y también ayudan a controlar olores en el compostaje.
- Investigar la posibilidad de captar el amoníaco generado en el compostaje y a través de condensación obtener hidróxido de amonio.
- Verificar y evaluar los beneficios del compost obtenido, aplicando en diferentes cultivos según los requerimientos nutricionales de los mismos, mediante una caracterización de la producción agrícola.

### **5.3. Bibliografía**

- Abdul Khaliq, S. J., Al-Busaidi, A., Ahmed, M., Al-Wardy, M., Agrama, H., & Choudri, B. S. (2017). The effect of municipal sewage sludge on the quality of soil and crops. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(4), 289–299. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0176-4>
- Acatrinei-Insuratelu, O., Buftia, G., Lazar, I.-M., & Rusu, L. (2019). AEROBIC COMPOSTING OF MIXING SEWAGE SLUDGE WITH GREEN WASTE FROM LAWN GRASS. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND MANAGEMENT JOURNAL*, 18(8), 1789–1798.
- Alonso, J. J. S., Martel, N. M., & Zaera, M. R. (2016). *Gestión integral de aguas y lodos hacia una economía circular: valorización de lodos de depuradoras*.

- Argudo, J., Molina, V., & Leyva, J. (2017). Valoración de lodos procedentes de plantas de tratamiento de agua potable. Una apuesta por la economía circular y sostenibilidad. *Dyna*, 92, 71–75.
- Ascanio Pérez, M., Corzo, M. C., Ramírez, H. L., Jaimes, F., Jaimes, Y., Duarte, F., Contreras, M., Contreras, G., Rodríguez, Y., Marín, E., & others. (2022). *El compostaje a partir de microorganismos eficientes*.
- Asses, N., Farhat, A., Cherif, S., Hamdi, M., & Bouallagui, H. (2018). Comparative study of sewage sludge co-composting with olive mill wastes or green residues: Process monitoring and agriculture value of the resulting composts. *Process Safety and Environmental Protection*, 114, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.12.006>
- Barthod, J., Rumpel, C., & Dignac, M.-F. (2018). Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0491-9>
- Braga, J. A. (2021). Diseño experimental: Un enfoque en las ciencias agrarias. *Notas de Campus*, 1.
- Bohórquez Santana, W. (2019). *El proceso de compostaje* (Issue 1). Universidad de la Salle.
- Bożym, M., & Siemiątkowski, G. (2018). Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(34), 34332–34342. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3335-x>
- Cajal Flores, Alberto. (2020). Prueba de Tukey: en qué consiste, caso de ejemplo, ejercicio resuelto. Lifeder.
- Camacho Céspedes, F., Uribe Lorío, L., Newcomer, Q., Masters, K., & Kinyua, M. (2018). Bio-optimización del compost con cultivos de microorganismos de montaña (MM) y lodos digeridos de biodigestor (LDBIO). *Cuadernos de Investigación UNED*, 10(2), 330–341.

- Castellanos, P. M. A., García, B. P., Cuéllar, L. Á., & Pita, M. D. (2019). Análisis de variables físicas y microbiológicas en el proceso de compostaje de biosólidos en pilas menores a un metro cúbico. *Cuaderno Activa*, *11*, 23–32.
- Chu, L., & He, W. (2021). Toxic metals in soil due to the land application of sewage sludge in China: Spatiotemporal variations and influencing factors. *Science of the Total Environment*, *757*, 143813. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143813>
- Código Orgánico del Ambiente. Ley 0. Registro Oficial Suplemento 983 de 12 – abr 2017.
- De la Rosa, N. I. (2018). *Manejo de residuos sólidos en las empresas alimentarias*.
- Delgado, M. D. M., López, K., González, M., Lluch, J., & Martín, J. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *35*, 965–977. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.15>
- Escalante Caballero, S. G. (2021). *Propuesta para el aprovechamiento de lodos residuales provenientes de la industria alimentaria en Trujillo, 2020*.
- Gao, X., Tan, W., Zhao, Y., Wu, J., Sun, Q., Qi, H., Xie, X., & Wei, Z. (2019). Diversity in the Mechanisms of Humin Formation during Composting with Different Materials. *Environmental Science & Technology*, *53*(7), 3653–3662. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06401>
- Garibay, S., Aldrete, A., Upton, J., & Chaparro, V. (2019). Caracterización física y química de sustratos con base en corteza y aserrín de pino. *Madera y Bosques*, *25*. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521520>
- Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M. A., & Garruña, R. (2018). Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia*, *52*(4), 639–652.
- Giannetti, B. F., Agostinho, F., Eras, J. J. C., Yang, Z., & Almeida, C. M. V. B. (2020). Cleaner production for achieving the sustainable development goals. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, *271*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122127>
- González, D., Colón, J., Gabriel, D., & Sánchez, A. (2019). The effect of the composting time on the gaseous emissions and the compost stability in a full-scale



- sewage sludge composting plant. *Science of The Total Environment*, 654. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.081>.
- Guerrini, I. A., Croce, C. G. G., de Carvalho Bueno, O., Jacon, C. P. R. P., Nogueira, T. A. R., Fernandes, D. M., Ganga, A., & Capra, G. F. (2017). Composted sewage sludge and steel mill slag as potential amendments for urban soils involved in afforestation programs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 93–104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.015>.
- Hoang, S. A., Bolan, N., Madhubashani, A. M. P., Vithanage, M., Perera, V., Wijesekara, H., Wang, H., Srivastava, P., Kirkham, M. B., Mickan, B. S., Rinklebe, J., & Siddique, K. H. M. (2022). Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: A review. *Environmental Pollution*, 293, 118564. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118564>
- INEN. (2017). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2266. Transporte, etiquetado almacenamiento y manejo de materiales peligrosos. Requisitos.
- Index to EPA test methods*. United States Environmental Protection Agency, Region I.
- INN. (2004). Norma Chilena Oficial NCh2880. Of2004. Compost - Clasificación y requisitos. Servicio Agrícola Ganadero. Instituto Nacional de Normalización de Chile.
- Jain, M. S., Paul, S., & Kalamdhad, A. S. (2019). Interplay of physical and chemical properties during in-vessel degradation of sewage sludge. *Waste Management*, 98, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.015>
- Jiménez, M., Sánchez, G., Burrola, C., Viñas, J., & Tello, A. (2018). *Revalorización de lodos residuales: 1. Compostaje*.
- Królik, D., Wypych, P., & Kostecki, J. (2019). Sewage Sludge Management in a Sewage Treatment Plant. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 29(3), 209–217. <https://doi.org/doi:10.2478/ceer-2019-0036>
- Kwarciak-Kozłowska, A. (2019). Co-composting of sewage sludge and wetland plant material from a constructed wetland treating domestic wastewater. In *Industrial*

*and Municipal Sludge*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815907-1.00015-5>

Lasaridi, K., 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). <https://doi.org/10.3390/su10082618>

Listado Nacional Sustancias Químicas Peligrosas Desechos Peligrosos. Acuerdo Ministerial 142. Registro Oficial Suplemento 856 de 21- dic- 2012.

Lorren Delgado, F. A. A. (2018). *Mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales" El Indio" para la obtención de la autorización de reúso*

LORTI. (2020). Reglamento para aplicación de la Ley Orgánica de Régimen Tributario Interno. Decreto Ejecutivo 374. Última modificación: 04-ago-2020.

Lu, W., Ye, R., Ming, Z., Pan, C., Abbas, Y., Stegmann, R., & Wang, H. (2020). Performance Evaluation in Composting of Sewage Sludge with Different Bulking Agents. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, *146*(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001727](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001727).

Magee, H. Y., Maurer, M. M., Cobos, A., Pycke, B. F. G., Venkatesan, A. K., Magee, D., Scotch, M., & Halden, R. U. (2018). U.S. nationwide reconnaissance of ten infrequently monitored antibiotics in municipal biosolids. *Science of the Total Environment*, *643*, 460– 467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.206>

Manca, A., da Silva, M. R., Guerrini, I. A., Fernandes, D. M., Villas Bôas, R. L., da Silva, L. C., da Fonseca, A. C., Ruggiu, M. C., Cruz, C. V., Lozano Sivilsaca, D. C., de Moura D'Andréa Mateus, C., Murgia, I., Grilli, E., Ganga, A., & Capra, G. F. (2020). Composted sewage sludge with sugarcane bagasse as a commercial substrate for Eucalyptus urograndis seedling production. *Journal of Cleaner Production*, *269*, 122145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122145>


Medina-Herrera, M. del R., Negrete-Rodríguez, M. de la L. X., Gámez-Vázquez, F. P., Álvarez-Bernal, D., & Conde-Barajas, E. (2020). La aplicación de lodos residuales afecta, a corto plazo, la biomasa microbiana y su actividad en suelos sódicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *36*(3), 577–591.

