



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**INFORME DE TRABAJO DE INTREGACIÓN CURRICULAR
PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

MECANISMO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA DE LODOS RESIDUALES
PROVENIENTES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM-MFL
MEDIANTE LA ADICIÓN DE COSUSTRATOS, BIOCATALIZADOR
Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS *BIOMERK® AR***

AUTORES:

ANDREA MONSERRATE ZAMBRANO CHÁVEZ

WILLY JHONAY ZAMBRANO MUÑOZ

TUTOR:

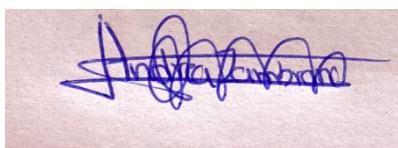
ING. CARLOS LUIS BANCHÓN BAJAÑA, M.Sc.

CALCETA, FEBRERO DE 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA


ANDREA MONSERRATE ZAMBRANO CHÁVEZ, con cédula de ciudadanía **131557097-6** y **WILLY JHONAY ZAMBRANO MUÑOZ**, con cédula de ciudadanía **230041896-5**, declaramos bajo juramento que el Trabajo de Integración Curricular titulado: **ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM-MFL MEDIANTE LA ADICIÓN DE COSUSTRATOS, BIOCATALIZADOR Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS BIOMERK® AR.** es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, concedemos a favor de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, conservando a nuestro favor todos los derechos patrimoniales de autor sobre la obra, en conformidad con el Artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación

Scanned with CamScanner

ANDREA M. ZAMBRANO CHÁVEZ

CC: 131557097-6

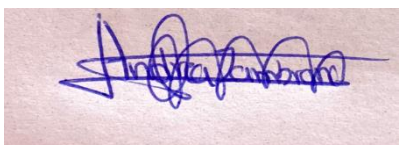
Scanned with CamScanner

WILLY J. ZAMBRANO MUÑOZ

CC: 230041896-5

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

ANDREA MONSERRATE ZAMBRANO CHÁVEZ, con cédula de ciudadanía **13157097-6** y **WILLY JHONAY ZAMBRANO MUÑOZ**, con cédula de ciudadanía **230041896-5**, autorizamos a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Integración Curricular titulado: **ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM-MFL MEDIANTE LA ADICIÓN DE COSUSTRATOS, BIOCATALIZADOR Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS BIOMERK® AR**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.



Scanned with CamScanner

ANDREA M. ZAMBRANO CHÁVEZ

CC: 131557097-6



Scanned with CamScanner

WILLY J. ZAMBRANO MUÑOZ

CC: 230041896-5

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

ING. CARLOS LUIS BANCHÓN BAJAÑA, M.Sc. certifica haber tutelado el Trabajo de Integración Curricular titulado: **ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM-MFL MEDIANTE LA ADICIÓN DE COSUSTRATOS, BIOCATALIZADOR Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS BIOMERK® AR**, que ha sido desarrollado por **ANDREA MONSERRATE ZAMBRANO CHÁVEZ** y **WILLY JHONAY ZAMBRANO MUÑOZ**, previo a la obtención del título de Ingeniera Ambiental, de acuerdo al **REGLAMENTO DE LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR DE CARRERAS DE GRADO** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

ING. CARLOS BANCHON BAJAÑA. M. Sc

CC: 0918059189

TUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del Tribunal correspondiente, declaramos que hemos APROBADO el Trabajo de Integración Curricular titulado: **ESTABILIZACIÓN DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM-MFL MEDIANTE LA ADICIÓN DE COSUSTRATOS, BIOCATALIZADOR Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS BIOMERK® AR**, que ha sido desarrollado por **ANDREA MONSERRATE ZAMBRANO CHÁVEZ Y WILLY JHONAY ZAMBRANO MUÑOZ**, previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental, de acuerdo al **REGLAMENTO DE LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR DE CARRERAS DE GRADO** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

MG. JOSÉ MIGUEL GILER MOLINA
CC:1310656762
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ING. JOFFRE ANDRADE CANDELL
CC:1311651390

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

MG. ADRIANA VERGARA AUQUILLA
CC:1714516307

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que me dio la oportunidad de crecer como ser humano a través de una educación superior de calidad.

A Dios por concederme el don de la vida y de la inteligencia, por darme la capacidad de encarar las adversidades y dificultades que se presentaban, demostrándome que con esfuerzo y dedicación los sueños se pueden cumplir.

A mi familia, especialmente a mis padres que me han brindado su apoyo incondicional y por cada esfuerzo que han hecho para que pueda cumplir este logro

A mis estimados maestros por todos los conocimientos y sabiduría que han invertido en mí, de manera especial a nuestro tutor el Ing. Carlos Banchón, quien con mucha paciencia, entrega y exigencia ha sido de gran apoyo en la realización de este proyecto, un agradecimiento especial para cada uno de los miembros que conforman el tribunal quienes con su sabiduría y paciencia contribuyeron decididamente en la realización exitosa de esta investigación.

ANDREA M. ZAMBRANO CHÁVEZ

AGRADECIMIENTO

Agradecidos con Dios por habernos permitido emprender este hermoso viaje y acompañado en los momentos más difíciles y gratos de esta trayectoria académica.

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que nos dio la oportunidad de crecer como seres humanos a través de una educación superior de calidad, lo cual se ve reflejado en este presente trabajo de investigación que contribuirá de manera contundente al desarrollo productivo, sustentable y sostenible de nuestra nación.

Al excelente personal de Docentes que representan la hermosa Politécnica que, con su gran labor compartieron sus valiosos conocimientos y a su vez incentivaron a formarme como un verdadero profesional, inculcándome todos los días buenos valores y aportando con sus mejores enseñanzas dentro y fuera del aula.

Al **Ing. Carlos Luis Banchón Ms.C.** por aceptar ser nuestro tutor y ayudar en el desarrollo del presente tema de investigación, por brindar su tiempo aportando sus modernos e indispensables conocimientos sobre ciencia. Gran admiración a la vocación que día a día ejerce en cada clase motivando al estudiantado a construir un nuevo mundo.

WILLY J. ZAMBRANO MUÑOZ

DEDICATORIA

A Dios y a mi familia, en especial a mis padres María Auxiliadora Chávez Párraga y Frowen Ever Zambrano Vera, quienes con su ejemplo dedicación, entrega y amor han estado para ayudarme y brindarme su apoyo en todo lo que he querido, han sido las persona que siempre creyeron en mí desde un principio.

A mi abuela Piedad Esperanza Párraga Peñarrieta, por estar siempre para mí como una segunda madre, por cada día estar para mí dándome todo su apoyo y amor.

A mis compañeros y docentes de esta distinguida universidad por tan linda amistad que conformamos en toda la carrera, por los buenos momentos que compartimos en el proceso de mi formación como una profesional.

ANDREA M. ZAMBRANO CHÁVEZ

DEDICATORIA

A:

Dios, por su infaltable presencia durante toda esta trayectoria, por los días nublados y días soleados.

Mi Madre NORMA MUÑOZ MUÑOZ por ser lo más valioso en mi vida y mi motivación a alcanzar el éxito. Por todo el cariño y esfuerzo brindado durante toda mi vida. Por sembrar en mí valores y principios de calidad que sin duda alguna me caracterizan y me ha posicionado donde estoy.

Mi Padre BOSCO ZAMBRANO ZAMBRANO por enseñarme, lo bueno y lo malo. Por ser mi guía y la voz de la experiencia que necesito para crecer en todo momento. Por representar a la familia desde su capacidad e inculcarnos a crecer como hijos de bien y formar nuestro propio criterio.

Mi hermano mayor Lider Zambrano Muñoz, que nos motivó con su carácter contundente a estudiar y a la vez, apoyó indispensablemente en este logro alcanzado.

Mis hermanos Jandry y Britney, pilares fundamentales en mi vida.

Mi abuelita Lidia Dolores (+), con quien me hubiera gustado compartir más tiempo en este mundo. Pero sabemos que desde el cielo nos cuida.

Mis abuelos maternos, cariñosamente Papito Pepe y Mami Zay.

Mis tíos, Diego, Oswaldo, Elita, Alirio, Emilio, Viry y Sandro. Gracias por el apoyo.

Mis amigos y amigas con quienes conocí, disfruté y compartí momentos inolvidables de la vida universitaria. En especial, aquellas personas que llegaron y me enseñaron lecciones inesperadas en mi mundo y espero volverlas a encontrar.

A ustedes, GRACIAS POR TODO.

WILLY J. ZAMBRANO MUÑOZ

CONTENIDO GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN	iii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
DEDICATORIA.....	ix
CONTENIDO GENERAL.....	x
CONTENIDO DE TABLAS, FIGURAS Y FÓRMULAS	xiii
RESUMEN	xv
PALABRAS CLAVES	xv
ABSTRACT	xvi
KEY WORDS	xvi
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4. HIPÓTESIS	4
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	5
2.1. LODOS RESIDUALES.....	5
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LODOS.....	5
2.2.1. pH.....	5
2.2.2. SÓLIDOS VOLÁTILES Y SÓLIDOS TOTALES.....	6
2.2.3. TEMPERATURA.....	6
2.2.4. RELACIÓN CARBONO Y NITRÓGENO	7
2.2.5. HUMEDAD	8
2.3. CLASIFICACIÓN DE LODOS RESIDUALES.....	8
2.3.1. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE METALES PESADOS	8
2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA.....	9
2.3.3. LODO RESIDUAL PRIMARIO	10
2.3.4. LODO RESIDUAL SECUNDARIO.....	10

2.3.5. LODO RESIDUAL MIXTO	10
2.4. IMPACTOS AMBIENTALES EN HATOS PORCINOS	10
2.4.1. PRODUCCIÓN DE LODOS EN HATOS PORCINOS	11
2.5. ESTABILIZACIÓN DE LODOS	12
2.6. PROCESOS BIOLÓGICOS	13
2.6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS	13
2.6.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA	14
2.6.3. DIGESTIÓN AEROBIA	15
2.6.4. TRATAMIENTO QUÍMICO	17
2.7. FUENTES DE CARBONO	18
2.8. SACAROSA	18
2.9. MINERALES	19
2.10. BIOSÓLIDOS.....	19
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO	21
3.1. UBICACIÓN	21
3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO.....	21
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	21
3.3.1. MÉTODOS	22
3.3.2. TÉCNICAS	22
3.4. VARIABLES A MEDIR	23
3.4.1. VARIABLES INDEPENDIENTES	23
3.4.2. VARIABLES DEPENDIENTES.....	23
3.4.3. INDICADORES A MEDIR.....	23
3.5. MANEJO DEL EXPERIMENTO	24
3.5.1. FASE I: IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM MFL.....	24
3.5.2. FASE II: PROCESO DE ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA A TRAVÉS DE LOS INDICADORES DE RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO, SÓLIDOS VOLÁTILES Y TOTALES Y DETERMINACIÓN DE COLIFORME FECAL.	26
3.5.3. FASE III: DEFINICIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN EL EFECTO DE ESTABILIZACIÓN DEL LODO RESIDUAL.....	29
3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	30
3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	31
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34

4.1. FASE I: IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO DE ESTABILIZACIÓN.....	34
4.2. FASE II: ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA APLICANDO EL PROCESO BIOLÓGICO A TRAVÉS DE LOS INDICADORES A MEDIR. ..	35
4.3. FASE III: DEFINICIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN EL EFECTO DE ESTABILIZACIÓN DEL LODO RESIDUAL.....	43
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
5.4. CONCLUSIONES.....	55
5.5. RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58

CONTENIDO DE TABLAS, FIGURAS Y FÓRMULAS

TABLAS

Tabla 2.1. Concentración de metales y tasa de carga según la Regulación 503 de la EPA	9
Tabla 2.2. Límite de calidad microbiológica de lodos	9
Tabla 3.1. Métodos de análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos	26
Tabla 3.2. Parámetros de calidad para la estabilización de lodos	26
Tabla 3.3. Factores y niveles para la experimentación	31
Tabla 3.4. Matriz para la experimentación de 8 tratamientos. Combinación de factores con sus niveles de acuerdo con el Diseño Factorial 2 ³	31
Tabla 4.1. Unidades Formadoras de Colonia de Coliformes Fecales	39
Tabla 4.2. Resultados de análisis del laboratorio de relación C/N	40
Tabla 4.3. Prueba de Levene Temperatura	46
Tabla 4.4. Prueba de Levene pH	47
Tabla 4.5. Prueba de Levene SV/ST	48
Tabla 4.6. Análisis de Varianza Temperatura	49
Tabla 4.7. Análisis de Varianza pH	51
Tabla 4.8. Análisis de Varianza SV/ST	52

FIGURAS

Figura 2.1. Procesos de tratamiento de lodos residuales	13
Figura 3.1. Mapa de ubicación	21
Figura 4.1. Evolución temporal de la temperatura en cada tratamiento	34
Figura 4.2. Evolución temporal del pH en cada tratamiento	36
Figura 4.3. Evolución temporal de la relación SV/ST	38
Figura 4.4. Gráfico Q-Q Plot Temperatura	43
Figura 4.5 Gráfico Q-Q Plot pH	44
Figura 4.6. Gráfico Q-Q Plot SV/ST	45

FÓRMULAS

Ecuación 2.1. Reacción química de la digestión aerobia	16
Ecuación 3.1. Sólidos totales en sedimentos	27
Ecuación 3.2. Sólidos volátiles	28
Ecuación 3.3. Unidades formadoras de Colonias	29

RESUMEN

En los últimos años, la industria porcina en Ecuador ha experimentado un crecimiento significativo, lo que ha llevado a un aumento en la generación de residuos sólidos debido a los sistemas de producción y mantenimiento. Estos residuos han afectado considerablemente al suelo debido a su inadecuado manejo en la disposición final. Por lo tanto, en el presente estudio, se abordó el tratamiento de los lodos procedentes del Hato Porcino de la ESPAM MFL a través de un proceso de digestión anaerobia conocido como estabilización biológica. Las variables que se investigaron incluyeron los tipos de residuos utilizados (cáscaras de frutas y vegetales) como cosustratos, sacarosa (azúcar morena comercial) como biocatalizador y la incorporación de microorganismos anaerobios BIOMERK® AR. Se empleó un diseño experimental factorial 2^3 , que comprendía 8 tratamientos con 3 repeticiones cada uno. El tratamiento más efectivo en la estabilización biológica resultó ser el T4, que logró una reducción de la relación SV/ST del 40,1% en la quinta semana del proceso. Además, se llevaron a cabo monitoreos de diversos indicadores cada 72 horas. El pH varió en un rango de 5,56 a 7,21, mientras que la temperatura en los lodos se mantuvo entre 26 °C y 28 °C. También se realizó una cuantificación de Unidades Formadoras de Colonias UFC de coliformes fecales, que cumplió con los criterios establecidos por la EPA para clasificar los lodos como Clase B. La relación de C/N para el lodo inicial se situó en 0.528% y 9.297%, mientras que para el tratamiento T4 fue de 0,244% y 13,772%. Es importante destacar que esta investigación se sustentó en la metodología establecida por la EPA, conocida como la "503 Biosólidos Rule". Según esta normativa, se considera que el proceso de estabilización biológica ha sido efectivo si la relación de sólidos volátiles/totales alcanza una reducción mínima del 60%.

PALABRAS CLAVES

Hato porcino; residuos; cosustratos; estabilización; biocatalizador; microorganismos

ABSTRACT

In recent years, the pork industry in Ecuador has experienced significant growth, leading to an increase in the generation of solid waste due to production and maintenance systems. Inadequate waste management practices have significantly impacted the soil. Therefore, this study addresses the treatment of sludge from the ESPAM MFL Pig Farm through an anaerobic digestion process known as biological stabilization. The investigated variables included the types of waste used (fruit and vegetable peels) as co-substrates, sucrose (commercial brown sugar) as a biocatalyst, and the incorporation of anaerobic microorganisms BIOMERK® AR. A 2³ factorial experimental design was employed, consisting of 8 treatments with 3 replications each. The most effective treatment in biological stabilization was T4, which achieved a reduction in the SV/ST ratio of 40.1% in the fifth week of the process. Additionally, various indicators were monitored every 72 hours. The pH ranged from 5.56 to 7.21, while the temperature in the sludge remained between 26 °C and 28 °C. Quantification of fecal coliforms was also conducted, meeting EPA criteria for classifying the sludge as Class B. The C/N ratio for the initial sludge was 0.528% and 9.297%, whereas for treatment T4, it was 0.244% and 13.772%. Importantly, this research was based on the methodology established by the EPA, known as the "503 Biosolids Rule." According to this regulation, the biological stabilization process is considered effective if the volatile solids/total solids ratio achieves a minimum reduction of 60%.

KEY WORDS

Pig farm, Wastes, Co-substrates, Stabilization, Biocatalyst, Microorganisms.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A nivel mundial, la industria porcina se ha intensificado, y los países en desarrollo contribuyen con más del 60% a la producción mundial de carne, generando residuos altamente contaminantes (purines, lodos, babas, etc.), estos residuos, por la falta de cuidados y tratamientos adecuados, se han convertido en un gran problema ambiental, siendo predominante también la falta de concientización, conocimiento e investigación de alternativas que permitan reducir su efecto contaminante (Vela et ál., 2018; Rodríguez et ál., 2019).

Los principales residuos generados dentro de una Unidad de Producción Porcina (UPP) son las excretas, siendo por lo general el 90% heces y el 10 % de orina (Sánchez, 2020). En relación a lo anterior, se puede destacar que, en Ecuador, se produce un volumen aproximado de excretas de 15 l/día en una cerda en etapa reproductiva de 150 Kg, lo que contribuye a la contaminación ambiental (Valencia et ál., 2019; Mainsonnave, 2018).

Es importante mencionar que los hatos porcinos se caracterizan por ser productivos, no obstante, surge la preocupación por los residuos que se generan (España et ál., 2016), debido a que su disposición final generalmente se la hace de manera incorrecta, especialmente en terrenos abiertos, contaminando aguas superficiales, flora y fauna del lugar, acuíferos, suelo y la salud del hombre, sin ningún tipo de tratamiento y sin conocer las características de tipo biológico, físico y químico (Durán et ál., 2020).

Los residuos pueden ser heces, orina, agua desperdiciada por los bebederos y de higienización, residuos de ración, vellos, polvo y otros materiales que se generan del proceso de crianza, asimismo, el estiércol, el cual proviene de las heces de los animales y generalmente se presentan en forma pastosa o sólida. Estos desechos pueden presentar variaciones en su composición dependiendo del manejo que se lleve en el hato porcino (Durán et ál., 2020; Martínez et ál., 2020).

Es necesario resaltar que en Ecuador existen pocas investigaciones que estén enfocadas en el aprovechamiento de lodos generados por el sector porcino

(Sánchez et ál. 2020). El mismo que se presenta como un residuo problemático. Los lodos residuales poseen una alta concentración de sales, metales, nutrientes (sobre todo nitrógeno) y demás características contaminantes (España et ál. 2016). Por ello, es indispensable su estabilización posterior para evitar convertirse en un problema de contaminación ambiental y generador de molestias por olores.

La estabilización es un proceso químico y biológico en el cual las sustancias orgánicas son oxidadas a materia inorgánica y los organismos patógenos se eliminan, disminuyendo así, la generación de olores y vectores (Pulgarín y Wills, 2019; Vicari, 2012). Por tanto, es necesario promover investigaciones en reutilización de lodos residuales de hatos porcinos.

En relación con lo anterior, es importante mencionar que en el cantón Bolívar; cabecera cantonal Calceta, se encuentra ubicada la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López (ESPAM-MFL), la cual cuenta con un hato porcino que tiene tres galpones de cama profunda con 37 animales destinada para animales en crecimiento y gestación, los que producen una alta acumulación de lodos y la generación de malos olores.

En este contexto, es necesario plantear la siguiente pregunta: ¿De qué manera influirá la aplicación de cáscaras de frutas y vegetales, sacarosa y microorganismos anaerobios para la estabilización biológica de los lodos residuales provenientes del hato porcino de la ESPAM – MFL?

1.2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación busca coadyuvar al mejoramiento del manejo de lodos en el hato porcino de la ESPAM-MFL, aprovechando los residuos sólidos producidos de la misma actividad. Esto resulta ser de gran importancia a nivel nacional como local debido a su gran producción, alto consumo de carne y demanda de sus derivados. Sin embargo, esta actividad productiva genera considerables impactos hacia el ambiente implicando el uso de recursos naturales como el agua para su desarrollo y crecimiento.

En el aspecto ambiental, el hato porcino contribuirá de manera sostenible implementando nuevas prácticas de manejo de los residuos, aprovechando los insumos y recursos existentes del lugar para aportar exclusivamente al desarrollo de la producción porcina como tal. Además, se prevé disminuir los impactos generados de los residuos sólidos en la fase de disposición final en el suelo. Ya que la composición de estos puede alterar su calidad debido a su alta concentración de nutrientes, en específico fósforo y nitrógeno, microorganismos patógenos, compuestos como hormonas, esteroides e inclusive plaguicidas y herbicidas (Olan et ál. 2016).

Desde la parte social, se busca aportar al desarrollo de la actividad productiva de manera responsable, innovadora y sostenible que sirva de ejemplo para los demás centros de crianza porcina a nivel local y regional en grandes y pequeñas escalas, incentivando al personal que labora en el área de estudio para aprovechar los residuos sólidos y al mismo tiempo satisfacer las necesidades de empleo. Contribuyendo al Objetivo N°8 de los Objetivos del Desarrollo Sostenible estipulados en la Agenda 2030. que busca “Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos en América Latina y el Caribe”

En el contexto económico de acuerdo a los resultados obtenidos en la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua [ESPAC] (2021), la producción porcina representa cerca del 10% del sector pecuario con 104 586 cabezas de porcinos, siendo la provincia de Manabí la que cuenta con el mayor número de cabezas de porcinos a nivel nacional, significando un importante ingreso económico

en las familias. Por tal motivo, invertir y administrar a este sector productivo con buenas prácticas enfocadas al cuidado del ambiente y los recursos que generarán un impacto positivo en el mercado nacional e internacional se vuelve rentable tributando al objetivo N°3 de la Secretaría Nacional de Planificación [SENPLADES] (2021): “Fomentar la productividad y competitividad en los sectores agrícola, industrial, acuícola y pesquero, bajo el enfoque de la economía circular”.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de la adición cáscaras de frutas y vegetales como cosustratos, sacarosa como fuente de carbono y microorganismos anaerobios en la digestión de los lodos residuales provenientes del hato porcino de la ESPAM-MFL para su estabilización biológica.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un proceso biológico de estabilización mediante la adición de cáscaras de frutas y vegetales como cosustratos, sacarosa como fuente carbono y microorganismos anaerobios para la estabilización biológica del lodo residual.
- Analizar la estabilización del lodo residual aplicando el proceso biológico a través de los indicadores de relación de carbono y nitrógeno (C/N), sólidos volátiles y sólidos totales (SV/ST) y análisis de patógenos.
- Definir el mejor tratamiento mediante el análisis estadístico del efecto de estabilización biológica del lodo residual.

1.4. HIPÓTESIS

Ho: Al menos uno de los tratamientos influirá negativamente en la estabilización biológica del lodo residual.

Ha: Al menos uno de los tratamientos influirá positivamente en la transformación biológica del lodo residual.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. LODOS RESIDUALES

Los lodos provenientes de aguas residuales y de procesos industriales son considerados como residuos peligrosos, los cuales desde el campo ambiental requieren un tratamiento y manejo correcto para minimizar sus impactos en el ambiente (Araujo et ál., 2018).

Para Cárdenas y Molina (2022) los lodos son el resultado de la concentración de sólidos o la formación de nuevos sólidos suspendidos (lodos activados) en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Además, cada lodo posee características diferentes debido a la composición, origen e incluso el volumen debido al agua residual proveniente.

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LODOS

Machuca et ál. (2019) considera relevante la determinación de los parámetros físicos químicos de lodos ya que, a partir de la realización de ensayos y la aplicación de metodologías. Esta permite evaluar los resultados y compararlos con la normativa establecida por la EPA. En este contexto se considerarán los siguientes parámetros.

2.2.1. pH

Es la unidad de medida que indica la alcalinidad o acidez de una solución. Midiendo cuantitativamente los iones que se encuentran en una solución. La escala de pH contiene una serie de números que va del 0 al 14; siendo valores inferiores a 7 o cercanos al 0 indicador de acidez, mientras que un valor cercano al 14 o mayor que 7 indica basicidad. Y un valor de 7 denota neutralidad (Pacco et ál., 2018).

La medición del pH en materia orgánica, en este caso lodos, generalmente se realiza mediante un instrumento llamado potenciómetro. El mismo, permite medir la diferencia de potencial entre dos electrodos, uno sensible a los iones de hidrógeno y un electrodo de referencia (Machuca et ál., 2019).

De acuerdo con Khnajer et ál. (2020) los valores de pH de los lodos residuales generalmente presentarán un pH neutro, pues en su estudio demostraron que el pH obtenido en sus lodos fue de 7,56 que fue similar al valor encontrado en la región de Baraki en Argelia, sin embargo, al comparar los valores obtenidos (pH = 7,56, conductividad = 1691 ms/cm y sequedad = 23,58) con los lodos de regiones como Marrakech, Nador, Setif, y Orán en Argelia, Quebec en Canadá, demostraron que estos eran mayores.

2.2.2. SÓLIDOS VOLÁTILES Y SÓLIDOS TOTALES

Los sólidos volátiles disminuyen en la digestión anaerobia y así se obtiene un humus fertilizante y estabilizado (Sánchez, 2022). El mismo autor señala que, la relación de los SV/ST es un buen indicador de la fracción orgánica de los sólidos contenidos en los lodos y de su grado de digestión. La EPA US establece que una reducción de hasta un 38% de sólidos volátiles en referencia a sus sólidos totales es un indicador de una efectiva estabilización biológica.

Los valores de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles pueden variar notoriamente, pues según los valores obtenidos en el trabajo de Noriega et ál. (2019) los datos de los sólidos volátiles estuvieron en un intervalo de 10337 mg/kg/d en el caso de lodo primario y 7403 mg/kg/d en el caso del lodo secundario, por otro lado, en los resultados del trabajo mostrado por Apolo (2019) los valores de los SV oscilaron en los valores de 93127,7 mg/kg/d y los ST fueron de 110740,4 mg/kg/d.

2.2.3. TEMPERATURA

El proceso inicia por la temperatura ambiente, igualando ambos sistemas a la misma temperatura. Esta es una variable que se modifica conforme al desarrollo del proceso de estabilización de lodos debido al crecimiento de los microorganismos (Zhang y Cuelgue, 2019). Además, el mismo autor señala que debido al incremento de temperatura por encima de los 55°C se eliminan organismos patógenos y contaminantes de origen fecal que a su vez termina ejerciendo una relación directa con la magnitud de la materia orgánica.

Según Machuca et ál. (2019) señala que la temperatura incide en la actividad microbiana y la estructura del lodo. El mismo autor sostiene que la literatura científica sobre la temperatura desde una perspectiva microbiana ha demostrado

plenamente su efecto contundente sobre la estructura celular. Así mismo, Jiménez (2021) sugiere que, para las actividades biológicas y bacterianas, la temperatura óptima debe oscilar entre 20° a 35°C, si aumenta, la digestión aeróbica y nitrificación no continúan. Además, si las temperaturas se encuentran muy bajas, la digestión metanogénica se vuelve lenta haciendo que las bacterias autotróficas nitrificantes dejen de funcionar.

2.2.4. RELACIÓN CARBONO Y NITRÓGENO

Es un parámetro importante que puede proporcionar información sobre la eficiencia y la calidad del proceso de estabilización. La relación carbono y nitrógeno (C:N) se utiliza como indicador para evaluar si la cantidad de carbono disponible es adecuada para descomponer la materia orgánica en el lodo y si se está produciendo nitrógeno amoniacal (NH_4^+) en cantidades que podrían ser perjudiciales (Pulgarín, 2023).

La relación C:N en el lodo estabilizado por digestión anaerobia es un factor importante a considerar para un funcionamiento eficiente del proceso de digestión anaerobia (Amparo y Betancur, 2019). Además, Medina et ál. (2021) indican que el presente parámetro puede variar según las condiciones específicas del proceso y el tipo de material que se está tratando, pero generalmente se busca una relación C:N en el rango de 20:1 a 30:1.

Román et ál. (2015) en el Manual de Compostaje del Agricultor indican los rangos en diferentes situaciones de la relación de C/N.

- **Relación C:N óptima:** En general, se busca una relación C:N en el rango de 20:1 a 30:1 para la estabilización biológica eficiente de lodos residuales. Esto proporciona suficiente carbono para el crecimiento de microorganismos y la descomposición de la materia orgánica, mientras que evita la acumulación excesiva de nitrógeno amoniacal.
- **Carbono insuficiente (C<N):** Si la relación C:N es demasiado baja, es decir, hay menos carbono disponible en relación con el nitrógeno, podría haber una falta de carbono para mantener el crecimiento bacteriano y descomponer

eficientemente la materia orgánica. Esto podría resultar en un proceso de estabilización ineficiente.

- **Nitrógeno en exceso (C>N):** Si la relación C:N es demasiado alta, es decir, hay mucho más carbono que nitrógeno, puede haber una acumulación de nitrógeno amoniacal (NH₄⁺), lo que podría ser perjudicial para el proceso y requerir tratamiento adicional para eliminar el exceso de amonio.

La razón detrás de esta relación C:N es que las bacterias que realizan la digestión anaerobia requieren tanto carbono como nitrógeno para crecer y descomponer la materia orgánica presente en el lodo.