- Meleán, R., & Torres, F. (2021). Gestión de costos en las cadenas productivas: reflexiones sobre su génesis. *Retos*, *11*, 131–146. <https://doi.org/10.17163/ret.n21.2021.08>
- Muñoz, C. E. P., Amparo, B., & Betancur, W. (2019). Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras. *Producción+ Limpia*, *14*(1), 33–45.
- Nguyen, T.-B., & Shima, K. (2019). Composting of Sewage Sludge with a Simple Aeration Method and its Utilization as a Soil Fertilizer. *Environmental Management*, *63*(4). <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0963-8>
- Ozdemir, S., Dede, G., Dede, O. H., & Turp, S. M. (2019). Composting of sewage sludge with mole cricket: stability, maturity and sanitation aspects. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *16*(10). <https://doi.org/10.1007/s13762-018-02192-4>
- Pascual, J. A., Morales, A. B., Ayuso, L. M., Segura, P., & Ros, M. (2018). Characterisation of sludge produced by the agri-food industry and recycling options for its agricultural uses in a typical Mediterranean area, the Segura River basin (Spain). *Waste Management*, *82*, 118–128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.020>
- Saldaña-Escorcía, R., & Gámez, J. K. C. (2022). Alternativas para la estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales desde un enfoque sistémico: una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *13*(1), 175–194.
- Sánchez, J. G. C., Saltos, L. D. B., Obando, M. B. V., & Rizo, H. A. Z. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, *5*(1), 23–27.
- Semarnat. (2002). 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. *Diario Oficial de La Federación*.

- Semarnat. (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. *Diario Oficial de La Federación*.
- SCFI. (2018). Norma Mexicana 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. *Dirección General de Normas*.
- Shen, Y., Zhou, H., Meng, H., Guo, R., Zheng, G., & Chen, T. (2020). Generation and Emission of Ammonia During the Full-Scale Composting of Sewage Sludge. *WASTE AND BIOMASS VALORIZATION*, 11(9), 4757–4766. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00791-x>

## 5.4. Anexos

### Anexo 1. Análisis CRETIB del lodo activado residual

 <b>LABCESTTA</b> <small>TECNOLOGÍA Y CALIDAD</small>	<b>DEPARTAMENTO: ANALITICALAB</b>	<b>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL SAE</b>  <b>ACREDITACIÓN N° SAE LEN 18-034</b>
--	---------------------------------------	---

INFORME DE RESULTADOS No: LD-024-21

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	PRODEGEL	ATENCIÓN A:	Ing. Freddy Toapanta
DIRECCIÓN:	Km 10 ½ via Baños, Totoras	TELÉFONO:	0984442015/ 032 748123/ 032 748118
TIPO DE MUESTRA:	Lodo	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	Lodo Prensado.
CÓDIGO CLIENTE:	L-1	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA, RESPONSABLE:	N.A.

#### INFORMACIÓN DEL LABORATORIO


TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	LABCESTTA S.A.	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	28/06/2021 15:50	ANÁLISIS SOLICITADO:	Físico – Químico - Microbiológico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	29/06/2021 09:15	FECHA DE ANÁLISIS:	29/06/2021 - 09/07/2021
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	09/07/2021	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-LD-024-21
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	Cristian Jara	COORDENADAS:	17M 0767787 / 9853754
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS   T máx.: 25,0 °C. T mín.: 15,0 °C			

#### RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
<sup>a</sup> Arsénico	mg/L	<0,01	±18%	PE-AL-17 EPA 200.7 ICP-AES Rev. 4.4 1994	5,0
<sup>a</sup> Cadmio	mg/L	<0,004	±10%	PE-AL-17 EPA 200.7 ICP-AES Rev. 4.4 1994	1,0
<sup>a</sup> Níquel	mg/L	<0,05	±9%	PE-AL-17 EPA 200.7 ICP-AES Rev. 4.4 1994	5,0
<sup>a</sup> Plomo	mg/L	0,06	±14%	PE-AL-17 EPA 200.7 ICP-AES Rev. 4.4 1994	5,0
<sup>a*</sup> Cromo hexavalente	mg/L	<0,02	-	EPA 1311 / EPA 7197	5,0
<sup>b*</sup> Reacción con agua	-	NO REACCIONA	-	NOM-052-SEMARNAT/93	NO REACCIONA
<sup>b*</sup> Reacción con ácidos	-	NO REACCIONA	-	NOM-052-SEMARNAT/93	NO REACCIONA
<sup>b*</sup> Reacción con álcali	-	NO REACCIONA	-	NOM-052-SEMARNAT/93	NO REACCIONA
<sup>b*</sup> Generación de HCN	mg/kg	<0,01	-	EPA 9014	250 HCN
<sup>b*</sup> Generación de H <sub>2</sub> S	mg/kg	0,06	-	EPA 9014	500 H <sub>2</sub> S
<sup>b</sup> Potencial hidrógeno	Unidades de pH	7,56	±0,3	PE-AL-32 EPA9045D.2004	≥ 2 ≤12,5

Parque Industrial California II, Local C36, Guayaquil

Página 1 de 2  
Revisión 3  
MC01-20

 <b>LABCESTTA</b> TECNOLOGÍA Y CALIDAD	<b>DEPARTAMENTO: ANALITICALAB</b>	<b>LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL SAE</b>  <b>ACREDITACIÓN N° SAE LEN 18-034</b>
---	---------------------------------------	---

b*Velocidad de corrosión	mm/año	0,05	-	EPA 1110 A	6,35
b*Salmonella	-	AUSENCIA	-	AOAC 960801	1000/g
b*Coliformes fecales	NMP/g	21000	-	Fermentación en tubos múltiples	Media geométrica de 7 muestras o igual a $2 \times 10^6$ NMP o UFC/g ST
b*Huevos de parásitos	-	PRESENCIA	-	Observación microscópica	15/g
b*Constante de Explosividad	-	NO APLICA	-	NOM-052-SEMARNAT/93	Constante Menor a Dinitrobenceno
b*Reacción o descomposición Detonante o Explosiva	-	NO REACCIONA, NO SE DESCOMPONE	-	NOM-052-SEMARNAT/93	NO REACCIONA, NO SE DESCOMPONE
b*Contenido de Alcohol si es acuoso	-	NO LO ES	-	EPA8260B	<24%
b*Punto de inflamación si es líquido	-	NO LO ES	-	EPA1010A	>60
b*Capaz de provocar fuego si no es líquido	-	NO ES CAPAZ	-	NOM-052-SEMARNAT/93	NO ES CAPAZ
b*Es Gas comprimido inflamable y oxidante	-	NO LO ES	-	NOM-052-SEMARNAT/93	NO LO ES

**OBSERVACIONES:**

- Muestra transportada en refrigeración.
- Los ensayos marcados con (\*) están fuera del alcance de acreditación del SAE.
- Los ensayos marcados con (a) son realizados en extracto PECT; los ensayos marcados con (b) son realizados en peso húmedo.
- La columna: Valor límite permisible, está fuera del alcance de acreditación del SAE. Contempla los límites máximos permisibles indicados en los Listados Nacionales de Desechos Peligrosos y Métodos de Caracterización, solicitados por el cliente.

**AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:**

  
 Ing. Verónica Bravo  
 DIRECTORA TÉCNICA

  
**LABCESTTA**  
 TECNOLOGÍA Y CALIDAD  
 RUC:0691736210001

**NOTAS:**

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTTA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.
- Cuando se emitan criterios de conformidad y aplique, se tendrá en cuenta el: Instructivo de Regla de decisión para una declaratoria de conformidad IE-AL-26.

## Anexo 2. Análisis de fitonutrientes del lodo activado residual

INFORME DE RESULTADOS No: LD-011-21

INFORMACION PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	Santiago Toapam	ATENCIÓN A:	Santiago Toapaxi
DIRECCIÓN:	Ambato	TELÉFONO:	-
TIPO DE MUESTRA:	Lodos	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	Dato no proporcionado por el cliente
CÓDIGO CLIENTE:	Dato no proporcionado por el cliente	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA, RESPONSABLE:	Dato no proporcionado por el cliente

### INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A.	ANÁLISIS SOLICITADO:	Físico – Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	06/01/2022 11:00	FECHA DE ANÁLISIS:	06/01/2022 – 16/01/2022
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	16/01/2022	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-LD-011-21
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A.	COORDENADAS:	N.A.
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS		T máx.: 25,0 °C T mín.: 15,0 °C	

### RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Plomo	mg/kg	<10	±14%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Cromo	mg/kg	<50	±26%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Cadmio	mg/kg	<0,25	±10%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Cobre	mg/kg	60,46	±20%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Arsénico	mg/kg	<10	±12%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Niquel	mg/kg	<10	±15%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Fósforo	mg/kg	>1000	±22%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Potasio	mg/kg	2424,97	±23%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Calcio	mg/kg	12637,6	±26%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-

Magnesio	mg/kg	1294,54	±14%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Hierro	mg/kg	1331,08	±15%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Zinc	mg/kg	162,62	±17%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Manganeso	mg/kg	18,33	±15%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Molibdèno	mg/kg	6,56	±19%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Boro	mg/kg	4,78	±33%	PE-AL-18 EPA 3015A – EPA 6010D	-
Potencial Hidrógeno	Unidades de pH	6,99	±0,3	PE-AL-32 EPA9045D 2004	-
*Relación C/N	%	5,72	-	Espectrofotométrico	-
Materia Orgánica	%	90,32	±9%	PE-AL-49 NEN 5754 2005	-
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/kg	>10000	±4%	PE-AL-73 Standard Methods, Ed 23. 2017 4500 N org C	-
*Azufre	mg/kg	<10,20	-	Espectrofotométrico	-
*Densidad	mg/L	0,63	-	Gravimétrico	-
*Nitrógeno Total	%	8,94	-	Espectrofotométrico	-
*Carbono orgánico	%	51,12	-	Volumétrico	-

**OBSERVACIONES:**

- Muestra transportada en refrigeración.
- Los ensayos marcados con (\*) están fuera del alcance de acreditación del SAE.
- Los ensayos son realizados en peso seco.
- La columna: Valor limite permisible, está fuera del alcance de acreditación del SAE.

**AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:**

**NOTAS:**

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTIA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.
- Cuando se emitan criterios de conformidad y aplique, se tendrá en cuenta el: Instructivo de Regla de decisión para una declaratoria de conformidad IE-AL-26.



### Anexo 3. Temperaturas diarias de cada tratamiento

Tratamiento	TEMPERATURA °C																	
	T0			T1			T2			T3			T4			T5		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1/2/2022	22,4	23,5	22,4	24,3	24,3	24,4	24,7	24,4	24,3	22,9	25,4	22,1	25,3	23,9	24,0	28,9	22,6	24,9
2/2/2022	25,8	23,5	22,4	25,1	24,8	22,0	22,2	24,5	22,6	22,1	24,9	22,8	23,3	23,9	22,8	28,2	26,2	24,5
3/2/2022	22,6	25,5	23,5	23,3	25,4	24,8	24,7	25,0	24,9	25,1	24,0	22,2	24,5	22,4	25,0	22,7	24,7	26,0
4/2/2022	23,8	24,0	23,4	22,5	22,5	25,3	23,9	23,0	23,8	24,8	22,9	23,5	25,0	22,8	22,9	22,1	22,2	27,1
5/2/2022	28,0	26,5	26,1	28,0	26,7	26,3	27,6	26,2	27,0	27,1	27,2	27,2	26,7	26,5	27,5	29,8	27,6	29,3
6/2/2022	27,2	26,5	26,6	26,2	27,4	26,5	26,4	26,7	26,6	27,5	26,1	26,9	26,4	27,7	28,0	26,5	26,9	27,3
7/2/2022	26,6	26,3	27,8	27,9	27,6	26,4	28,0	27,4	26,2	27,6	26,7	27,6	27,4	27,4	27,3	22,6	22,4	25,3
8/2/2022	27,8	27,5	27,6	26,4	26,8	27,7	30,9	30,2	28,1	29,1	29,0	28,3	28,3	29,6	28,4	26,1	24,2	29,1
9/2/2022	27,5	26,2	27,4	26,9	27,8	27,6	29,8	29,6	29,9	28,2	28,5	29,3	28,6	30,7	28,3	23,7	28,4	29,2
10/2/2022	27,4	27,3	26,5	26,1	27,8	27,7	29,3	30,7	28,6	29,4	28,8	28,5	28,9	28,1	29,5	25,6	23,3	26,0
11/2/2022	26,1	28,0	26,9	27,3	27,3	27,4	28,8	30,9	30,4	28,9	28,3	29,2	29,0	30,5	30,9	25,8	25,0	24,6
12/2/2022	27,8	26,8	26,4	26,4	26,8	26,7	29,8	29,4	28,9	33,6	34,6	33,6	29,3	28,8	30,4	23,0	24,6	26,0
13/2/2022	26,5	26,5	27,6	26,9	26,2	26,7	28,1	29,9	28,6	33,7	34,6	32,8	30,3	29,3	30,5	26,9	22,3	26,7
14/2/2022	28,0	26,6	26,3	27,6	26,4	27,5	31,0	28,6	28,5	34,3	37,9	33,2	29,9	30,7	28,6	26,4	23,8	26,3
15/2/2022	27,0	27,1	27,3	26,5	27,6	27,4	29,6	29,2	28,7	41,8	42,2	41,3	39,2	45,4	41,3	29,5	23,9	22,5
16/2/2022	25,6	25,9	25,5	25,5	25,3	25,9	28,4	27,2	26,2	39,3	39,0	40,6	35,2	38,8	37,5	23,1	20,8	22,9
17/2/2022	27,5	27,4	27,1	26,1	26,6	27,3	28,4	29,9	29,2	45,1	47,0	41,7	47,3	40,1	40,7	25,6	28,2	22,6
18/2/2022	27,0	26,9	27,8	26,6	26,1	27,7	29,5	29,0	28,7	43,0	42,1	42,0	39,6	47,8	44,4	42,9	44,5	44,7
19/2/2022	26,9	27,6	26,9	27,9	26,5	26,2	28,1	30,0	28,5	40,5	39,1	41,4	39,4	45,9	45,8	42,2	42,4	44,5
20/2/2022	26,8	27,3	27,1	27,4	27,8	26,4	30,3	29,8	28,5	45,1	43,7	43,4	44,7	45,8	42,7	42,1	44,2	42,2
21/2/2022	27,7	26,7	27,2	26,2	26,3	26,0	29,4	30,6	30,4	44,5	46,4	46,7	42,8	42,7	40,5	42,4	43,8	43,2
22/2/2022	27,2	27,4	27,6	27,8	26,5	26,4	30,8	28,2	30,4	45,2	45,8	42,3	47,6	42,2	42,4	43,9	44,2	42,2
23/2/2022	24,2	25,9	22,7	24,1	23,6	22,1	28,4	26,4	28,7	41,8	41,2	40,1	39,6	40,2	39,4	40,4	39,7	39,7
24/2/2022	26,6	26,4	27,3	27,7	26,8	26,5	28,4	29,7	28,5	44,9	42,2	46,3	46,1	43,4	41,8	45,4	43,1	45,0
25/2/2022	32,4	32,9	35,2	30,0	29,7	28,6	29,0	30,2	30,5	53,9	52,0	55,8	39,8	47,1	45,0	42,5	45,0	43,5
26/2/2022	34,9	30,4	33,4	34,8	29,8	35,3	46,1	41,3	43,4	57,8	55,0	56,2	46,8	39,5	46,9	44,2	44,2	43,3
27/2/2022	29,4	35,3	29,4	31,4	28,3	31,5	40,1	41,8	47,2	57,1	55,7	53,9	46,0	42,7	42,8	46,0	42,3	45,1
28/2/2022	32,5	29,4	28,0	32,8	32,9	29,3	39,4	41,9	43,1	56,4	55,1	56,4	39,4	46,9	47,0	46,0	45,8	45,9
1/3/2022	35,1	35,1	32,7	32,3	35,1	28,5	47,7	44,7	46,2	55,4	54,3	56,9	43,8	42,2	46,2	45,1	45,0	43,9
2/3/2022	30,1	32,6	32,7	31,2	28,3	29,9	41,9	40,1	42,8	54,9	52,7	53,8	41,0	39,6	40,2	40,4	41,4	39,2
3/3/2022	33,1	32,8	28,1	29,4	36,0	34,7	46,9	47,6	45,4	51,9	52,4	49,2	43,9	44,7	41,0	44,3	42,9	46,0
4/3/2022	34,2	30,8	30,4	35,8	29,7	30,1	48,4	47,0	40,6	51,0	50,3	49,0	44,5	42,0	42,3	45,8	45,0	45,5
5/3/2022	33,3	31,6	33,0	29,5	29,1	34,6	47,3	43,8	47,8	53,9	52,4	53,8	41,6	39,6	40,7	45,9	46,0	43,2
6/3/2022	32,6	30,8	34,7	35,0	28,0	30,2	43,1	42,3	44,8	53,5	54,8	54,9	44,8	42,2	45,0	47,1	47,1	47,9
7/3/2022	29,2	34,7	30,8	28,7	30,5	32,2	40,9	43,5	41,0	54,8	54,4	53,6	41,2	41,0	39,2	47,6	47,0	48,0
8/3/2022	34,6	31,7	28,3	34,0	30,9	35,0	50,8	49,2	53,2	54,7	53,9	54,3	47,9	45,4	41,5	46,6	46,3	46,3
9/3/2022	30,2	31,4	29,9	29,7	28,3	32,5	45,8	44,2	43,2	51,3	50,1	50,3	41,4	44,7	40,8	42,9	43,0	42,4
10/3/2022	30,2	35,1	28,9	29,6	35,1	32,0	53,8	51,4	51,3	49,5	50,7	53,1	44,6	47,5	40,4	47,4	47,2	47,7
11/3/2022	30,0	32,1	30,4	34,8	30,9	30,1	52,1	52,2	50,0	50,9	49,5	50,4	41,5	42,9	44,8	46,1	46,1	47,7
12/3/2022	31,8	35,8	29,9	31,7	35,0	28,1	49,5	51,7	52,6	51,7	52,4	49,9	42,9	45,9	46,5	46,2	46,6	47,6