2.2.5. HUMEDAD

Según Cedeño y Pincay (2019) señalan a la humedad como uno de los parámetros determinantes más importantes de lodos de depuradora, su valoración permite evaluar si el material está en condiciones adecuadas para ser implementado en un sistema de compostaje. Estos valores facilitan el transporte de nutrientes y microorganismos, pero deben estar en el rango de 40% a 65% de humedad.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LODOS RESIDUALES

Según López et ál. (2018) la Agencia de Protección Ambiental por sus siglas en inglés [EPA], clasifica los lodos residuales en función de la concentración de metales pesados y microorganismos patógenos, considerando lo siguiente:

2.3.1. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE METALES PESADOS

El mismo autor asegura que la EPA (1993) en su reglamentación titulada Code of Federal Regulations (CFR) 40 parte 503 establece dos parámetros de clasificación:

- **Peligrosos:** Son aquellos que lodos que superan las concentraciones de contaminantes tóxicos según lo establecido por la EPA en la tabla 2.1.
- **No Peligrosos:** Se refiere a los lodos que son inferiores a las concentraciones de contaminantes tóxicos establecidos por la EPA, en específico los metales pesados.

Es importante destacar que los lodos no peligrosos pueden ser de buena calidad o mala calidad según su contenido de metales pesados, en su forma más rigurosa según la normativa propuesta por la EPA “Concentración del componente para una calidad excepcional”.

Tabla 2.1. Concentración de metales y tasa de carga según la Regulación 503 de la EPA

Elementos	Valores Límite (mg/kg materia Seca)	Tasa de carga acumulativa del elemento (kg/ha)	Concentración para una calidad excepcional (mg/kg)	Tasa de carga anual del elemento (kg/ha/año)
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cromo	-	-	-	-
Cobre	4300	1500	1500	75
Plomo	840	300	300	15
Mercurio	57	17	17	0.85
Molibdeno	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	100	100	5.0
Zinc	7500	2800	2800	140

Fuente: EPA (1993) citado por López et ál. (2018)

2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA

De acuerdo a los límites de calidad microbiológica estipulados por la EPA, un lodo de buena calidad se puede clasificar como Lodo Clase A y Lodo Clase B:

- **Lodo Clase A:** No contiene cantidades detectables de patógenos, cumplen con requisitos estrictos de reducción de atracción de vectores y bajo contenido de metales.
- **Lodo Clase B:** A pesar de que no reciben tratamientos, contienen niveles detectables de patógenos; estos están sujetos a restricciones de acceso público. Un plan de gestión de nutrientes garantizaría que los biosólidos sean aplicados a tierras de uso agrícola en cantidad y calidad apropiada.

Tabla 2.2. Límite de calidad microbiológica de lodos

Parámetro	Lodo clase A	Lodo clase B
Coliformes Fecales o Salmonella	<1000 NMP/g o UFC/g <3 NMP/4g	<2000000 NMP/g o UFC/g
Huevos de helminto	1 huevo viable/4g	

Fuente: EPA (1993) citado por López et ál. (2018)

2.3.3. LODO RESIDUAL PRIMARIO

Según Machuca et ál. (2019) es el lodo extraído del decantador primario. Se compone principalmente de arena, materia aceitosa y sólidos orgánicos e inorgánicos más grandes. Se caracteriza por ser un lodo que contiene una considerable materia orgánica, con una apariencia grisácea, pegajosa y generador de un olor desagradable. Estos lodos poseen un porcentaje aproximadamente a un 97% de humedad. Por lo que se requiere un tratamiento previo para reducir el contenido de agua y así mejorar la estabilización (Garibay, 2020).

2.3.4. LODO RESIDUAL SECUNDARIO

Son aquellos lodos subproductos del tratamiento secundario biológico, Se producen en un biorreactor y se separan del agua en un decantador secundario. Las aguas residuales son aireadas en tanques que contienen concentraciones de microorganismos activos capaces de degradar la materia orgánica en condiciones aeróbicas (Machuca et ál., 2019). Estos lodos contienen principalmente materia orgánica, presentando un color marrón con una apariencia floculante, un olor no tan significativo similar al olor de tierra mojada (Ayala, 2020).

2.3.5. LODO RESIDUAL MIXTO

Son lodos generados en la adición de compuestos químicos, para aportar a los procesos de sedimentación de los sólidos suspendidos como sales de hierro o aluminio y cal que aportan la rápida degradación de la materia orgánica y así mitigar los malos olores Machuca et ál., (2019). El presente lodo adquiere una característica de color café oscuro a negro y presenta una disminución de humedad desde un 80% hasta un 30% aproximadamente (Ayala, 2020).

2.4. IMPACTOS AMBIENTALES EN HATOS PORCINOS

De acuerdo con Sánchez (2020) de los muchos factores ambientales que afectan el crecimiento, desarrollo y productividad de los cerdos en espacios cerrados, es el microclima de las pocilgas ya que representa gran importancia, por lo que consta de una serie de parámetros claves, como: temperatura, humedad, movimiento, química del aire, polvo, microbios y gases nocivos en él. En la actualidad, la crianza de cerdos está cambiando la matriz de la tecnología industrial, incluso cambios

menores en los parámetros del microclima pueden implicar mayores pérdidas que muchas enfermedades infecciosas peligrosas (Herrandiz et ál., 2019).

El mantenimiento de las condiciones zoo-higiénicas es particularmente importante en las grandes granjas porcinas y granjas donde se concentra un gran número de animales y la producción de carne de cerdo se lleva a cabo utilizando tecnologías sofisticadas (Sánchez, 2020).

Con el desarrollo extensivo de la ganadería porcina, que se caracteriza por el predominio de explotaciones pequeñas y medianas, el sistema ecológico se ve perturbado durante poco tiempo y suele restablecerse rápidamente (Herrandiz et ál., 2019). Y, por el contrario, con el desarrollo intensivo, que se caracteriza por grandes explotaciones y complejos porcinos, el aire, el suelo y las aguas superficiales y subterráneas se contaminan al máximo. En las condiciones actuales, la mayoría de los países líderes en el ámbito de la cría de cerdos han optado por una vía de desarrollo intensivo (López, 2020).

2.4.1. PRODUCCIÓN DE LODOS EN HATOS PORCINOS

El estiércol de cerdo (lodos de depuradora, lodos de cerdo, estiércol) es un producto residual de los sistemas de cría de cerdos y ha llamado la atención de los investigadores durante mucho tiempo, tanto desde una perspectiva tecnológica y de gestión como un recurso fertilizante, y desde algunos aspectos ambientales (Valdez et ál., 2022). Este subproducto contiene alrededor del 90% de agua, y materia orgánica que se encuentra estructurada por carbohidratos complejos que consisten principalmente en carbono, hidrógeno (H) y Oxígeno (O) (Bertici et ál., 2022).

Los autores antes citados especifican que, en términos de tratamiento de efluentes orgánicos, la materia puede denominarse demanda biológica (DBO) / bioquímica de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (COT) o sólidos volátiles (SV). Cuando la materia orgánica es digerida, compuestos más simples como el agua (H₂O) y el carbono son liberados. En este sentido, el tamaño de la capacidad de tratamiento de los estanques de efluentes se basa en la tasa de carga de sólidos volátiles. Por otra parte, estos lodos también contienen macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y una gama de nutrientes menores y oligoelementos.

También cuentan con sales, las cuales ingresan a través del suministro del agua y alimento y también microorganismos, incluidos los patógenos.

El uso de lodos porcinos se ha considerado potencialmente peligroso para el medio ambiente si el lodo no se trata adecuadamente, pero esto también puede considerarse una parte positiva de este recurso (lodos porcinos) en las condiciones de una tecnología adecuada de tratamiento y gestión (aspectos físicos, químicos y biológicos) (Bertici et ál. 2022). Por tanto, Valdez et ál. (2022) enfatiza que, el uso de estiércol de cerdo después de la digestión se considera una opción mucho más respetuosa con el medio ambiente. Las tecnologías de digestión anaeróbica con la adición de diversos aditivos minerales son consideraciones recientes para mejorar la calidad del estiércol de cerdo con el fin de reducir su impacto en el medio ambiente.

2.5. ESTABILIZACIÓN DE LODOS

La estabilización de lodos se refiere a la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos para reducir o destruir patógenos, minimizar o eliminar el potencial de generación de malos olores, y reducir el material orgánico que produzca potencial atracción de vectores. La estabilización destruye una parte biodegradable de la materia orgánica de los lodos y evita su descomposición, reduciendo así la cantidad de sólidos secos en los lodos (Castillo et ál., 2020).

La estabilización química se lleva a cabo mediante la adición de álcalis para elevar el pH a valores por encima de 12. La estabilización biológica se lleva a cabo por medio de procesos aerobios y anaerobios sin llegar a la producción de metano. Se aplica digestión anaeróbica en un digestor en condiciones termófilas o mesófilas o también en condiciones aeróbicas en una instalación de tipo aero - tanque (estabilización aeróbica). El crecimiento de microorganismos en presencia de oxígeno disuelto elimina la mayor parte de la materia contaminante; a su vez, los protozoos crecen y se alimentan de estos organismos. El equilibrio resultante es el de un cultivo vivo en forma suspendida en el témpano de lodo activado. Este proceso es ideal para la eliminación de materia carbonosa y la nitrificación de las aguas residuales (Castillo et ál. 2020).

La estabilización de los sedimentos primarios y secundarios se logra mediante la descomposición de la parte orgánica en compuestos simples o productos que tienen un largo período de asimilación por el medio ambiente (Toasa, 2018). Posteriormente, se aplican procesos de espesamiento y deshidratación para mejorar la capacidad de retención de agua; esto puede realizarse con productos químicos o con tratamiento térmico (Figura 2.1).

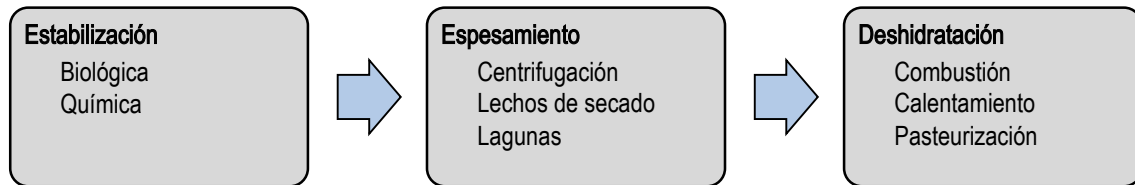


Figura 2.1. Procesos de tratamiento de lodos residuales

2.6. PROCESOS BIOLÓGICOS

Los microorganismos, como bacterias y hongos, utilizan la materia orgánica del lodo residual como fuente de energía y así producen diferentes compuestos como biogás, ácidos orgánicos y alcoholes. Los ácidos orgánicos son compuestos químicos que se producen durante la degradación anaerobia y que pueden incluir ácido acético, ácido propiónico y ácido butírico. Los alcoholes generados también pueden producirse durante la disfunción anaerobia y pueden incluir etanol y metanol (Valencia et ál., 2019).

2.6.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS BIOLÓGICOS

Reinoso et ál. (2020) expresan que los procesos biológicos en relación a las condiciones del medio se clasifican en aerobios y anaerobios, los cuales han evidenciado disminuir grandes cantidades de impurezas orgánicas. En relación a lo anterior, Ejarque et ál. (2019) manifiestan que aerobios, tal como lo dice su nombre significa en presencia de oxígeno; mientras que, todo lo contrario, sucede en los anaerobios, en donde se presenta un ambiente sin oxígeno.

En lo que corresponde a anaerobios, es uno de los primeros procesos para el tratamiento de lodos residuales, en donde se logra la degradación de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno; además, el autor sostiene que en este tipo de tratamiento se produce una combinación de gases catalogada como biogás, la cual

es empleada como combustible para generar energía eléctrica (Domínguez, 2021). A su vez, se logra obtener fangos de cantidades bajas de materia orgánica y la reducción de microorganismos patógenos (lodos estabilizados).

Díaz (2020) plantea que los procesos biológicos aerobios comprenden tratamientos de lodos activados (LA), biorreactores empacados (biomasa inmovilizada), sistemas de biorreactores de membrana (BRM) y reactores en lotes secuenciales (SBR), mientras que, los anaerobios vinculan los tratamientos de reactores de biomasa y filtros anaerobios.

Dentro de los procesos biológicos también se puede encontrar el facultativo, en el cual intervienen organismos que pueden funcionar en presencia o ausencia de oxígeno y contribuye a la degradación de materia disuelta, en este sentido, vale indicar que este proceso puede remover hasta el 50% de la carga contaminante, adquiriendo residuos de mejor calidad y que cumplen con los límites máximos permisibles determinados en la normativa ambiental (Menéndez y Dueñas, 2018).

2.6.2. DIGESTIÓN ANAEROBIA

Debido a que el lodo residual en sí posee niveles de concentraciones altamente contaminantes, por lo que se encuentra inmersos en las aguas residuales (Hanum et ál., 2019). En efecto, Cupe y Juscamaita (2018) aseguran que existen algunos métodos de tratamientos para estos lodos, entre ellos en el uso agrícola, el vertedero y la incineración, no obstante, cada una de dichas técnicas presenta problemas relacionados con la salud pública e impacto ambiental. El mismo autor indica que, la digestión anaerobia en la fase mesófila y termófila consta de cuatro procesos:

- **Hidrólisis:** degradación de moléculas orgánicas complejas como polisacáridos en monosacáridos; proteínas en aminoácidos; grasas en ácidos grasos.
- **Acidogénesis:** formación de ácidos orgánicos volátiles, amonio, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

- **Acetogénesis:** formación de ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.
- **Metanogénesis:** producción de metano, dióxido de carbono y agua.

Por su parte, Saldaña y Castillo (2022) afirman que la digestión anaeróbica es considerada como una tecnología económica y respetuosa con el ambiente utilizada en el tratamiento de los desechos orgánicos, entre ellos los lodos residuales. Además, los autores antes citados mencionan que, en ausencia de oxígeno, los residuos orgánicos se degradan biológicamente y se convierten en una forma de biogás y otros compuestos orgánicos ricos en energía como productos finales. Incluso, Karagiannidis y Perkoulidis (2009) citados por Cupe y Juscamaita (2018) aluden que, desde la introducción de diseños de plantas comerciales y piloto a principios de la década de 1990, la digestión anaeróbica empezó a ganar una importante atención mundial por parte de las empresas y sectores de gobierno.

Las propiedades de los lodos de depuradora se modifican durante la digestión anaeróbica, no solo se produce biogás como resultado, sino también varias consecuencias positivas para la gestión de lodos que sigue el proceso (Morales, 2020). La digestión anaeróbica mejora la estabilización de los lodos de depuradora, reduce patógenos, huevos de helmintos y la emisión de olores, y se reduce la materia seca de los lodos, lo que conduce a una reducción significativa del volumen final de lodo (Domínguez, 2021).

En términos del aspecto técnico, el funcionamiento incorrecto de la digestión anaeróbica conduce a un bajo rendimiento de biogás. Hanum et ál. (2019) mostraron en su estudio que, el aumento del contenido de grasa en los residuos sólidos municipales puede aumentar el rendimiento significativo de la producción de CH₄.

2.6.3. DIGESTIÓN AEROBIA

Según la ecuación 2.1., la reacción 1 describe el proceso bacteriano que ocurre en presencia de oxígeno. Las bacterias absorben rápidamente la materia orgánica y la convierten en dióxido de carbono, agua y una serie de compuestos orgánicos con un peso molecular más bajo. Para la reacción 2, los microorganismos experimentan

fase endógena cuando los sustratos disponibles en el lodo se agotan; un 80% del tejido microbiano celular se oxida aeróbicamente a CO_2 , H_2O y amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$). Por tanto, el pH del lodo disminuye a medida que el amonio se oxida a nitrato (Liu et ál., 2017).

Ecuación 2.1. Reacción química de la digestión aerobia

Materia orgánica + $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} +$ compuestos de bajo peso molecular

Células microbianas + $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{-N}$

La digestión aeróbica es un proceso en el tratamiento de aguas residuales diseñado para reducir la cantidad de lodos de depuradora y garantizar su idoneidad para su uso posterior. Más recientemente, se ha desarrollado tecnología que permite el tratamiento y reducción de otros residuos orgánicos, como alimentos, cartón y residuos de jardín (Demirbas et ál., 2017).

La digestión aeróbica se asemeja al proceso convencional de lodo activado, pero excluye una alimentación de aguas residuales y emplea tiempos de retención de sólidos más largos. Sin embargo, dado que en la digestión aeróbica no hay agua de alimentación que ingrese al sistema, y por lo tanto no hay un nuevo suministro de sustrato orgánico para sostener los microorganismos, comienzan a morir y son utilizados como alimento por otras bacterias (Domínguez, 2021).

Según Calvo et ál. (2019) la principal desventaja de la digestión aeróbica es que consume mucha energía: el proceso consume aire y genera dióxido de carbono en lugar de metano como principal producto final gaseoso, además, el lodo digerido no es tan fácilmente deshidratable mecánicamente, al igual que con digestión anaeróbica, la digestión aeróbica normalmente se diseña con un proceso de uno o varios tanques y el proceso de tanques múltiples proporciona una mayor eficiencia del proceso al reducir el tiempo de residencia de sólidos requeridos.

2.6.4. TRATAMIENTO QUÍMICO

La estabilización química de lodos se utiliza como un proceso temporal de tratamiento de lodos durante el período en que se realizan trabajos de reparación o prevención en estructuras destinadas al tipo principal de tratamiento, digestión anaeróbica o estabilización aeróbica (Saldaña y Castillo, 2022). La estabilización química casi siempre se realiza con hidróxido de calcio (cal); por lo tanto, la estabilización química es el proceso en el que el lodo se mezcla con cal para elevar el pH a más de 12 (López et ál., 2018). El alto pH y el aumento de la temperatura reducen patógenos (efecto de higienización) y reducen los olores ofensivos (al detener la fermentación).

En lo que respecta a los lodos líquidos, la estabilización de la cal se suele utilizar si existe un problema real de fermentación, o si los lodos líquidos se esparcen directamente en las tierras de cultivo, así como para ajustar el pH. De los reactivos existentes, la cal es la más utilizada debido a su bajo costo (Domínguez 2021). La eficacia de la cal depende de si se utiliza para tratar lodos líquidos o deshidratados. Agregar cal a un precipitado líquido aumenta su alcalinidad y pH, detiene temporalmente la fermentación ácida, acompañada de un mal olor. La cal se utiliza a menudo en la compactación de sedimentos, lo que mejora su filtrabilidad inicial (López y Herrera, 2018).

Para el autor antes citado, la cantidad de cal utilizada para estabilizar los sedimentos húmedos expresada en porcentaje es de aproximadamente el 10% de la masa de materia seca. La dosis específica puede variar dependiendo de la composición del lodo, el método de tratamiento, la temperatura y la duración de la compactación. Al mismo tiempo, después del tratamiento con cal, el precipitado sólido no se puede almacenar durante mucho tiempo, porque con el tiempo se destruyen las partículas de limo, se restaura la capacidad de fermentar y disminuye la amortiguación alcalina del medio. El tratamiento con cal de los sedimentos deshidratados tiene un efecto más duradero. Cuanto menor sea el contenido de agua en el sedimento, más resistente será al desarrollo de procesos de fermentación ácida.

2.7. FUENTES DE CARBONO

Desde hace algunas décadas atrás se ha podido lograr varios exitosos avances en el desarrollo de bioprocesos y la industrialización de microorganismos para lograr diferentes métodos de producción a partir de fuentes biológicas (Rosas, 2020). Según Mwafulirwa et ál. (2021) una de estas fuentes biológicas es la sacarosa, ya que es una fuente de carbono preferida por muchos microorganismos. También es importante resaltar que la sacarosa es una fuente de fácil acceso, proveniente de procesos de los productos generados en la agricultura, por ejemplo; remolacha azucarera, maíz o caña de azúcar.

Además, el mismo autor resalta que el crecimiento y la función biológica de los microorganismos, depende principalmente de actores de los procesos de bio-producción, requieren de una fuente de carbono.

La utilización de la sacarosa ha sido empleada en muchas investigaciones como fuente de energía para bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Tanya y Leiva, 2019), en microorganismos eficientes para favorecer la estructura física de los suelos, la degradación de materia orgánica para la obtención de enmiendas (Rincón et ál. 2019), como fuentes de carbono para bacterias que se desarrollan en condiciones de deficiencia de oxígeno en la estabilización de lodos Peñaherrera et ál. (2018) y muchas más aplicaciones en el campo de la ciencia.

2.8. SACAROSA

Según Reyes et ál. (2020) los carbohidratos, glúcidos o azúcares tienen como función primordial aportar energía a cualquier metabolismo de un organismo vivo. Esta se encuentra constituida por la unión de una molécula de glucosa y una de fructosa

Actualmente la Sacarosa se obtiene de la caña de azúcar o remolacha azucarera. Desde el punto de vista nutritivo, el único inconveniente que se le puede atribuir a la sacarosa es que, al tratarse de un producto químicamente puro solo aporta energía y no otros tipos de nutrientes (Zamora y Pérez, 2018).

2.9. MINERALES

Un mineral es una sustancia producida por un proceso de naturaleza inorgánica, es decir, que no son fabricados; estos, cuentan con una composición química característica y una estructura cristalina, que generalmente se presenta en formas o contornos geométricos, los minerales son sólidos, por lo tanto, se encuentran en maneras muy diversas en la naturaleza ya que pueden ser de un solo elemento como el azufre nativo, oro plata cobre o una combinación de varios (Santos et ál., 2018).

Los minerales han sido utilizados de distintas formas por el hombre desde hace miles de años, un ejemplo de ello son los fragmentos de roca con los que se hacían cuchillos, hachas y puntas para las lanzas, también piedras extrañas como el ágata y el granate, es importante recalcar que estos se dividen en clases según el anión o grupo aniónico predominante. Estas clases son: Elemento nativos, sulfuros y sulfosales, óxidos e hidróxidos, haluros, carbonatos, nitratos y boratos, fosfatos, arseniatos y vanadatos, sulfatos, cromatos, molibdatos y volframatos y silicatos (Agüero et ál., 2018).

2.10. BIOSÓLIDOS

Un biosólido es la materia orgánica que se recupera de un lodo residual proveniente de una PTAR, el cual es utilizado como fertilizante. El término biosólido está relacionado con el cumplimiento de las regulaciones ambientales Número 503, Título 40, de la EPA US (Environmental Protection Agency US). Estas normativas establecen que los biosólidos 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 a aprovechamiento, sobre todo en la parte agrícola.

En la depuración de estos biosólidos se pueden mencionar diversos tratamientos como la digestión aeróbica o anaeróbica, estabilización alcalina, entre otros (Manjarrés et ál., 2021; Noriega et ál., 2019).

- **Biosólidos clase A:** Se consideran clase A, los biosólidos que tengan una densidad de coliformes fecales menor a 1.000 número más probable (NMP)

por gramo de sólidos totales, o que tengan una densidad de *Samonella sp.* menor a 3 NMP en 4 g de sólidos totales, o que tengan un contenido de huevos de helmintos viable menor a 1 por 4 g de sólidos totales.

- **Biosólidos clase B:** Son aquellos biosólidos que contengan una densidad de coliformes fecales inferior a 1000000 NMP por gramo de sólidos totales en 7 muestras por 2 semanas. Este tipo de biosólidos deberá recibir tratamiento y será el que mayores restricciones presente para uso agrícola.

La EPA US plantea que los biosólidos son específicamente materiales orgánicos ricos en nutrientes, originados durante el tratamiento de aguas residuales, estos pueden ser empleados en diferentes usos beneficiosos, como por ejemplo en terrenos (agrícolas o alterados), con el propósito de abastecerlos de nutrientes y renovar la materia orgánica del mismo (Agencia de Protección Ambiental, 2000).

CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

La presente investigación se llevó a cabo en el Hato Porcino de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “Manuel Félix López” en el sitio “El Limón” del cantón Bolívar Provincia de Manabí con una latitud sur 591467.00 m E y una altitud de 9909143.00 m S.

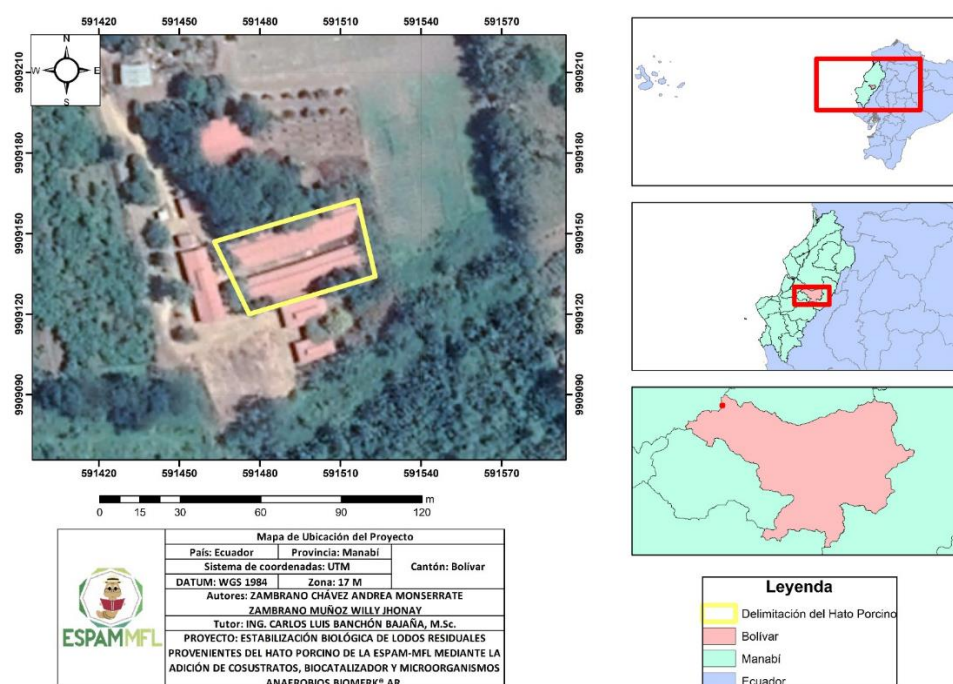


Figura 3.1. Mapa de ubicación

3.2. DURACIÓN DEL TRABAJO

La presente investigación se realizó en un período de 9 meses del 2023 a partir de la aprobación del Plan Analítico del Desarrollo del Trabajo de Integración Curricular.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

La presente investigación utilizó métodos de investigación experimental, bibliográfica, cuantitativa y cualitativa. Además, técnicas como la observación y entrevista. Navarro et ál. (2020) definen al método desde el punto de vista pedagógico como “un proceso lógico a través del cual se obtiene el conocimiento”. En el mismo contexto el autor citado menciona las técnicas son el “conjunto de

procedimientos o reglas, normas o protocolos que tiene como objetivo obtener un resultado determinado, ya sea en el campo de la ciencia, tecnología, arte u otra”.

3.3.1. MÉTODOS

Se tomaron en cuenta los siguientes métodos como parte de la investigación.

- **MÉTODO EXPERIMENTAL**

En la investigación experimental, el investigador manipula una o más variables de estudio para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto sobre el comportamiento observado. En otras palabras, un experimento cambia el valor de una variable (la variable independiente) y observa su efecto en (la variable dependiente). Esto se realiza bajo condiciones cuidadosamente controladas (Sampieri, 2014). Según el objetivo general del presente trabajo, el método experimental permitirá corroborar la idea a defender sobre el efecto de procesos biológicos con cosustratos y biocatalizadores.

- **BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA**

La búsqueda bibliográfica debe realizarse desde una perspectiva estructurada y profesional. Cuando comienza el proceso de búsqueda bibliográfica, normalmente uno está expuesto a material no relevante por lo que una investigación exhaustiva mejora la perspectiva y se comienza a identificar temas relevantes e interesantes (Gómez et ál., 2014).

3.3.2. TÉCNICAS

Para el desarrollo de la investigación se consideraron las siguientes técnicas.

- **OBSERVACIÓN**

La observación para Breda et ál. (2021) consiste en notar un hecho o fenómeno que el investigador observa. En la presente investigación, se observaron cambios físicos a ocurrir en los procesos y condiciones que se realizan en el Hato Porcino de la ESPAM-MFL.

- **ENTREVISTA**

Estas son de carácter flexible y abierta ya que permite mayor entendimiento del punto de vista interno al entrevistado. En la entrevista, mediante las preguntas y respuestas se puede lograr una construcción conjunta de significados respecto a la problemática (Sampieri, 2014); en este caso, se realizará al personal administrativo encargado del Hato Porcino.

3.4. VARIABLES A MEDIR

3.4.1. VARIABLES INDEPENDIENTES

- Cantidad en masa de cáscaras de frutas y vegetales.
- Dosificación de sacarosa – azúcar morena comercial.
- Concentración de microorganismos anaerobios comerciales.

3.4.2. VARIABLES DEPENDIENTES

- Estabilización de lodos

3.4.3. INDICADORES A MEDIR

- Relación de carbono y nitrógeno inicial y final
- Relación de sólidos volátiles / sólidos totales.
- Análisis en lodos inicial y final de microorganismos patógenos.
- Temperatura y pH (cada 3 días).

3.5. MANEJO DEL EXPERIMENTO

Para el desarrollo del experimento se consideraron los objetivos específicos, y en función de estos se desarrolló la investigación en 4 fases.

3.5.1. FASE I: IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS RESIDUALES DEL HATO PORCINO DE LA ESPAM MFL.

A continuación, se presentan las actividades que coadyuvaron en el proceso de estabilización de lodos residuales.

- **ACTIVIDAD 1. RECOLECCIÓN DE LODOS PROVENIENTES DEL HATO PORCINO.**

La recolección del lodo residual del hato porcino de la ESPAM-MFL se llevó a cabo, asistiendo a las instalaciones del hato. Los lodos fueron extraídos del pozo séptico a cielo abierto que dispone el hato porcino para depositar las aguas producto de la limpieza que se realiza a diario y que son trasladadas por medio de canales de concreto hacia el sitio de disposición final.

Con la ayuda de una pala los lodos se depositaron en recipientes de 5 litros para que pudieran sedimentarse, filtrarse y permitir la obtención del lodo en su máximo contenido, tal y como se describe en el proceso de (Peñaherrera et ál., 2018). Y posterior a esto, se colocó 500 gramos (g) de lodo en vasos plásticos para la continuidad de la investigación.