### Anexo 3. Temperaturas diarias de cada tratamiento (continuación).

Tratamiento	TEMPERATURA °C																	
	T0			T1			T2			T3			T4			T5		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P4	P5	P6
13/3/2022	38,7	39,4	40,0	37,9	39,0	39,9	48,1	54,5	54,2	51,2	48,7	54,7	42,2	46,3	43,2	47,4	47,3	46,7
14/3/2022	38,3	36,4	39,3	37,8	37,1	36,1	52,2	52,6	53,2	49,9	50,9	48,8	40,4	39,0	39,4	46,5	47,0	46,1
15/3/2022	37,7	36,5	38,3	38,8	37,9	40,0	52,1	49,9	50,9	54,0	51,9	49,6	47,3	39,4	47,4	47,7	47,3	46,0
16/3/2022	36,0	32,3	35,8	35,6	34,9	37,7	48,9	49,3	46,4	47,8	48,7	48,9	41,7	41,8	40,1	43,4	44,3	41,8
17/3/2022	39,1	37,4	38,3	36,3	37,1	36,5	53,9	53,6	52,3	46,7	47,3	47,3	41,6	40,0	44,4	47,2	46,4	46,2
18/3/2022	39,2	38,2	36,1	38,4	38,1	37,8	54,3	56,0	57,3	48,1	47,3	48,1	42,7	39,3	45,5	48,0	47,7	47,8
19/3/2022	37,9	36,9	39,8	36,7	39,4	38,3	53,6	55,3	55,7	47,6	46,7	46,9	41,7	45,1	41,6	46,1	47,0	47,6
20/3/2022	39,6	37,4	38,0	37,5	39,5	37,2	55,1	53,4	56,2	46,2	48,9	46,7	47,5	39,6	47,3	47,5	46,2	46,3
21/3/2022	36,5	36,3	39,3	39,0	38,4	37,1	52,4	52,1	51,5	49,0	48,9	47,8	43,4	43,6	39,1	48,0	47,8	47,5
22/3/2022	36,5	38,0	38,6	38,9	38,1	39,6	48,7	48,7	52,1	46,5	48,4	49,0	40,3	43,2	41,6	47,0	46,9	46,7
23/3/2022	35,5	37,3	36,7	37,9	36,0	36,8	46,1	45,3	47,3	44,6	46,2	46,6	39,2	41,3	40,4	43,6	44,6	44,9
24/3/2022	38,9	38,1	37,3	36,4	37,0	39,4	51,6	51,2	52,2	46,1	47,8	46,9	45,4	41,3	40,4	47,3	46,8	47,0
25/3/2022	36,8	38,7	39,6	37,6	38,6	37,7	49,7	51,3	54,5	47,0	48,7	47,4	42,9	39,0	47,4	46,8	47,1	47,3
26/3/2022	36,7	39,4	36,7	39,7	36,3	39,0	55,3	55,8	49,8	46,4	46,8	48,8	44,8	40,6	42,1	46,6	47,5	47,5
27/3/2022	38,8	38,2	39,8	38,0	39,6	38,8	48,4	52,0	55,5	46,6	46,4	47,1	41,7	46,3	47,0	47,4	46,9	46,7
28/3/2022	37,5	39,3	39,1	38,2	39,0	36,7	49,0	49,4	55,1	47,6	48,9	47,5	44,6	42,4	47,5	47,6	47,4	46,6
29/3/2022	37,4	37,0	40,0	37,5	37,3	39,4	49,2	48,2	50,2	47,1	48,8	46,5	42,8	41,3	45,2	46,6	47,3	46,1
30/3/2022	39,4	36,0	37,5	38,0	37,8	37,8	45,0	45,3	48,5	45,9	46,0	44,3	40,1	41,3	47,1	43,6	45,6	43,7
31/3/2022	36,2	37,4	37,7	37,2	39,0	36,5	51,4	53,7	52,4	37,9	37,6	37,8	42,1	42,8	39,7	47,4	47,3	46,9
1/4/2022	36,4	38,6	38,3	36,6	36,3	38,9	53,0	53,8	54,1	41,3	40,1	39,6	45,5	44,8	43,4	47,7	47,5	47,5
2/4/2022	39,5	38,4	38,6	37,0	37,7	38,1	48,1	48,4	48,5	43,2	40,5	43,7	47,1	46,9	49,0	47,5	46,2	47,6
3/4/2022	38,6	36,1	36,5	37,5	39,7	37,7	48,4	47,1	46,0	36,5	39,3	37,7	48,5	47,3	48,9	47,1	46,1	46,3
4/4/2022	39,7	37,0	36,2	38,6	36,0	37,8	47,1	48,2	46,9	41,2	41,2	38,2	47,2	46,5	46,3	47,6	47,3	46,6
5/4/2022	38,6	38,0	37,7	38,6	37,1	38,0	48,4	48,7	48,4	43,3	36,2	36,7	48,4	46,5	46,2	46,1	46,5	47,4
6/4/2022	37,8	37,6	36,2	35,4	37,1	36,6	48,0	47,5	47,4	40,0	35,0	34,3	46,4	46,5	47,3	43,1	44,4	42,9
7/4/2022	37,5	38,0	38,6	38,4	36,9	39,8	48,9	47,0	46,4	40,9	39,3	40,2	48,2	47,6	47,0	47,4	46,6	47,5
8/4/2022	37,6	37,6	36,3	38,3	37,5	36,6	47,5	46,5	48,5	39,1	41,5	41,2	48,9	47,2	46,9	48,0	47,2	46,1
9/4/2022	36,5	39,2	39,0	38,2	39,2	37,6	46,9	48,2	46,2	37,0	37,3	42,0	48,9	47,0	48,7	47,4	47,7	47,1
10/4/2022	39,7	38,7	36,4	38,7	38,1	37,6	46,4	48,9	48,2	40,7	42,5	36,0	47,5	46,2	47,2	46,6	46,6	46,2
11/4/2022	40,0	38,3	39,3	36,6	37,4	38,9	48,4	46,9	47,2	41,9	40,7	38,8	46,3	46,3	46,9	47,9	46,4	46,6
12/4/2022	39,9	39,7	36,4	37,8	37,5	38,9	46,6	48,0	46,6	36,1	38,3	39,8	48,2	48,2	46,4	46,9	46,5	47,6
13/4/2022	42,7	42,7	44,2	42,4	42,4	45,3	47,8	48,9	46,9	42,1	42,0	40,1	47,7	46,1	46,2	47,2	46,5	47,9
14/4/2022	41,7	40,3	42,8	45,6	41,5	40,8	45,2	44,8	43,7	39,6	40,8	40,1	45,2	44,9	46,0	46,6	45,7	47,2
15/4/2022	40,0	43,2	43,2	41,7	42,2	43,1	46,6	46,8	48,8	31,4	32,8	31,0	48,6	47,0	47,1	47,3	46,5	47,9
16/4/2022	43,5	43,1	40,6	44,8	40,9	45,2	46,7	49,0	48,0	34,0	32,1	35,1	46,9	47,8	46,0	46,7	46,8	47,0
17/4/2022	44,2	41,3	41,4	44,5	45,0	46,0	43,7	43,8	41,2	34,8	30,7	30,6	39,6	36,1	36,1	46,5	47,7	47,0
18/4/2022	45,4	41,2	43,6	40,4	44,3	40,6	40,4	39,0	40,6	35,0	31,1	35,2	36,7	36,0	38,2	47,9	47,5	47,1
19/4/2022	42,4	40,9	45,6	42,5	43,6	45,5	43,0	39,7	39,3	32,0	33,7	31,3	37,0	38,8	36,1	46,4	46,5	47,1
20/4/2022	42,0	39,3	41,6	41,7	44,1	40,8	39,4	37,6	41,3	30,9	33,7	31,9	34,3	36,9	35,3	44,5	43,8	43,6
21/4/2022	43,9	41,0	45,6	42,0	40,1	41,8	37,3	41,9	41,4	31,7	31,7	34,9	37,3	42,1	38,5	46,6	47,7	46,8

**Anexo 3.** Temperaturas diarias de cada tratamiento (continuación).

Tratamiento	TEMPERATURA °C																	
	T0			T1			T2			T3			T4			T5		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P4	P5	P6
22/4/2022	45,1	43,3	41,4	41,4	41,3	41,4	42,0	36,8	42,1	32,3	33,5	32,4	36,4	43,2	42,8	47,6	46,1	47,7
23/4/2022	43,1	43,1	43,3	45,8	41,3	42,2	40,9	43,8	37,7	31,1	32,6	34,7	36,1	36,3	36,0	48,0	47,2	47,4
24/4/2022	41,3	40,2	41,8	44,0	42,5	41,3	43,9	42,0	41,0	26,9	25,2	26,7	40,9	37,3	42,9	44,1	44,3	45,0
25/4/2022	45,7	41,6	40,4	40,1	40,2	40,6	39,7	43,7	37,4	25,6	28,0	27,9	37,9	38,9	40,4	43,8	40,1	44,6
26/4/2022	47,5	49,9	48,5	49,2	46,8	49,7	37,3	36,5	37,0	25,0	26,9	28,0	39,2	39,2	41,1	43,5	43,9	41,7
27/4/2022	46,6	47,9	46,8	48,1	44,7	46,0	35,2	33,3	32,6	26,7	25,9	26,2	41,8	37,2	37,0	42,3	41,7	40,9
28/4/2022	47,6	48,1	49,3	48,9	47,3	49,5	41,2	38,4	43,1	27,3	26,0	26,4	37,3	37,4	37,4	40,1	44,8	44,9
29/4/2022	46,9	46,7	48,9	49,8	46,5	49,2	43,7	42,3	37,4	25,7	27,0	26,8	42,4	44,0	37,8	45,9	40,4	45,1
30/4/2022	49,9	49,0	46,7	49,0	50,0	49,8	39,5	39,9	36,3	27,8	26,1	27,2	36,6	40,7	42,7	43,9	40,1	44,4
1/5/2022	46,5	48,5	48,2	48,5	46,7	49,4	37,9	41,0	36,0	25,1	26,2	26,8	43,8	40,8	43,5	43,4	41,5	43,8
2/5/2022	47,7	48,4	46,1	49,1	46,4	49,8	35,1	30,9	34,9	27,6	27,0	27,7	37,2	38,9	40,9	41,8	44,4	41,6
3/5/2022	47,6	49,1	48,3	47,0	46,7	46,6	34,5	30,4	34,9	27,1	26,5	27,7	36,2	42,2	41,3	39,2	40,6	38,5

**Elaborado por:** Autor

#### Anexo 4. Temperatura diaria promedio de cada tratamiento

N°	TEMPERATURA °C					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
1	22,78	24,32	24,48	23,46	24,39	25,48
2	23,89	23,97	23,11	23,26	23,32	26,30
3	23,85	24,51	24,88	23,77	23,96	24,45
4	23,73	23,44	23,54	23,75	23,57	23,78
5	26,83	26,98	26,90	27,19	26,91	28,88
6	26,75	26,70	26,56	26,83	27,36	26,91
7	26,88	27,31	27,19	27,28	27,37	23,41
8	27,61	26,95	29,70	28,80	28,79	26,45
9	27,05	27,45	29,76	28,69	29,19	27,11
10	27,05	27,20	29,54	28,88	28,84	24,97
11	26,99	27,34	30,01	28,80	30,12	25,11
12	26,99	26,62	29,40	33,92	29,52	24,51
13	26,83	26,60	28,87	33,70	30,02	25,31
14	26,94	27,16	29,39	35,15	29,74	25,49
15	27,14	27,18	29,17	41,75	41,96	25,29
16	25,65	25,56	27,26	39,66	37,17	22,26
17	27,33	26,66	29,14	44,62	42,72	25,46
18	27,22	26,81	29,07	42,37	43,96	43,99
19	27,13	26,89	28,87	40,33	43,68	43,02
20	27,03	27,19	29,54	44,05	44,41	42,81
21	27,19	26,18	30,12	45,87	41,97	43,14
22	27,39	26,88	29,80	44,42	44,08	43,43
23	24,27	23,27	27,83	41,05	39,72	39,94
24	26,78	27,00	28,87	44,46	43,74	44,47
25	33,47	29,42	29,89	53,90	43,97	43,65
26	32,89	33,31	43,63	56,32	44,40	43,88
27	31,35	30,41	43,02	55,56	43,82	44,45
28	29,98	31,67	41,44	55,97	44,40	45,91
29	34,30	31,94	46,21	55,54	44,05	44,64
30	31,77	29,83	41,61	53,80	40,27	40,30
31	31,34	33,34	46,60	51,16	43,19	44,36
32	31,82	31,87	45,34	50,10	42,90	45,46
33	32,62	31,06	46,28	53,36	40,64	45,04
34	32,71	31,05	43,43	54,40	44,02	47,37
35	31,58	30,46	41,81	54,25	40,45	47,51
36	31,52	33,27	51,07	54,27	44,94	46,40
37	30,49	30,17	44,39	50,57	42,28	42,77
38	31,41	32,21	52,16	51,09	44,17	47,44
39	30,80	31,93	51,44	50,27	43,05	46,63
40	32,49	31,59	51,26	51,31	45,08	46,79
41	39,34	38,94	52,25	51,52	43,91	47,14

**Anexo 4.** Temperatura diaria promedio de cada tratamiento (continuación).

N°	TEMPERATURA °C					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
42	37,99	37,00	52,67	49,87	39,61	46,51
43	37,52	38,88	50,97	51,81	44,70	47,01
44	34,68	36,09	48,22	48,48	41,20	43,15
45	38,26	36,62	53,26	47,12	42,01	46,58
46	37,80	38,08	55,87	47,85	42,48	47,83
47	38,16	38,12	54,88	47,07	42,79	46,87
48	38,35	38,07	54,93	47,24	44,79	46,68
49	37,34	38,17	52,00	48,57	42,03	47,75
50	37,72	38,87	49,83	47,94	41,73	46,86
51	36,48	36,91	46,26	45,78	40,30	44,36
52	38,13	37,60	51,67	46,91	42,39	47,02
53	38,36	37,96	51,84	47,67	43,10	47,04
54	37,61	38,36	53,64	47,31	42,46	47,21
55	38,92	38,78	51,97	46,69	44,98	47,01
56	38,63	37,97	51,18	47,99	44,82	47,21
57	38,15	38,04	49,19	47,47	43,08	46,70
58	37,62	37,89	46,26	45,41	42,86	44,28
59	37,10	37,60	52,49	37,79	41,54	47,20
60	37,74	37,27	53,61	40,33	44,54	47,57
61	38,85	37,63	48,34	42,48	47,64	47,13
62	37,07	38,28	47,17	37,83	48,21	46,47
63	37,64	37,46	47,41	40,20	46,68	47,16
64	38,10	37,87	48,51	38,73	47,03	46,64
65	37,18	36,35	47,63	36,43	46,75	43,44
66	38,05	38,35	47,43	40,16	47,61	47,16
67	37,16	37,47	47,49	40,57	47,67	47,10
68	38,21	38,32	47,09	38,75	48,17	47,41
69	38,25	38,14	47,83	39,74	46,93	46,43
70	39,20	37,60	47,48	40,48	46,49	46,95
71	38,65	38,07	47,06	38,04	47,62	46,97
72	43,18	43,35	47,83	41,39	46,68	47,19
73	41,58	42,61	44,57	40,15	45,35	46,49
74	42,14	42,33	47,42	31,75	47,56	47,23
75	42,39	43,63	47,90	33,75	46,90	46,81
76	42,30	45,18	42,91	32,03	37,25	47,05
77	43,39	41,78	40,00	33,78	36,96	47,50
78	42,96	43,88	40,64	32,33	37,29	46,64
79	40,98	42,22	39,43	32,16	35,50	43,97
80	43,48	41,31	40,18	32,76	39,30	47,02
81	43,26	41,34	40,28	32,75	40,80	47,13
82	43,17	43,09	40,79	32,80	36,15	47,50

**Anexo 4.** Temperatura diaria promedio de cada tratamiento (continuación).

TEMPERATURA °C						
N°	T0	T1	T2	T3	T4	T5
83	41,10	42,61	42,30	26,23	40,35	44,47
84	42,59	40,29	40,27	27,15	39,07	42,83
85	48,63	48,58	36,96	26,62	39,82	43,03
86	47,09	46,28	33,67	26,28	38,64	41,63
87	48,34	48,54	40,88	26,55	37,36	43,28
88	47,48	48,52	41,11	26,51	41,40	43,81
89	48,55	49,60	38,56	27,02	39,99	42,78
90	47,72	48,19	38,28	26,01	42,67	42,89
91	47,42	48,43	33,63	27,43	38,96	42,58
92	48,32	46,77	33,26	27,11	39,90	39,43