Se contempló añadir coagulantes y floculantes como el sulfato de aluminio, la poliacrilamida o el hidróxido de calcio, con el fin de aumentar el material de biosólidos. Situación que no fue necesaria realizar debido a que con éxito se pudo lograr la obtención del material de estudio sin ningún inconveniente. Además, López y Herrera (2018) contemplan utilizar una cantidad de cal expresada en porcentaje de 10% de masa de materia seca para estabilizar los lodos, lo cual se prescindió debido a que la digestión anaerobia funcionó en condiciones de acidez correspondiente al lodo inicial en la escala de 5.77 UpH.

- **ACTIVIDAD 2. ADICIÓN DE COSUSTRATOS, BIOCATALIZADOR Y MICROORGANISMOS ANAEROBIOS BIOMERK® AR.**

Luego de la obtención del lodo, se procedió a realizar la adición de cosustratos (previamente desinfectadas con agua caliente para evitar la presencia de microorganismos o patógenos) como cáscaras de fruta naranja (triturados con cuchillo) y vegetales como tomate y pimiento (licuados sin agua), que fueron obtenidos del mercado central del cantón Bolívar y otra parte de los residuos provinieron de las casas de los autores de la presente investigación. Posteriormente, fueron adicionados como aceleradores del proceso metabólico bacteriano para la estabilización del lodo (Langdon et ál., 2019; Muñoz et ál., 2022). La mezcla de lodo residual y cosustratos se estableció en una proporción másica 2:1, es decir, por cada 500 gramos de lodo residual, se adicionó 250 gramos de una combinación de cosustrato + microorganismos y sacarosa. Para el cosustrato, se agregaron combinaciones de residuos de cáscaras de naranjas y verduras como tomate y pimiento, el tipo de cosustrato y las dosis de sacarosa para cada tratamiento se establecieron según lo planificado en el diseño experimental (tabla 3.3). Y, por último, se presentaron las cantidades másicas respectivas de cada componente a cada tratamiento según lo establecido en el diseño experimental (tabla 3.4).

Además, se experimentó la adición de sacarosa como biocatalizador focalizado en el concepto de fuente de carbono; ya que, en el proceso de digestión un nutriente limitante es el carbono, debido a que, en las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis el carbono orgánico se convierte en CO₂, esto implica una reducción importante. La solución nutritiva fue de 5 g y 20 g, dosis baja y alta cada que fueron agregadas por el día y la noche cada 72 horas según los criterios de los autores Zhang et ál. (2021). Adaptados a la presente investigación.

Y, por último, en cuanto a la presente actividad se derivó la aplicación de microorganismos anaerobios comerciales, durante la experimentación en cada unidad experimental. En efecto, se utilizaron microorganismos anaerobios comerciales de la compañía de biotecnología BIOMERK AR Cápsula. Los

mismos que estuvieron dados en una cantidad de volumen de 25 ml y 50 ml inicial respecto al desarrollo del experimento y una dosis de frecuencia de aplicación de 2 ml/3 días.

3.5.2. FASE II: PROCESO DE ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA A TRAVÉS DE LOS INDICADORES DE RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO, SÓLIDOS VOLÁTILES Y TOTALES Y DETERMINACIÓN DE COLIFORME FECALES.

Se determinaron los parámetros de en campo de pH y temperatura, los sólidos volátiles, sólidos totales, su relación, y microorganismos patógenos fueron analizados en el laboratorio de agroindustria de la ESPAM MFL, mientras que la relación carbono y nitrógeno se analizó mediante servicios contratados de los laboratorios de la Universidad de las Américas (UDLA).

Tabla 3.1. Métodos de análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos

Parámetro	Análisis	Método
pH	Potenciometría	En campo
Temperatura	Termómetro	En campo
Coliformes fecales	Unidades formadoras de colonia	NTE INEN 1205-1
Sólidos totales	Gravimetría	Standart Methods 2540-1
Sólidos volátiles	Gravimetría	Standart Methods 2540-1
Relación C/N	Analizador elemental	ISO 10694 – ISO 13878 N503-EPA

- **ACTIVIDAD 3. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS.**

Según la tabla 3.1, en los 8 tratamientos que fueron evaluados durante 4 semanas, se caracterizaron propiedades fisicoquímicas como temperatura y pH con una periodicidad de cada 3 días, el contenido de sólidos volátiles y totales fueron evaluados cada 7 días (semana).

- **ACTIVIDAD 4. RELACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES SÓLIDOS TOTALES.**

Para la determinación de la relación de sólidos volátiles y totales de cada tratamiento se lo realizó bajo la metodología descrita por Cattani (2018). La

misma que se hizo en las instalaciones del laboratorio de la ESPAM-MFL, explicada de la siguiente manera:

Efectuado una vez por semana para calcular los sólidos totales (ST) presentes en el sedimento, para ello se emplearon 10 g de lodo. Luego, se sometió el presente material a un proceso de deshidratación en la estufa de laboratorio KALSTEIN, a una temperatura de 105 °C durante un período de 24 horas. Este cálculo se realizó con la fórmula siguiente:

Ecuación 3.1. Sólidos totales en sedimentos

$$\text{Sólidos Totales \%} = \frac{b-c}{a-c} \times 100 \quad [3.1]$$

Donde:

a = masa del lodo inicial + cápsula

b = masa del lodo seco + cápsula

c = masa de la cápsula

Para determinar el contenido de sólidos volátiles (SV) a través de la gravimetría, la cápsula que contenía el lodo seco en el procedimiento de cálculo de ST, se introdujo en una mufla (modelo Snol E5CN) y se sometió a una temperatura de 550 °C durante 3 horas, proceso de calcinación. Después de que la cápsula se enfrió por completo, se procedió a pesarla nuevamente en una balanza analítica de la marca Ohaus Adventurer AR3130. Finalmente, el contenido de SV expresado en porcentaje, se determinó mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 3.2. Sólidos volátiles

$$\text{Sólidos Volátiles \%} = \frac{a-b}{m} \times 100 \quad [3.2]$$

Donde:

a = masa del residuo + cápsula antes de la calcinación.

b = masa del residuo + cápsula después de la calcinación.

m = masa del lodo inicial colocada en la cápsula previo al secado a 105 °C.

Se tomó la normativa 503 “Biosolids Rule” de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos como referencia para el presente desarrollo investigativo. En la misma, se especifica que la reducción del contenido de sólidos volátiles y sólidos totales deben alcanzar una reducción mínima de 60% como resultado de la estabilización de lodos.

- **ACTIVIDAD 5. ANÁLISIS PATÓGENO DE COLIFORMES FECALES.**

Para este análisis se tomó como referencia única de estudio la cuantificación de coliformes fecales, la misma que se realizó en las instalaciones del laboratorio de la ESPAM-MFL, con un análisis para el lodo inicial y otro al mejor tratamiento de la investigación obtenido en función a la relación de SV/ST.

Con el fin de llevar a cabo el conteo de coliformes fecales, se emplearon las Placas 3M Petrifilm. Según las recomendaciones de uso, las placas están diseñadas por un medio modificado de violeta bilis el cual genera un medio gelificante que es soluble en agua fría, además contiene un indicador de tetrazolio que proporciona una mejor enumeración de las colonias de coliformes fecales.

Evidentemente fue necesario realizar una dilución a causa del color oscuro que presentaba el lodo. Se procedió a colocar 1ml de lodo residual doméstico en 9ml de agua destilada. Después, se procedió con la incubación, colocando 1ml de solución realizada en el centro de la placa 3M PETRIFILM. Una vez incubadas la placa se las ubicó en una cámara de incubación a 37 °C durante 48 horas, para finalmente, realizar el conteo de las colonias de coliformes fecales presentes en la placa. El resultado multiplicado por 10 debido a la dilución preparada.

En el mismo contexto, la guía de interpretación de placas Petrifilm para el conteo de Coliformes Fecales indica multiplicar el número de colonias por 20 para determinar las Unidades Formadoras de Colonia (UFC).

Ecuación 3.3. Unidades formadoras de Colonias

$$UFC = (\#unidades \times 20) \times 10 \quad [3.3]$$

Donde:

UFC= Unidades Formadoras de Colonias.

#unidades= Unidades contadas en la placa de petrifilm.

20= número de centímetros cuadrados en la placa de petrifilm.

10= valor de la dilución preparada.

ACTIVIDAD 6. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN CARBONO Y NITRÓGENO.

Para la determinación de la relación de carbono y nitrógeno se contrató los servicios del Laboratorio de Química General de la Universidad de las Américas (UDLA) en la ciudad de Quito. Se realizó el procedimiento muestral indicado por los requisitos estipulados por la entidad contratada tanto para el Lodo Residual Inicial Sin Tratar (MI1) como para el Lodo Residual del Tratamiento 4 (MT4).

Se colectó 10 gramos para cada muestra analizada, las mismas que fueron colocadas en fundas herméticamente selladas para evitar su contaminación y congeladas durante 24 horas.

Luego, las muestras congeladas, debidamente etiquetadas, fueron transportadas en una hielera al Laboratorio de Química General de la UDLA, donde se entregaron para su posterior análisis. Los resultados de los análisis se recibieron a través de correo electrónico nueve días laborales después de haber sido entregadas en el laboratorio.

3.5.3. FASE III: DEFINICIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO MEDIANTE EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN EL EFECTO DE ESTABILIZACIÓN DEL LODO RESIDUAL.

En la siguiente fase del trabajo experimental, se definió el mejor tratamiento obtenido mediante el análisis estadístico ANOVA para evidenciar el efecto del proceso de estabilización de lodos residuales. Para esto se procedió a realizar

la comprobación de los supuestos del ANOVA, adaptado para el diseño escogido.

- **ACTIVIDAD 7. SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO MEDIANTE EL ANOVA REALIZADO.**

Con el análisis de varianza se pudo evidenciar cuáles de los tratamientos actuaron de manera efectiva sobre la variable de respuesta. Para la comprobación del supuesto de normalidad se realizó mediante el análisis del gráfico de normalidad Q-Q Plot, el mismo que compara los cuantiles de los datos con los cuantiles de una distribución teórica (Statology, 2021). Así mismo, se comprobó si el coeficiente de correlación lineal (R valor) que arroja el software de InfoStat es mayor a 0.94; con el fin de asegurar la normalidad de los datos (Ramírez, 2017).

El supuesto de homogeneidad de varianzas se lo comprobó mediante la prueba de Levene, misma que mediante el uso de los errores absolutos de los datos, contrasta el p-valor asociado con la estadística de la prueba con un grado de significancia previamente seleccionado (Casanoves et ál., 2012). En caso de que el p-valor sea mayor al grado de significancia se acepta la hipótesis nula que sostiene que las variables son iguales (Ortiz, 2017).

Posteriormente se realizó el análisis de la varianza ANOVA, adaptándolo al diseño Factorial 2^3 (Federación de Científicos Europeos de Osteopatía, 2014).

3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el presente trabajo de investigación se aplicó un Diseño Factorial 2^3 . Se contó con tres factores de estudio según la tabla 3.3. Como Primer Factor, los tipos de residuos orgánicos que estuvieron dados en 2 niveles – cantidades de cáscaras de frutas y vegetales como cosustratos.

El Segundo Factor, fue la dosificación de sacarosa – azúcar morena como biocatalizador.

Y, como Tercer Factor se utilizaron microorganismos anaerobios comerciales de la empresa BIOMERK AR.

Tabla 3.3. Factores y niveles para la experimentación

Factor de estudio	Niveles
Tipo de residuo	Cantidad en masa de cáscaras de Frutas / Vegetales
Adición de Biocatalizador	Dosis de Sacarosa
Microorganismos anaerobios comerciales	Concentración de microorganismos anaerobios Biomerk.® Ar Cápsula

La combinación de los factores de estudio y niveles permitió generar 8 combinaciones de tratamientos (tabla 3.4), los mismos que tendrán 3 repeticiones, es decir 24 unidades experimentales. En cada tratamiento se analizó la evolución del proceso de estabilización biológica de los lodos residuales durante 4 semanas mediante el control de la temperatura, pH y la relación de carbono y nitrógeno.

Tabla 3.4. Matriz para la experimentación de 8 tratamientos. Combinación de factores con sus niveles de acuerdo con el Diseño Factorial 2³

Tratamiento	Cantidad en masa de lodo	Cantidad en masa de residuos de frutas y vegetales	Cantidad de volumen de microorganismos anaerobios comerciales	Dosis de biocatalizador – sacarosa
T1 (A)	500g	250g f	25 ml	20g / 72h
T2 (B)	500g	188g f/ 62g v	25 ml	20g / 72h
T3 (C)	500g	250g f	50 ml	20g / 72h
T4 (D)	500g	188g f/ 62g v	50 ml	20g / 72h
T5 (E)	500g	250g f	25 ml	5g / 72h
T6 (F)	500g	188g f/ 62g v	25 ml	5g / 72h
T7 (G)	500g	250g f	50 ml	5g / 72h
T8 (H)	500g	188g f/ 62g v	50 ml	5g / 72h

3.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis de varianza (ANOVA) es la técnica central en el análisis de datos experimentales. La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento. El

objetivo del análisis de varianza es probar la hipótesis de igualdad de los tratamientos (Dagnino, 2014).

En base a lo anterior, el análisis descriptivo incluyó las medidas de tendencia y dispersión, en donde se obtuvieron respuestas de las variables de temperatura, pH, Sólidos Volátiles y Sólidos Totales (Sutanapong y Louangrath, 2018).

Según Dagnino (2014) el ANOVA permite analizar la variación en una variable de respuesta (variable continua aleatoria) medida en circunstancias definidas por factores discretos (variables de clasificación). Se usa un ANOVA en cuatro situaciones:

- Cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados. El ANOVA también puede ser usado para comparar solamente dos grupos; de hecho, la prueba t de Student es un caso especial de ANOVA de una vía.
- Cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones o cuando hay dos o más grupos en quienes se hacen mediciones repetidas en dos ocasiones.
- Cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afectan el resultado y se necesita ajustar su efecto.
- Cuando se desea analizar simultáneamente el efecto de dos tratamientos diferentes, cuando el efecto de cada uno por separado y su posible interacción es importante.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. FASE I: IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO BIOLÓGICO DE ESTABILIZACIÓN

Las muestras de lodo fueron recolectadas sin mayor novedad para su traslado al laboratorio, previamente se midieron las variables de pH y temperatura como se detalla en la metodología. El traslado de la muestra al laboratorio es crucial tomando en cuenta los procedimientos descritos en la normativa NTE INEN-ISO 5667, para el muestreo de lodos provenientes de aguas residuales.

Una vez que se añadieron las cantidades, dosis y concentraciones de las variables para cada una de las unidades experimentales, estas fueron cerradas con papel aluminio para ayudar a que los lodos estén en condiciones anaerobias y finalmente, se guardaron en una caja termo de espuma flex.

Silva (2022) menciona que los lodos son un residuo que, según sus características, pueden representar una amenaza debido a los subproductos que se generan, entre ellos compuestos peligrosos, es por ello que su manipulación con equipos de protección adecuados es crucial. Además, para determinar la peligrosidad de los lodos residuales, se puede seguir los lineamientos de la normativa Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

Para la aplicación de microorganismos anaerobios comerciales de la compañía de biotecnología BIOMERK AR – cápsula, estuvieron dados en una cantidad de volumen de 25 ml y 50 ml inicial respecto al desarrollo del experimento y una dosis de frecuencia de aplicación de 1mL/3días (anexo 3). Peñaherrera et ál. (2018) expresan que los microorganismos ayudan a acelerar el proceso de degradación de la materia orgánica de una manera más rápida y actúan en el proceso de estabilización del lodo residual.

4.2. FASE II: ANÁLISIS DE ESTABILIZACIÓN BIOLÓGICA APLICANDO EL PROCESO BIOLÓGICO A TRAVÉS DE LOS INDICADORES A MEDIR.

En la presente fase, se analizó el proceso de estabilización biológica de acuerdo a los resultados logrados por los parámetros tomados en campo de temperatura y pH (anexo 4).

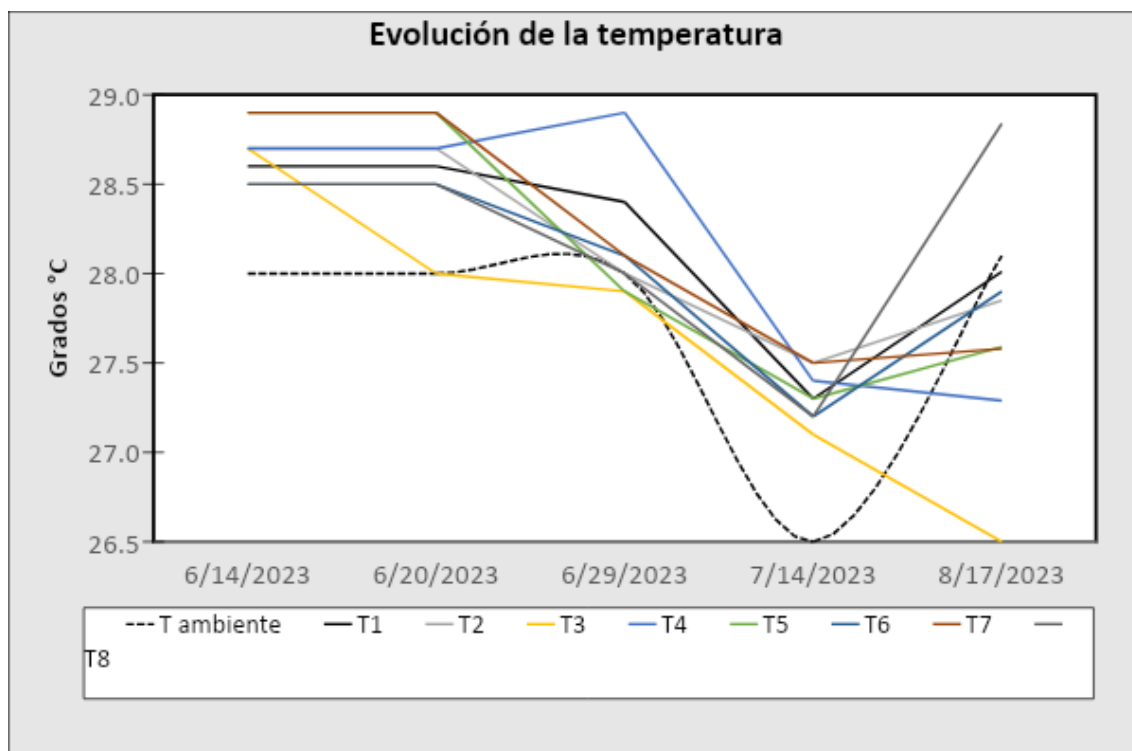


Figura 4.1. Evolución temporal de la temperatura en cada tratamiento

Según los resultados obtenidos, el tratamiento con el mayor incremento de temperatura fue el T4 con una diferencia de 1,20°C en relación al medio ambiente. Este tratamiento incluyó la adición de cáscaras de naranja, residuos de vegetales, microorganismos anaerobios y biocatalizador sacarosa.

La temperatura inicial de los tratamientos se ubicó entre 28,5 y 29 °C, por encima de la temperatura ambiente con una variación (ΔT) de alrededor de 0,5 a 1 °C, esta variación puede deberse a la actividad microbiana que, mediante el metabolismo de la materia orgánica, produce una liberación de energía en forma de calor. Posteriormente, en el transcurso de un mes, la temperatura de los tratamientos descendió entre 27 y 27,5 °C, esto fue influenciado por la temperatura del ambiente, debido a que ΔT sigue situándose cerca de 1 °C.

Finalmente, a los 2 meses de ensayo se observó que los tratamientos presentaron una considerable variabilidad entre sí, siendo el T8 (188 gf/ 62 gv + 50 ml microorganismos + 5 g de sacarosa) el que alcanzó una mayor temperatura 28,84 °C, mientras que el de menor temperatura fue el T3 (250 gf + 50 ml de microorganismos + 20 g de sacarosa), que llegó a descender hasta 26,3 °C.

En lo que corresponde a la temperatura, según el trabajo realizado en Tungurahua, con desechos de cerezas y cebollas, se obtuvo una variación de temperatura entre 18 y 62 °C; es decir, se trabajó con una fase termófila (Larreategui, 2018). En contraste, en el presente trabajo se alcanzaron temperaturas entre 26 y 28°C, alcanzando una fase mesófila. Cabe destacar que varios procesos a gran escala alcanzan esta fase que varía entre 25 y 40 °C (Solano, 2020). En otros trabajos, se han aplicado lodos residuales de plantas de tratamiento domésticas; sin embargo, en el presente trabajo se utilizó lodo fecal de hato porcino.

Guardando relación con lo planteado en el párrafo anterior, Cattani (2018) detalla que es necesario que la temperatura del lodo se mantenga lo más constante posible con variaciones de ± 2 °C, por la razón de que los cambios bruscos de temperatura afectan el desempeño de las bacterias, generando desequilibrio en la población microbiana. Narváez (2020) sostiene que temperaturas muy bajas o altas pueden ocasionar la reducción de la eficiencia en el proceso de remoción tanto de materia orgánica y nutrientes presentes en efluentes porcinos, por lo que se considera que la temperatura del proceso fue la óptima.

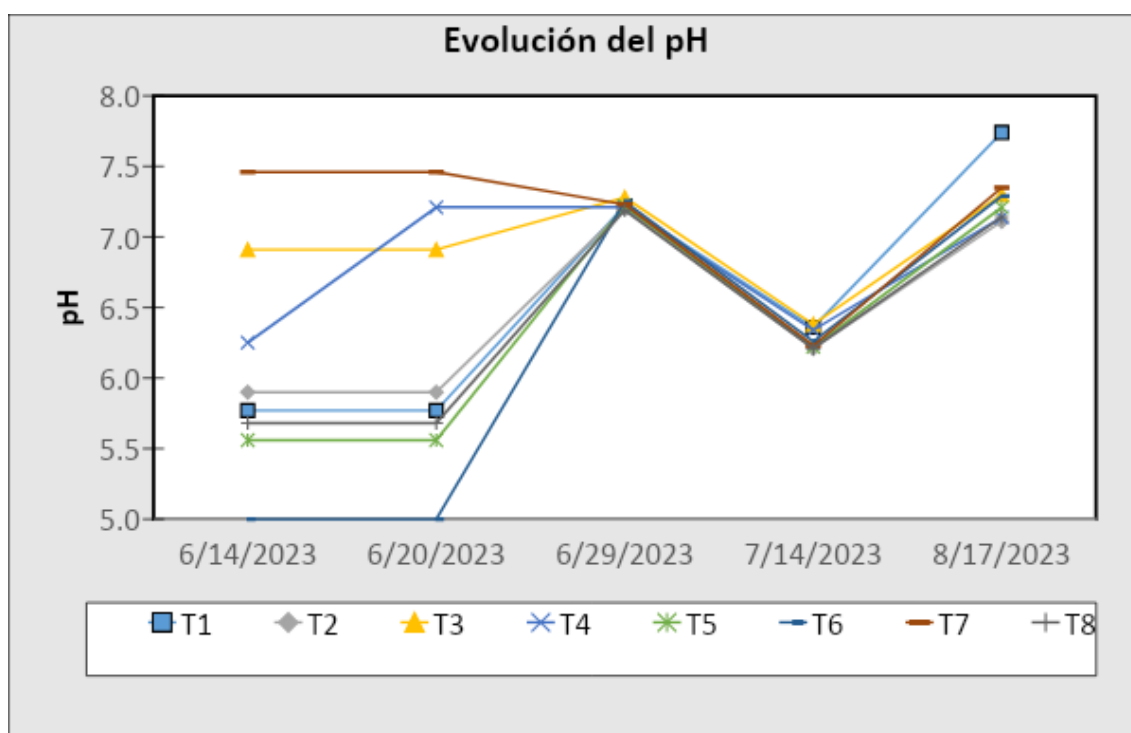


Figura 4.2. Evolución temporal del pH en cada tratamiento

El pH de las muestras inicialmente osciló entre 4,62 y 7,46 siendo el T4 (188 gf/62 gv + 50 mL de microorganismos + 20 g de sacarosa), el que poseyó un el valor más bajo y el T7 (250 gf + 50 mL de microorganismos + 5 g de sacarosa) el más alto respectivamente. Posteriormente, los tratamientos se estabilizaron en aproximadamente un mes de ensayo en un rango aproximado de 6,3 bordeando la neutralidad. Finalmente, el pH de todos los tratamientos aumentó, en todos los casos, superando los 7 UpH, alcanzando la neutralidad.

Se logró definir que todos los tratamientos alcanzaron un nivel cercano a la neutralidad al cabo de 60 días. Estos niveles oscilaron en un rango en la escala de pH de 5,56 y 7,21. Según Núñez (2017) un pH que oscila entre 5,5 a 6,5, es óptimo para los organismos acetogénicos, mientras que un pH entre 7,8 y 8,2, es óptimo para metanogénicos, sin embargo, estos últimos son más sensibles a las variaciones de pH. Por lo tanto, en base a los resultados de esta investigación, se resalta una mayor actividad acetogénica, esto podría indicar que la digestión no genera una alta cantidad de biogás.

Salazar (2021) menciona que, mediante las condiciones adecuadas los microorganismos efectúan sus funciones vitales, logrando así los resultados

deseados en el tratamiento biológico. Un pH inadecuado afectará las distintas etapas de la digestión anaerobia, siendo los valores óptimos entre 6,8 y 7,6 (Brito et ál., 2023). Sin embargo, la autora Salazar citada anteriormente, obtuvo en su investigación sobre tratamiento de efluentes generados de una granja porcina con aireación y microorganismos un pH de 7,64 y que al transcurrir 6 días de tratamientos el pH fue de 8,11 y a los 12 días 8,61 estableciéndose como neutro, lo que aún permitió el desarrollo de la actividad microbiana.

En la investigación de Vásquez (2023) se observó un pH entre 6 y 8 en el tratamiento de aguas residuales porcinas, considerando que el principal componente de las excretas es el nitrógeno y su pH se encontró entre 6 y 8. Sánchez et ál., (2020) determinaron en su investigación que el pH sí osciló entre 6,90 y 7,20, significando la obtención de un lodo casi neutro y según la Norma Oficial Mexicana no presenta peligro alguno por corrosividad.

Todos los valores citados de pH, guardan relación con los obtenidos en la presente investigación, es decir, poseen un pH neutro. Según Mojica et ál. (2023), se debe principalmente a que la población microbiana es variada y actúa en condiciones ideales, obteniendo él en su investigación la mayor actividad antimicrobiana a un pH entre 6,0 y 7,5 y aunque el pH se modificó, se mantuvo en rangos de neutralidad. Aunque en la presente investigación se utilizaron una sola variedad de microorganismos anaerobios, se considera que lo expuesto guarda relación en cuanto a las condiciones ideales de los microorganismos.

La relación de sólidos volátiles y sólidos totales fue determinada durante un periodo de 60 días. Y se tomó en cuenta la normativa 503 "Biosolids Rule" de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos. En la misma, especifica que la reducción del contenido de sólidos volátiles y sólidos totales debe alcanzar una reducción mínima de 60% como indicador resultante de la estabilización de lodos.

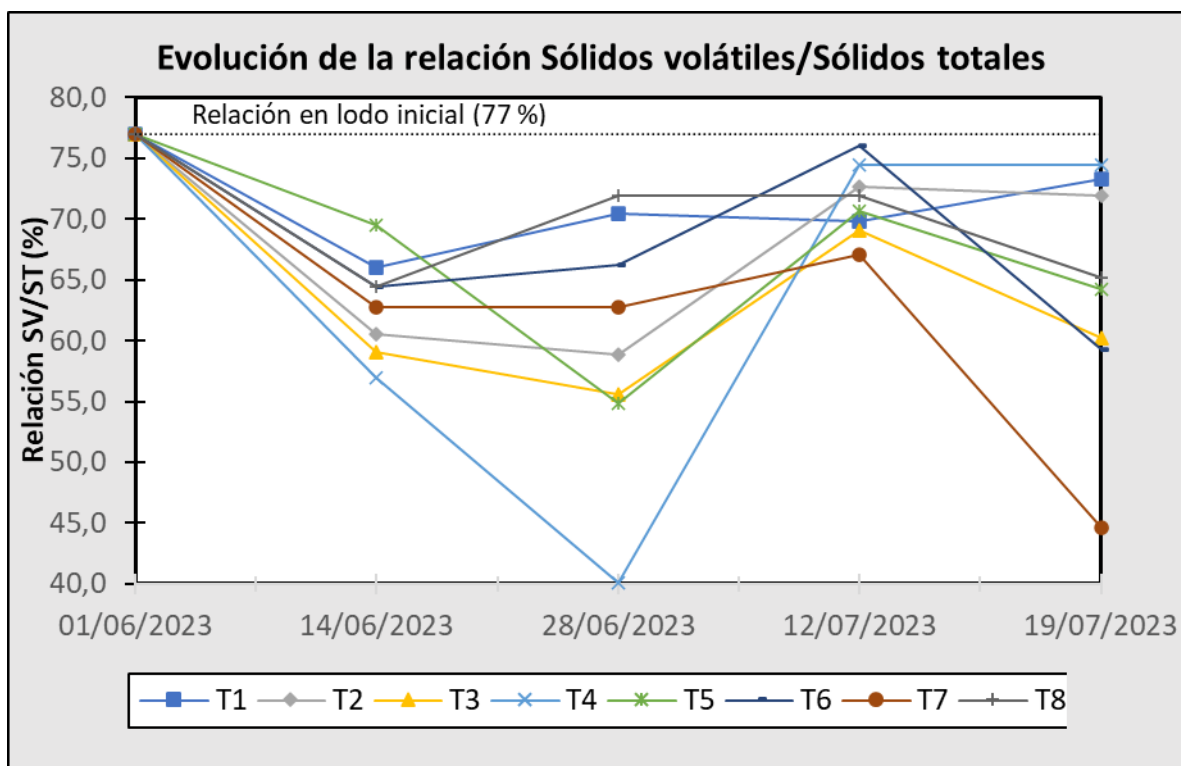


Figura 4.3. Evolución temporal de la relación SV/ST

La relación SV/ST disminuyó con respecto al lodo inicial, esto es un parámetro que indica la materia putrescible digerible, por lo cual, su disminución inicial indica que se realizó una digestión aceptable. Los tratamientos T2, T3, T4, T5, T6 y T7 llegaron a alcanzar el criterio de estabilización de la EPA ($SV/ST < 60\%$), sin embargo, en la última medición de la (semana 7) solo los tratamientos T6 y T7 obtuvieron valores que cumplen con el criterio.