**Elaborado por:** Autor

### Anexo 5. Humedad diaria de cada tratamiento

		HUMEDAD (%)																	
Tratamiento		T0			T1			T2			T3			T4			T5		
Punto de medición		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1/2/2022		58	55	57	51	56	52	60	54	54	54	53	52	56	53	58	50	56	53
2/2/2022		58	55	58	50	57	59	57	55	58	52	59	58	59	53	56	54	51	55
3/2/2022		57	59	54	50	59	52	53	56	57	57	58	55	55	52	58	54	55	56
4/2/2022		56	55	56	50	50	57	52	58	59	56	60	53	59	57	50	55	55	57
5/2/2022		60	56	55	53	55	54	60	52	52	58	53	57	60	56	58	58	56	50
6/2/2022		58	56	55	58	59	56	52	52	57	60	59	59	56	59	55	53	55	51
7/2/2022		60	56	58	51	59	50	60	54	59	54	51	59	58	53	52	56	50	55
8/2/2022		52	56	50	60	53	52	54	53	51	51	57	53	60	58	54	52	55	52
9/2/2022		60	59	51	54	57	54	50	54	60	55	50	50	51	60	50	50	51	58
10/2/2022		54	54	52	54	50	52	55	55	57	54	54	58	56	60	52	58	50	57
11/2/2022		50	56	51	60	56	50	51	55	50	58	57	55	60	56	54	54	58	58
12/2/2022		55	56	58	51	56	50	51	58	54	57	55	54	60	57	54	55	53	52
13/2/2022		59	53	59	51	58	56	56	54	60	52	57	56	52	57	54	54	50	57
14/2/2022		55	53	60	58	56	56	57	60	60	52	60	58	57	60	54	58	50	50
15/2/2022		59	58	57	58	52	55	50	55	50	56	57	55	49	49	49	54	50	56
16/2/2022		57	55	57	59	60	56	59	56	52	60	50	57	48	41	43	42	42	44
17/2/2022		56	58	58	56	52	52	60	59	55	60	60	56	49	44	41	44	42	42
18/2/2022		59	50	53	54	50	58	54	51	56	58	52	56	42	49	42	45	43	42
19/2/2022		60	56	56	55	50	56	56	58	60	58	53	51	44	50	48	42	45	43
20/2/2022		50	55	52	59	58	56	51	51	60	57	57	57	44	42	41	41	42	44
21/2/2022		56	58	54	60	50	59	54	56	55	50	52	56	46	41	50	42	40	43
22/2/2022		55	60	58	54	51	52	52	56	54	58	52	53	45	50	40	42	44	44
23/2/2022		58	60	53	60	52	52	58	58	58	55	51	57	41	40	44	43	41	41
24/2/2022		60	54	54	57	52	54	59	57	57	55	57	56	47	41	45	43	44	44
25/2/2022		56	60	52	55	60	54	60	53	60	56	59	58	47	42	50	43	41	41
26/2/2022		56	53	55	56	51	52	57	50	50	56	60	53	45	44	50	41	43	42
27/2/2022		54	60	56	56	60	50	59	52	51	58	56	51	47	50	43	41	45	44
28/2/2022		54	58	50	58	59	53	51	57	53	53	60	60	42	44	43	42	40	45
1/3/2022		55	54	57	57	55	52	54	55	55	52	56	55	47	50	42	40	44	43
2/3/2022		60	52	58	52	51	51	52	57	56	53	59	51	49	45	49	41	42	43
3/3/2022		53	57	57	50	52	60	50	52	50	50	50	55	47	43	45	44	45	41
4/3/2022		55	59	59	55	52	50	56	53	59	55	54	54	45	41	44	41	44	45
5/3/2022		53	50	55	55	60	52	51	59	55	55	52	50	45	42	42	40	40	41
6/3/2022		51	50	57	56	57	55	57	58	56	54	51	55	48	41	47	43	40	40
7/3/2022		50	51	59	57	55	55	53	57	52	51	55	55	43	45	46	40	43	44
8/3/2022		51	56	59	59	59	56	59	53	52	53	54	53	43	42	49	40	44	44
9/3/2022		52	51	55	54	55	58	50	53	56	50	52	55	40	43	46	40	45	42
10/3/2022		51	57	56	55	52	52	56	54	56	50	55	55	44	49	49	45	44	43
11/3/2022		55	53	52	58	56	60	52	60	58	54	53	50	42	48	49	42	42	42

**Anexo 5. Humedad diaria de cada tratamiento (continuación).**

		HUMEDAD (%)																	
Tratamiento		T0			T1			T2			T3			T4			T5		
Punto de medición		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P4	P5	P6
12/3/2022		55	52	51	52	60	59	53	51	59	55	51	53	40	41	47	40	41	41
13/3/2022		51	57	59	54	57	58	51	50	56	52	55	54	50	44	46	41	45	45
14/3/2022		54	57	51	52	56	59	50	60	53	52	51	55	42	47	42	42	43	43
15/3/2022		54	58	57	58	52	54	54	56	59	50	52	50	48	43	40	41	43	43
16/3/2022		55	59	52	55	55	52	51	52	52	55	53	50	42	44	44	40	44	41
17/3/2022		59	52	60	51	57	58	60	60	53	55	52	51	45	43	48	41	42	43
18/3/2022		53	59	50	53	57	58	55	55	55	55	53	55	40	46	47	42	44	44
19/3/2022		58	52	54	52	51	52	52	51	60	55	54	50	42	44	44	44	41	44
20/3/2022		53	58	57	58	57	55	56	56	50	53	54	53	40	43	50	44	41	45
21/3/2022		57	50	52	55	51	50	59	57	59	51	53	53	41	43	44	43	44	40
22/3/2022		51	53	59	60	57	56	60	56	52	54	51	53	44	42	47	41	45	43
23/3/2022		56	57	52	55	52	56	58	60	57	52	54	52	43	50	46	43	42	41
24/3/2022		57	58	59	56	53	54	54	57	51	53	54	50	40	47	41	43	44	44
25/3/2022		57	52	52	50	56	53	52	59	56	50	51	51	45	42	40	41	42	45
26/3/2022		51	58	53	53	58	56	57	57	56	54	54	53	41	44	44	41	44	44
27/3/2022		59	56	50	57	58	55	52	53	51	51	53	50	50	42	40	44	40	41
28/3/2022		58	57	54	55	55	51	58	52	55	52	54	53	42	45	50	40	40	42
29/3/2022		51	59	53	51	50	60	58	60	50	54	55	53	42	50	47	44	45	40
30/3/2022		52	52	51	56	52	58	55	54	53	50	52	54	44	40	50	45	40	42
31/3/2022		58	59	54	59	57	57	51	57	56	53	52	52	40	47	44	42	42	40
1/4/2022		55	57	59	55	57	56	60	52	60	51	55	55	48	42	42	41	45	40
2/4/2022		55	57	59	52	57	59	56	57	56	53	53	51	41	48	47	43	45	40
3/4/2022		60	56	59	53	58	54	57	50	52	54	54	53	40	43	49	43	42	42
4/4/2022		57	58	58	53	57	50	57	52	54	52	53	55	47	43	50	42	41	44
5/4/2022		58	59	52	52	59	54	57	55	56	54	51	52	46	49	49	44	40	41
6/4/2022		57	52	56	53	57	52	55	59	55	50	54	53	47	50	50	44	42	41
7/4/2022		55	58	57	54	51	53	52	51	50	53	51	51	42	50	48	44	41	43
8/4/2022		55	59	57	59	56	56	59	56	60	55	52	50	47	46	46	41	45	43
9/4/2022		59	52	56	51	54	56	56	51	51	54	53	55	49	45	45	44	40	45
10/4/2022		52	58	51	51	58	55	53	60	51	52	50	50	46	45	47	45	43	45
11/4/2022		60	60	59	58	60	57	59	54	54	53	53	54	44	46	47	43	45	44
12/4/2022		52	53	53	53	53	56	57	51	56	47	49	46	41	43	47	41	40	43
13/4/2022		51	50	53	55	52	60	55	52	60	50	45	48	47	41	40	40	43	45
14/4/2022		51	50	53	55	59	58	56	59	57	45	48	45	42	44	42	41	40	40
15/4/2022		54	51	50	53	55	60	58	53	50	50	48	49	43	43	46	40	44	41
16/4/2022		54	55	52	53	52	54	55	59	56	48	46	48	44	49	49	44	43	42
17/4/2022		54	53	52	54	54	52	50	51	52	50	46	48	42	43	43	41	42	44
18/4/2022		50	52	51	50	59	56	56	51	58	49	47	45	44	49	47	40	43	43
19/4/2022		51	53	50	52	53	57	51	51	53	45	48	49	40	44	48	45	44	41



**Anexo 5. Humedad diaria de cada tratamiento (continuación).**

		HUMEDAD (%)																	
Tratamiento		T0			T1			T2			T3			T4			T5		
Punto de medición		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P4	P5	P6
20/4/2022		50	54	55	51	58	51	59	60	54	47	50	50	46	50	49	45	45	43
21/4/2022		51	52	52	53	53	55	53	51	53	50	48	48	44	44	43	41	43	40
22/4/2022		55	50	51	51	58	51	60	53	57	46	45	48	48	42	50	40	44	43
23/4/2022		55	50	52	55	60	51	51	53	54	46	48	49	48	45	42	43	44	41
24/4/2022		54	55	51	53	60	59	52	59	53	47	45	47	43	41	42	42	43	44
25/4/2022		50	53	51	51	53	52	53	54	60	46	46	45	44	49	43	40	45	42
26/4/2022		54	54	54	50	50	54	46	45	47	47	49	47	48	46	44	44	42	40
27/4/2022		51	55	50	52	59	57	49	45	48	49	46	48	49	49	46	41	40	41
28/4/2022		50	52	52	53	50	59	48	49	47	49	48	47	50	47	43	44	43	43
29/4/2022		54	50	54	51	54	51	48	46	47	49	47	49	42	49	48	43	41	42
30/4/2022		50	54	54	51	53	58	48	46	48	46	45	48	45	47	44	45	43	41
1/5/2022		54	52	50	55	52	55	43	45	43	42	40	43	41	46	42	40	45	42
2/5/2022		51	55	52	52	57	52	42	40	41	40	40	39	43	44	41	45	44	40
3/5/2022		55	54	54	55	56	55	42	39	41	40	38	40	43	45	43	43	44	42

**Elaborado por: Autor**

## Anexo 6. Humedad promedio diaria de cada tratamiento

N°	HUMEDAD %					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
1	56,7	53,0	56,0	53,0	55,7	53,0
2	57,0	55,3	56,7	56,3	56,0	53,3
3	56,7	53,7	55,3	56,7	55,0	55,0
4	55,7	52,3	56,3	56,3	55,3	55,7
5	57,0	54,0	54,7	56,0	58,0	54,7
6	56,3	57,7	53,7	59,3	56,7	53,0
7	58,0	53,3	57,7	54,7	54,3	53,7
8	52,7	55,0	52,7	53,7	57,3	53,0
9	56,7	55,0	54,7	51,7	53,7	53,0
10	53,3	52,0	55,7	55,3	56,0	55,0
11	52,3	55,3	52,0	56,7	56,7	56,7
12	56,3	52,3	54,3	55,3	57,0	53,3
13	57,0	55,0	56,7	55,0	54,3	53,7
14	56,0	56,7	59,0	56,7	57,0	52,7
15	58,0	55,0	51,7	56,0	49,0	53,3
16	56,3	58,3	55,7	55,7	44,0	42,7
17	57,3	53,3	58,0	58,7	44,7	42,7
18	54,0	54,0	53,7	55,3	44,3	43,3
19	57,3	53,7	58,0	54,0	47,3	43,3
20	52,3	57,7	54,0	57,0	42,3	42,3
21	56,0	56,3	55,0	52,7	45,7	41,7
22	57,7	52,3	54,0	54,3	45,0	43,3
23	57,0	54,7	58,0	54,3	41,7	41,7
24	56,0	54,3	57,7	56,0	44,3	43,7
25	56,0	56,3	57,7	57,7	46,3	41,7
26	54,7	53,0	52,3	56,3	46,3	42,0
27	56,7	55,3	54,0	55,0	46,7	43,3
28	54,0	56,7	53,7	57,7	43,0	42,3
29	55,3	54,7	54,7	54,3	46,3	42,3
30	56,7	51,3	55,0	54,3	47,7	42,0
31	55,7	54,0	50,7	51,7	45,0	43,3
32	57,7	52,3	56,0	54,3	43,3	43,3
33	52,7	55,7	55,0	52,3	43,0	40,3
34	52,7	56,0	57,0	53,3	45,3	41,0
35	53,3	55,7	54,0	53,7	44,7	42,3
36	55,3	58,0	54,7	53,3	44,7	42,7
37	52,7	55,7	53,0	52,3	43,0	42,3
38	54,7	53,0	55,3	53,3	47,3	44,0
39	53,3	58,0	56,7	52,3	46,3	42,0
40	52,7	57,0	54,3	53,0	42,7	40,7
41	55,7	56,3	52,3	53,7	46,7	43,7

**Anexo 6. Humedad promedio diaria de cada tratamiento (continuación).**

N°	HUMEDAD %					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
42	54,0	55,7	54,3	52,7	43,7	42,7
43	56,3	54,7	56,3	50,7	43,7	42,3
44	55,3	54,0	51,7	52,7	43,3	41,7
45	57,0	55,3	57,7	52,7	45,3	42,0
46	54,0	56,0	55,0	54,3	44,3	43,3
47	54,7	51,7	54,3	53,0	43,3	43,0
48	56,0	56,7	54,0	53,3	44,3	43,3
49	53,0	52,0	58,3	52,3	42,7	42,3
50	54,3	57,7	56,0	52,7	44,3	43,0
51	55,0	54,3	58,3	52,7	46,3	42,0
52	58,0	54,3	54,0	52,3	42,7	43,7
53	53,7	53,0	55,7	50,7	42,3	42,7
54	54,0	55,7	56,7	53,7	43,0	43,0
55	55,0	56,7	52,0	51,3	44,0	41,7
56	56,3	53,7	55,0	53,0	45,7	40,7
57	54,3	53,7	56,0	54,0	46,3	43,0
58	51,7	55,3	54,0	52,0	44,7	42,3
59	57,0	57,7	54,7	52,3	43,7	41,3
60	57,0	56,0	57,3	53,7	44,0	42,0
61	57,0	56,0	56,3	52,3	45,3	42,7
62	58,3	55,0	53,0	53,7	44,0	42,3
63	57,7	53,3	54,3	53,3	46,7	42,3
64	56,3	55,0	56,0	52,3	48,0	41,7
65	55,0	54,0	56,3	52,3	49,0	42,3
66	56,7	52,7	51,0	51,7	46,7	42,7
67	57,0	57,0	58,3	52,3	46,3	43,0
68	55,7	53,7	52,7	54,0	46,3	43,0
69	53,7	54,7	54,7	50,7	46,0	44,3
70	59,7	58,3	55,7	53,3	45,7	44,0
71	52,7	54,0	54,7	47,3	43,7	41,3
72	51,3	55,7	55,7	47,7	42,7	42,7
73	51,3	57,3	57,3	46,0	42,7	40,3
74	51,7	56,0	53,7	49,0	44,0	41,7
75	53,7	53,0	56,7	47,3	47,3	43,0
76	53,0	53,3	51,0	48,0	42,7	42,3
77	51,0	55,0	55,0	47,0	46,7	42,0
78	51,3	54,0	51,7	47,3	44,0	43,3
79	53,0	53,3	57,7	49,0	48,3	44,3
80	51,7	53,7	52,3	48,7	43,7	41,3
81	52,0	53,3	56,7	46,3	46,7	42,3
82	52,3	55,3	52,7	47,7	45,0	42,7

**Anexo 6.** Humedad promedio diaria de cada tratamiento (continuación).

Nº	HUMEDAD %					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
83	53,3	57,3	54,7	46,3	42,0	43,0
84	51,3	52,0	55,7	45,7	45,3	42,3
85	54,0	51,3	46,0	47,7	46,0	42,0
86	52,0	56,0	47,3	47,7	48,0	40,7
87	51,3	54,0	48,0	48,0	46,7	43,3
88	52,7	52,0	47,0	48,3	46,3	42,0
89	52,7	54,0	47,3	46,3	45,3	43,0
90	52,0	54,0	43,7	41,7	43,0	42,3
91	52,7	53,7	41,0	39,7	42,7	43,0
92	54,3	55,3	40,7	39,3	43,7	43,0

**Elaborado por:** Autor

### Anexo 7. pH semanal de cada tratamiento

Tratamiento	pH																	
	T0			T1			T2			T3			T4			T5		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Semana	pH																	
<b>1</b> (1/2/2022 al 6/2/2022)	6,41	6,55	6,60	6,58	6,58	6,39	6,65	6,53	6,43	6,46	6,41	6,67	7,00	6,96	7,09	6,48	6,83	6,81
<b>2</b> (7/2/2022 al 12/2/2022)	6,66	6,55	6,42	6,47	6,45	6,40	6,46	6,30	6,46	6,48	6,54	6,41	7,49	7,44	7,50	7,56	7,48	7,49
<b>3</b> (14/2/2022 al 20/2/2022)	6,28	6,73	6,62	6,48	6,52	6,43	6,48	6,49	6,45	7,27	7,11	6,88	7,44	7,36	7,34	7,36	7,60	7,53
<b>4</b> (21/2/2022 al 27/2/2022)	6,45	6,45	6,39	6,62	6,54	6,60	6,35	6,46	6,17	7,32	7,75	7,37	7,31	7,53	7,46	7,49	7,43	7,47
<b>5</b> (28/2/2022 al 6/3/2022)	6,49	6,63	6,65	6,65	6,50	6,54	7,45	7,29	7,36	7,33	7,55	7,55	7,58	7,53	7,47	7,44	7,37	7,60
<b>6</b> (7/3/2022 al 13/3/2022)	6,27	6,40	6,72	6,34	6,59	6,52	7,56	7,40	7,50	7,42	7,73	7,57	7,49	7,49	7,43	7,35	7,45	7,58
<b>7</b> (14/3/2022 al 20/3/2022)	6,52	6,48	6,44	6,48	6,52	6,32	7,38	7,44	7,51	7,47	7,53	7,42	7,49	7,26	7,58	7,44	7,46	7,64
<b>8</b> (21/3/2022 al 27/3/2022)	6,48	6,34	6,59	6,35	6,49	6,57	7,36	7,39	7,71	7,48	7,31	7,39	7,37	7,46	7,60	7,45	7,62	7,30
<b>9</b> (28/3/2022 al 3/4/2022)	6,30	6,54	6,48	6,41	6,53	6,30	7,46	7,49	7,58	7,41	7,41	7,50	7,49	7,68	7,25	7,57	7,49	7,31