Según Gualoto (2016) la relación SV/ST debe estar entre 30 y 40 %, para considerar una estabilización de lodos residuales. Caso particular fue el tratamiento T4 (188 gf/ 62 gv + 50 mL de microorganismos + 20 g de sacarosa) que alcanzó en la semana 5 un valor de 40,10 % SV/ST, por lo que se consideró que este tratamiento fue el más óptimo en estabilización de lodos. Sin embargo, resta evaluar el criterio de microorganismos patógenos.

Para el día final, todos los tratamientos presentaron una disminución de relación SV/ST, a excepción del T1 que aumentó, sin embargo, solo dos se situaron por debajo del 60 %, cabe resaltar que el valor más bajo del día final fue el T7 (250 gf + 50 mL de microorganismos + 5 g de sacarosa) con 44,6 % SV/ST, aun así,

no se consideró como el más eficaz debido a que el tratamiento T4 alcanzó una relación del 40,1 %, aunque este se obtuvo en la semana 5.

En un estudio realizado por Peñaherrera et ál. (2018), los lodos estabilizados por digestión anaerobia lograron alcanzar una relación del 45 % junto a un pH de 5,7, reduciendo la materia orgánica (SV) en 70,8 %. Solano (2020) plantea que los porcentajes de remoción de sólidos en la literatura normalmente se encuentran entre 65 % y 85 %.

Por su parte, Cattani (2018) detalla que entre mayor sea la reducción de los sólidos se considerará estable al lodo, además, el autor destaca que una disminución superior de estos componentes sugiere que la materia ha sufrido procesos de biotransformación.

La digestión anaerobia es un proceso efectivo para reducir la materia orgánica en los lodos residuales, como se evidenció por la disminución de sólidos volátiles a 40,10 % en el tratamiento 4. Según Domínguez et ál. (2021) durante este proceso, los microorganismos actúan descomponiendo la materia orgánica en componentes más simples y estables, como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y ciertos productos solubles como ácidos orgánicos y alcoholes lo que contribuye a la estabilización de los lodos. Por tanto, el porcentaje de remoción de sólidos denota la eficacia del proceso.

La cuantificación de Unidades Formadoras de Colonia (UFC) se realizó para el lodo inicial y para el tratamiento 4 (T4) que fue el mejor según los resultados de la relación de sólidos volátiles y sólidos totales (Anexo 7, 8 y 9). Expresados a continuación:

Tabla 4.1. Unidades Formadoras de Colonia de Coliformes Fecales

Cuantificación de Unidades Formadoras de Colonia de Coliformes fecales (UFC)	
Lodo Inicial	146
Tratamiento 4 (188 gf/ 62 gv + 50 mL de microorganismos + 20 g de sacarosa)	98

De acuerdo a la cuantificación se procedió a aplicar la fórmula indicada por la guía de interpretación para determinar las UFC.

- $LODO\ INICIAL = (146 \times 20) \times 10$

$$LODO\ INICIAL = 29200\ UFC/ml$$

- $TRATAMIENTO\ 4 = (146 \times 20) \times 10$


$$TRATAMIENTO\ 4 = 19600\ UFC/ml$$

La muestra del tratamiento T4 registró una remoción del 33 % de coliformes fecales con respecto a la muestra inicial. Por su parte, Telles et ál. (2002) reportó una remoción de 99,9 % de coliformes fecales en lodos procedentes de una depuradora de lodos residuales, mediante un proceso de digestión anaerobia termófila, valor muy superior al de esta investigación. Al-Gheethi et ál. (2018) menciona que la digestión anaerobia termófila es más eficaz que la mesófila en la eliminación de patógenos.

Según los estándares de calidad microbiológica establecidos por la EPA, tal como se detalla en la Tabla 2.2, tanto el lodo residual inicial como el lodo residual resultante del tratamiento 4 cumplen con los criterios para ser clasificados como '**LODO CLASE B**', estos lodos poseen sus limitantes para aplicar en agricultura directa, pero pueden ser utilizados para remediación de suelos, plantaciones forestales o rellenos sanitarios.

Conforme a los servicios contratados con el Laboratorio de Investigación de la Universidad de las Américas (UDLA) en la ciudad de Quito, según se detalla en el Anexo 10, dicha institución llevó a cabo el análisis del parámetro de 'ANALIZADOR ELEMENTAL DE CARBONO Y NITRÓGENO' en el Lodo Residual Inicial Sin Tratar (MI1) y en el Lodo Residual del Tratamiento 4 (MT4). Para la muestra de MT4, se utilizaron 188 g de fruta, 62 g de vegetales, 50 ml de microorganismos anaerobios comerciales y 20 g de sacarosa como biocatalizador. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 4.2. Resultados de análisis del laboratorio de relación C/N

		RESULTADOS ANALIZADOR ELEMENTAL	
Nombre del Solicitante:	Willy Zambrano		
Condiciones de muestra:	La muestra fue recibida en estado sólido.		
Preparación de muestra:	Se preparó de acuerdo al protocolo interno.		
Técnica utilizada:	Analizador Elemental		
Responsable del análisis:	Genoveva Granda		
MUESTRA	% Nitrógeno	% Carbono	
MI1	0.528	9.297	
MT4	0.244	13.772	

El Lodo Residual Inicial sin Tratar obtuvo un 0,528% de Nitrógeno y 9,297% de Carbono. Esto representa una relación Carbono/Nitrógeno de 17,60.

Mientras que, el Lodo Residual del Tratamiento 4 obtuvo un 0,244% de Nitrógeno y 13,772% de Carbono. Esto representa una relación Carbono/Nitrógeno de 56,44.

La relación Carbono/Nitrógeno es uno de los indicadores clave del grado de descomposición de la materia orgánica y la madurez del compost. Durante el compostaje, la relación C/N disminuye porque la tasa de pérdida de Carbono orgánico (C) es mayor que la de Nitrógeno (Zhang et ál., 2021). Las correlaciones positivas entre la relación C/N inicial y las emisiones de CO₂-C indicaron que una relación C/N alta proporciona la energía adecuada para la biooxidación, que convierte el C orgánico en CO₂ (Zhang et ál., 2021).

Diversas investigaciones, como la llevada a cabo por Arrocha (2020), han examinado los lodos activados de aguas residuales generados por una industria de producción de grasas vegetales. En su estudio, el autor identificó un déficit de nitrógeno, que se expresó a través de una relación carbono y nitrógeno de 49:1.

Baquero y Murillo (2019), en su investigación enfocados en el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de la biomasa residual de lodos residuales de una PTAR, encontraron una relación C/N inicial de 1765:1. Posteriormente, llevaron a cabo una adición de gallinaza como fuente de nitrógeno para equilibrar la relación C/N. Esta adición resultó efectiva, logrando una relación de 30:1 en la digestión de un reactor anaerobio. Los investigadores señalaron que una relación C/N óptima para lodos que se someten al proceso de compostaje debe situarse en un rango de 25:1 a 35:1.

De esta manera, se puede destacar que, con base a estudios analizados una relación C/N inicial de 20–40 es aceptable para el rendimiento del compostaje y 25–30 es ideal para la actividad microbiana.

Sin embargo, los resultados de la presente investigación muestran que los lodos residuales del hato porcino de cerdos presentaron una relación C/N inicial de 9,297:0,528 (17,60), mientras que el tratamiento óptimo alcanzó una relación de 13,772:0.244 (56,44). Es evidente que la concentración de carbono en el lodo inicial no es la adecuada. Después del proceso de compostaje, esta relación se elevó a 56,44, lo que indica un incremento en la concentración de carbono, aunque superando lo recomendado. Esto se debe a la incorporación de sacarosa y residuos de frutas y vegetales. No obstante, esta cantidad de desechos con contenido de carbono orgánico contribuyó a la estabilización del lodo residual.

Por tanto, en casos como estos, Delgado et ál. (2019) indican que la adición de material rico en carbono, como cáscaras de verduras y frutas, son materiales que poseen lignina, un polímero que proporciona rigidez y una estructura compleja a las paredes celulares, y a la vez son más resistentes a la degradación para ser transformados en compuestos húmicos, en comparación con otros componentes como la celulosa. Esta complejidad y resistencia hacen que la lignina sea menos accesible a la acción de los microorganismos descomponedores, lo cual se atribuye la razón a la acción microbiana, que no lograron consumir una mayor cantidad de carbono orgánico aportado en el presente estudio.

4.3. FASE III: DEFINICIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO MEDIANTE ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN EL EFECTO DE ESTABILIZACIÓN DEL LODO RESIDUAL.

Para poder determinar un tratamiento con mejor resultado para el proceso de estabilización de lodos residuales se optó realizar un análisis estadístico de varianzas ANOVA, posterior al análisis de los supuestos. Las variables analizadas fueron la Temperatura del Lodo, pH, y la Relación Sólidos Volátiles/Sólidos Totales.

Para poder realizar el ANOVA se realizó la comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas se realizaron mediante el gráfico de normalidad Q-Q Plot (Ramírez-Alán, 2017; Statology, 2021), y la prueba de Levene (Casanoves et ál., 2012; Ortiz, 2017). Estas, se realizaron para cada variable de respuestas de la siguiente manera:

- **SUPUESTO DE NORMALIDAD**

TEMPERATURA DEL LODO

Se puede evidenciar mediante el análisis visual de la figura 4.26. que los puntos de datos se posicionan cerca de la línea recta, indicando normalidad de los datos. Adicionalmente el valor de correlación lineal de 0,975 es mayor a 0,94 como estipula Ramírez (2017), fortaleciendo la normalidad de los datos.

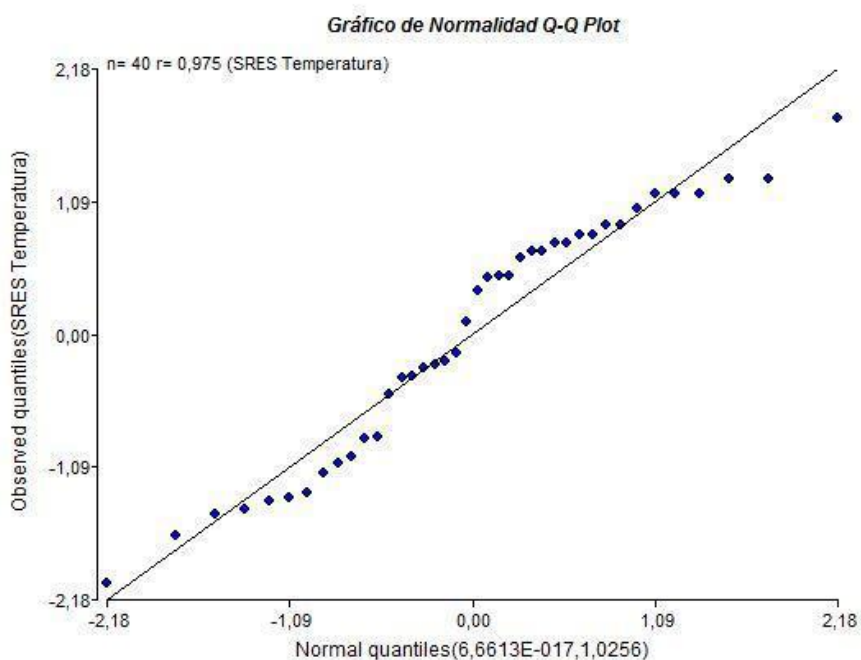


Figura 4.4 Gráfico Q-Q Plot Temperatura

Fuente: InfoStat (2008)

pH

La figura 4.27 ofrece una representación visual de la distribución de los datos relacionados con el pH, mostrando una tendencia a estar cercanos a la línea recta. Además, el valor de R (coeficiente de correlación) de 0,988 supera el criterio de aceptación para la normalidad, que se estableció en 0,94. Estos

hallazgos respaldan sólidamente la conclusión de que los datos del pH siguen una distribución normal.

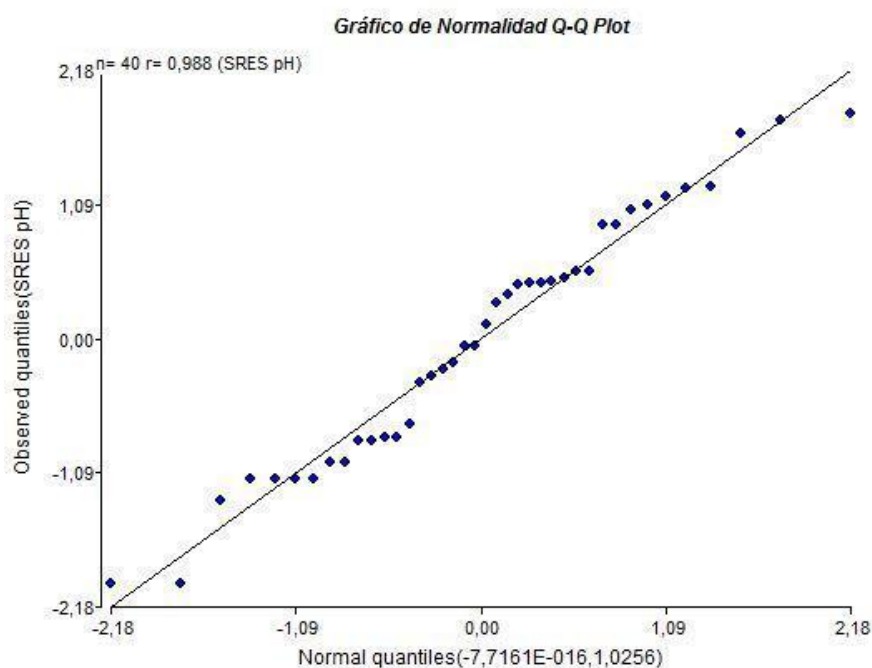


Figura 4.5 Gráfico Q-Q Plot pH

Fuente: InfoStat (2008)

SV/ST

En el gráfico 4.28 se logró evidenciar que los datos referentes a la relación de sólidos volátiles y sólidos totales en los lodos estabilizados, tienen tendencia a estar cerca de la recta, pese a la presencia de datos atípicos el valor R de 0,961 que arrojó el software lo cual es mayor al criterio previamente establecido generando seguridad al considerar la normalidad de los datos.