**Anexo 7. pH semanal de cada tratamiento (continuación).**

Tratamiento	pH																	
	T0			T1			T2			T3			T4			T5		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Semana	pH																	
<b>10</b> (4/4/2022 al 10/4/2022)	6,64	6,62	6,63	6,64	6,50	6,47	7,65	7,56	7,56	7,41	7,53	7,53	7,53	7,47	7,57	7,60	7,47	7,66
<b>11</b> (11/4/2022 al 17/4/2022)	6,55	6,58	6,47	6,43	6,64	6,65	7,63	7,29	7,50	7,55	7,62	7,49	7,59	7,65	7,49	7,42	7,40	7,50
<b>12</b> (18/4/2022 al 24/4/2022)	6,44	6,54	6,48	6,70	6,62	6,55	7,36	7,50	7,38	7,66	7,54	7,44	7,59	7,41	7,33	7,49	7,51	7,46
<b>13</b> (25/4/2022 al 3/5/2022)	6,63	6,50	6,34	6,49	6,52	6,49	7,41	7,35	7,59	7,57	7,63	7,56	7,48	7,53	7,41	7,52	7,41	7,51

**Elaborado por: Autor**

**Anexo 8.** pH semanal promedio de cada tratamiento

N°	pH					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
1	6,52	6,52	6,59	6,51	7,02	6,71
2	6,54	6,44	6,41	6,48	7,48	7,51
3	6,54	6,47	6,47	7,08	7,38	7,5
4	6,43	6,59	6,33	7,48	7,43	7,46
5	6,59	6,56	7,37	7,47	7,53	7,47
6	6,47	6,48	7,49	7,57	7,47	7,46
7	6,48	6,44	7,44	7,47	7,44	7,51
8	6,47	6,47	7,49	7,39	7,47	7,46
9	6,44	6,41	7,51	7,44	7,47	7,46
10	6,63	6,54	7,59	7,49	7,52	7,58
11	6,53	6,57	7,47	7,55	7,58	7,44
12	6,49	6,62	7,41	7,55	7,45	7,48
13	6,49	6,50	7,45	7,58	7,47	7,48

**Elaborado por:** Autor

## **Anexo 9.** Metodología para la elaboración de compost a partir de lodos residuales

<b>INTRUCTIVO DE TRABAJO</b>	<b>Código</b>	
	<b>Fecha</b>	
	<b>Revisión</b>	
<b>ELABORACIÓN DE COMPOST A PARTIR DE LODOS RESIDUALES ACTIVADOS</b>	<b>Página</b>	

### **Objetivo y alcance**

Establecer el método para la elaboración de compost a partir de lodos residuales activados provenientes de PTAR de empresas de alimentos.

### **Materiales y Equipos**

<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Lodo residual	Volqueta
Aserrín	Bobcat
Cal	Volteadora
Sacos de polipropileno	Palas
	Medidor portátil de temperatura, humedad y pH.

### **Procedimiento**

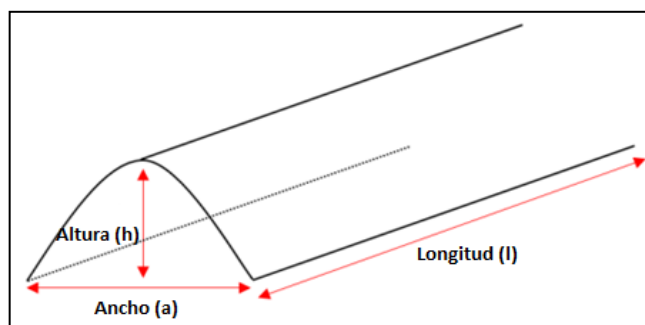
1. Caracterizar al lodo residual mediante un análisis CRETIB para determinar que no es un residuo peligroso.
2. Pesar 7000kg de lodo residual y 3000kg de aserrín.
3. Armar la pila de compostaje colocando en la parte inferior el lodo residual y encima el aserrín para después con la ayuda de una pala, mezclar el material, e irle dando la forma semejante a un paralelepípedo, similar al que se visualiza en el gráfico, el mismo que debe tener las siguientes dimensiones:

$$h= 0,6m$$

$$a= 1,5m$$

$$l= 15,7m$$





4. Empezar a medir las variables desde el día uno de conformadas las pilas y registrarlas. Se deberá controlar: temperatura, humedad y pH; esto se debe realizar con un medidor portátil de suelos. A continuación, se muestra los parámetros de cada variable y la frecuencia de medición.

Variable	Rango	Frecuencia de medición
Temperatura	Mesofílica: <math><45^{\circ}\text{C}</math> Termófila: 40 – 65°C Enfriamiento: 40 – 45°C Maduración: <math><35^{\circ}\text{C}</math>	Diaria
Humedad	45 – 60%	Diaria
pH	4,5 – 8,5	Semanal

**Nota:** En el caso de que la temperatura en la fase termofílica llegase a superar los 70°C, es necesario aumentar la frecuencia de volteo, para oxigenar el material.

Si la humedad estuviera por debajo del límite inferior añadir agua a la pila y si es que estuviese sobre el límite superior, es necesario aumentar la frecuencia de volteo.

En el caso de tener pH ácidos, la cal ayudará a neutralizarlo, mientras que si los pH son básicos se utiliza ácido cítrico para neutralizarlo.

5. Agregar cal a la pila de compost para evitar la proliferación de vectores, a los 7, 14 y 21 días desde que se inició el proceso de compostaje.
6. Voltear o mezclar la pila con la mezcladora cada semana a partir del día 15 de iniciado el proceso.

7. Transcurrido aproximadamente 90 días, se obtendrá el producto final, para verificar esto, el compost debe cumplir con los siguientes parámetros:

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
Color	Marrón oscuro
Olor	Tierra húmeda
Humedad	24 – 45%
Temperatura	25 – 35°C
pH	6,7 – 8,5
Materia orgánica	≥20%MS
Carbono orgánico total	≥10%
Nitrógeno total	1 - 3% MS
Relación C:N	≤25
Fósforo	1 - 3% MS
Potasio	1 - 3% MS

#### **Condiciones de seguridad**

- Gafas de protección
- Guantes de nitrilo
- Calzado con punta de acero

## Anexo 10. Análisis químico del compost obtenido



DEPARTAMENTO: ANALITICALAB

INFORME DE RESULTADOS No: Q-006-22

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	Santiago Toapaxi Mayorga	ATENCIÓN A:	Santiago Toapaxi Mayorga
DIRECCIÓN:	Chiquicha - Pelileo	TELÉFONO:	N.A.
TIPO DE MUESTRA:	Químico (Compost)	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	Dato no proporcionado por el cliente
CÓDIGO CLIENTE:	Dato no proporcionado por el cliente	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA RESPONSABLE:	09/05/2022 16:30 Santiago Toapaxi Mayorga

### INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A.	ANÁLISIS SOLICITADO:	Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	12/05/2022 14:30	FECHA DE ANÁLISIS:	12/05/2022 - 25/05/2022
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	25/05/2022	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-Q-006-22
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A.	COORDENADAS:	N.A.
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS   T máx.:25,0 °C. T mín.: 15,0 °C			

### RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Fósforo	mg/kg	10191,37	ICP	-
Potasio	mg/kg	10896,88	ICP	-
Nitrógeno Total Kjeldahl	%	1,3	Volumetría	-
Carbono Orgánico	%	15,2	Volumetría	-
Materia orgánica	mg/kg	294300	NEN 5754 2005	-

### OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.
- La columna: Valor Limite Permisible, está fuera del alcance de acreditación del SAE.

### AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:

  
Ing. Verónica Bravo  
DIRECTORA TÉCNICA

  
LABCESTTA  
TECNOLOGIA Y CALIDAD  
RUC:0691736210001

### NOTAS:

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTTA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.