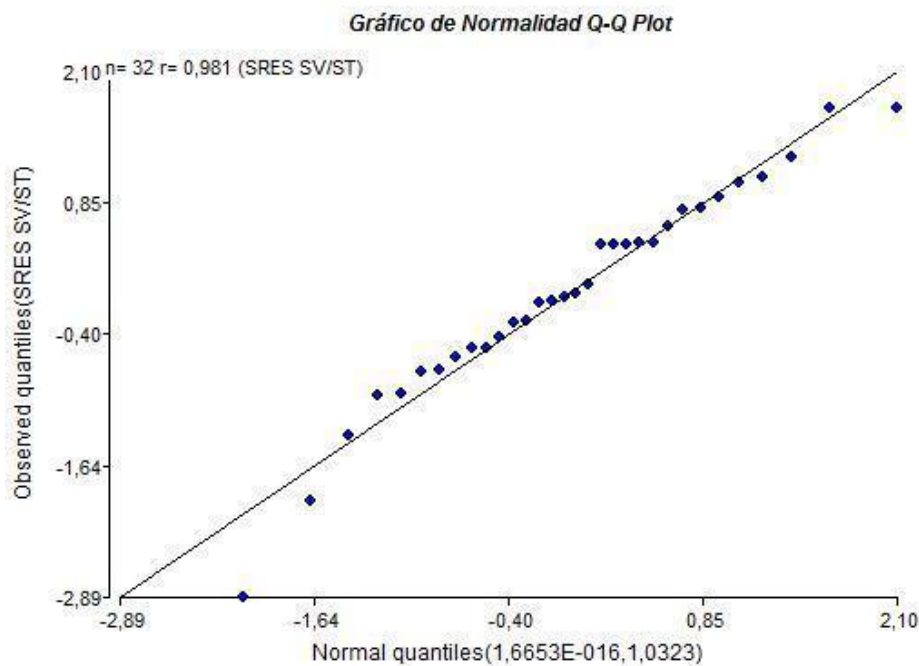


Figura 4.6. Gráfico Q-Q Plot SV/ST

Fuente: InfoStat (2008)

La confirmación de que las tres variables de estudio en el presente análisis satisfacen el supuesto de normalidad, certifica la elección del ANOVA como la herramienta apropiada para el análisis estadístico, contribuyendo a mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados Flores et ál. (2018). La falta de comprobación de los supuestos básicos en pruebas paramétricas puede llevar que los resultados se mal interpreten e inducir a conclusiones erróneas (Meza, 2021).

- **SUPUESTO DE HOMOGENEIDAD**

En la comprobación mediante la prueba de Levene se tomó en cuenta las siguientes hipótesis que serán aceptadas o rechazadas mediante la comparación con el grado de significancia 0,05.

H0: Las varianzas de los grupos no tienen diferencia significativa.

H1: Las varianzas de los grupos tienen diferencia significativa.

- **TEMPERATURA DEL LODO**

Al realizar la prueba de Levene, se observó que todos los p-valores asociados con las fuentes de variación evaluadas superaron el nivel de significancia de 0,05. Este resultado permitió rechazar la hipótesis alternativa que sugería diferencias estadísticas entre las varianzas. En consecuencia, se concluye que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas en los datos.

Tabla 4.3. Prueba de Levene Temperatura

Tabla de Prueba de Levene (SS Parcial)						
FV	Gl	Sc	Cm	Fc	p-valor	
Factor A	1	0.06	0.06	0.72	0.4012	
Factor B	1	0.19	0.19	2.27	0.1416	
Factor C	1	0.02	0.02	0.24	0.6258	
Factor A x Factor B	1	0.01	0.01	0.10	0.7579	
Factor A x Factor C	1	0.06	0.06	0.68	0.4155	
Factor B x Factor C	1	0.15	0.15	1.78	0.1915	
Factor A x Factor B x Factor C	1	0.02	0.02	0.29	0.5960	
Error	32	2.74	0.09			
Total	39	3.27				

Fuente: InfoStat (2008)

- **pH**

Los resultados de la prueba de Levene para el pH indican que la mayoría de los p-valores están por encima del nivel de significancia establecido, excepto en los casos de los factores B (0,0009) y C (0,0381), donde los p-valores son inferiores. En términos generales, y se concluye que se cumple el supuesto de homogeneidad de varianzas. Sin embargo, es importante destacar que los efectos de los factores B y C reducen la fortaleza de la presente conclusión, ya que indican ciertas disparidades en las varianzas asociadas a los factores (B y C).

Tabla 4.4. Prueba de Levene pH

Tabla de Prueba de Levene (SS Parcial)						
FV	Gl	Sc	Cm	Fc	p-valor	
Factor A	1	0.28	0.28	3.84	0.0862	
Factor B.	1	1.21	1.21	3.13	0.0009	
Factor C	1	0.42	0.42	13.45	0.0381	
Factor A x Factor B	1	0.02	0.02	4.68	0.6483	
Factor A x Factor C	1	0.30	0.30	0.21	0.0754	
Factor B x Factor C	1	0.03	0.03	3.38	0.5639	
Factor A x Factor B x Factor C	1	0.15	0.15	0.34	0.2010	
Error	32	2.87	0.09	1.70		
Total	39	5.28				

Fuente: InfoStat (2008)

La falta de homogeneidad en los factores B y C plantea una interrogante sobre por qué la adición de biocatalizador y bacterias anaerobias ha generado variabilidad en las varianzas de los datos. De acuerdo con Urquijo y Fontalvo (2020), la composición química de los compuestos añadidos en un tratamiento, como el biocatalizador o los microorganismos, influye en la eficiencia de la hidrólisis. En otras palabras, la introducción de biocatalizadores y la actividad metabólica de los microorganismos pueden modificar la composición química del sistema estudiado, lo que, a su vez, afecta el pH.

Así mismo, la degradación de materia orgánica mediante tratamientos biológicos con bacterias que se alimente de la misma, influye en el pH a través de la degradación de la materia orgánica (Becerra et ál., 2019). Efectos que se tomaron en cuenta al realizar las conclusiones del análisis estadístico.

- **SV/ST**

Los resultados de la prueba de Levene en la relación SV/ST dan como resultado que los p-valor de todas las fuentes de variación son mayores al grado de significancia lo que permitió aceptar la hipótesis nula que asegura la homogeneidad. Sin embargo, la interacción del factor A y factor C (0,0045) es menor al grado de significancia, indicando heterogeneidad. Según lo reportado por Fernández y Vallejo (1996), en situaciones donde se incumple el supuesto de homogeneidad, si la heterogeneidad es alta, el error puede aumentar significativamente. En el presente estudio, aunque la heterogeneidad detectada

en la interacción de los factores A y C está próxima al nivel de significancia, lo cual se consideró despreciar el efecto en el desarrollo de la investigación, dado que se encuentra al límite de la significación estadística.

Tabla 4.5. Prueba de Levene SV/ST

Tabla de Prueba de Levene (SS Parcial)						
FV	Gl	Sc	Cm	Fc	p-valor	
Factor A	1	40.35	40.35	2.59	0.1205	
Factor B	1	45.23	45.23	2.90	0.1013	
Factor C	1	9.72	9.72	0.62	0.4373	
Factor A x Factor B	1	0.95	0.95	0.06	0.8066	
Factor A x Factor C	1	154.77	154.77	9.94	0.0045	
Factor B x Factor C	1	32.01	32.01	2.06	0.1646	
Factor A x Factor B x Factor C	1	31.02	31.02	1.99	0.1710	
Error	24	373.70	15.57			
Total	31	687.85				

Fuente: InfoStat (2008)

El cumplimiento del supuesto de homogeneidad es importante debido a que, si las varianzas son diferentes entre los grupos, pueden afectar la precisión de los resultados Amat (2016). De acuerdo con Almeida et ál. (2008), la prueba de Levene es a comparación de otras pruebas de homogeneidad de varianzas es más robusta, lo que asegura un análisis preciso de varianzas entre grupos de observaciones.

- **ANÁLISIS ESTADÍSTICO ANOVA**

TEMPERATURA DEL LODO

El análisis de varianza realizado para la temperatura mostró que los efectos de los factores principales (Factor A = 0,5759, Factor B = 0,7513 y Factor C = 0,6300), así como las interacciones entre ellos (Factor A x Factor B = 0.4183, Factor A x Factor C = 0,4780, Factor B x Factor C = 0,3804 y Factor A x Factor B x Factor C = 0,5452), superaron el nivel de significancia establecido. Indicando que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre estos factores y sus interacciones, lo que dificulta la identificación de un tratamiento que sea estadísticamente superior a los demás mediante una prueba de medias.

Tabla 4.6. Análisis de Varianza Temperatura

Tabla de Análisis de Varianza (SS Parcial)						
FV	Gl	Sc	Cm	Fc	p-valor	
Factor A	1	0.15	0.15	0.32	0.5759	
Factor B	1	0.05	0.05	0.10	0.7513	
Factor C	1	0.11	0.11	0.24	0.6300	
Factor A x Factor B	1	0.31	0.31	0.67	0.4183	
Factor A x Factor C	1	0.24	0.24	0.52	0.4780	
Factor B x Factor C	1	0.37	0.37	0.79	0.3804	
Factor A x Factor B x Factor C	1	0.17	0.17	0.37	0.5452	
Error	32	14.91	0.47			
Total	39	16.32				

Fuente: InfoStat (2008)

Los resultados obtenidos indican que no existen diferencias estadísticas significativas entre las temperaturas en los diferentes tratamientos. Sin embargo, la falta de variación de las temperaturas entre los tratamientos podría sugerir una actividad microbiana moderada en el sistema. Este hallazgo, se alinea con la idea presentada por Meneses y Cabrera (2022), quienes señalaron que niveles elevados de nutrientes en un lodo en proceso de estabilización biológica proporcionan más recursos para que los microorganismos lleven a cabo procesos metabólicos, como la degradación de materia orgánica, tal como mencionado previamente por Becerra et ál. (2019).

Esto implica que, en ausencia de diferencias significativas en las temperaturas entre los tratamientos, la variabilidad en la temperatura del lodo puede estar relacionada con la actividad microbiana. Cuando los microorganismos están activos y metabolizan los nutrientes presentes en el lodo, se genera un incremento de temperatura, lo que a su vez podría manifestarse como una variación en la temperatura. Es decir, la falta de variación en las temperaturas sugiere una actividad microbiana relativamente constante en todos los tratamientos.

- **pH**

Al analizar detenidamente los resultados presentados en la tabla 4.7, se evidencia que los efectos de los factores principales (Factor A = 0,3747, Factor B = 0,1822 y Factor C = 0,0614) y las interacciones entre ellos (Factor A x Factor B = 0,3511, Factor A x Factor C = 0,6602, Factor B x Factor C = 0,3804 y Factor A x Factor B x Factor C = 0,6777) superaron el nivel de significancia establecido de 0,05. Este resultado sugirió a aceptar la hipótesis nula, misma que estipuló que no hay diferencias estadísticas significativas entre los efectos de estas fuentes de variación.

En otras palabras, no existe evidencia suficiente para afirmar que alguno de estos factores principales o sus interacciones tenga un impacto estadísticamente significativo en la variable de respuesta que estamos estudiando. Esto sugiere que, en términos estadísticos, los efectos de estas variables son similares y no contribuyen de manera significativa el nivel de pH del lodo.

Tabla 4.7. Análisis de Varianza pH

Tabla de Análisis de Varianza (SS Parcial)						
FV	Gl	Sc	Cm	Fc	p-valor	
Factor A	1	1.13	1.13	1.12	0.3747	
Factor B	1	2.29	2.29	1.86	0.1822	
Factor C	1	0.55	0.55	3.76	0.0614	
Factor A x Factor B	1	0.12	0.12	0.90	0.3511	
Factor A x Factor C	1	0.48	0.48	0.20	0.6602	
Factor B x Factor C	1	0.11	0.11	0.79	0.3804	
Factor A x Factor B x Factor C	1	0.10	0.10	0.18	0.6777	
Error	32	19.49	0.61	0.17	0.6865	
Total	39	24.26				

Fuente: InfoStat (2008)

Los resultados que indican la falta de un efecto significativo en el pH del lodo son consistentes con las observaciones de diversos autores como Urquijo y Fontalvo (2020), Saldaña y Castillo (2022), y Becerra et ál. (2019), quiénes han destacado que los lodos residuales son matrices complejas que contienen una variedad de componentes, como materiales inorgánicos, químicos, patógenos, bacterias y helmintos, entre otros. Estos componentes pueden desencadenar interacciones metabólicas y químicas en el lodo. Uno de los factores que puede contribuir a la falta de diferencia significativa en el pH es la capacidad de estos diversos componentes para interactuar y contrarrestar cualquier cambio en el equilibrio ácido-base. La adición de biocatalizadores o microorganismos al sistema también puede influir en estas interacciones, ya que introducen actividades metabólicas adicionales que podrían contrarrestar cualquier cambio en el pH o temperatura (Pulgarín y Wills, 2019).

- **SV/ST**

Al analizar los resultados expuestos en la tabla 4.8., se logró evidenciar que los efectos de los factores principales (Factor A = 0,5469, Factor B= 0,1713 y Factor C = 0,9617) así como las interacciones entre ellos (Factor A x Factor B = 0,3410, Factor A x Factor C = 0,2526, Factor B x Factor C = 0,4280 y Factor A x Factor B x Factor C = 0,8053) superaron el nivel de significancia. A partir de estos resultados, se concluye de manera sólida, que no existen diferencias

estadísticas significativas entre los factores y las diversas interacciones que se han evaluado en relación a la relación de sólidos volátiles y sólidos totales.

Este hallazgo refuerza la idea de que, desde una perspectiva estadística, los efectos de estos factores y sus interacciones son comparables y no contribuyen de manera significativa a la variabilidad observada en la relación de sólidos volátiles y sólidos totales.

Tabla 4.8. Análisis de Varianza SV/ST

Tabla de Análisis de Varianza (SS Parcial)						
FV	Gl	Sc	Cm	Fc	p-valor	
Factor A	1	27.36	27.36	0.77	0.5469	
Factor B	1	145.74	145.74	0.37	0.1713	
Factor C	1	0.17	0.17	2.4E-03	0.9617	
Factor A x Factor B	1	69.18	69.18	0.94	0.3410	
Factor A x Factor C	1	100.71	100.71	1.37	0.2526	
Factor B x Factor C	1	47.65	47.65	0.65	0.4280	
Factor A x Factor B x Factor C	1	4.55	4.55	0.06	0.8053	
Error	24	1758.94	73.29			
Total	31	2154.31				

Fuente: InfoStat (2008)

Estos resultados contrastan con el caso de la investigación de Meza (2023) donde se observó una reducción gradual de los sólidos totales en todos los tratamientos que empleaban microorganismos eficientes en lodos sépticos. Además, Meza corroboró a través de un grupo de control que, aunque también se registró una disminución de los sólidos totales, esta reducción eventualmente alcanzó una fase estacionaria en comparación con los tratamientos.

Esta discrepancia en los resultados sugiere que hay factores distintivos entre ambos estudios que podrían explicar las diferencias en los patrones de reducción de sólidos totales. Estos factores están relacionados con la composición del lodo, las condiciones experimentales específicas, la duración del estudio y las características de los microorganismos utilizados en cada investigación.

Jhessica et ál. (2020), sugiere que el uso de los sólidos volátiles es una variable con una fuerte correlación en la producción de metano Esto nos brinda una

oportunidad para aprovechar más eficazmente el potencial de los lodos y mejorar el proceso de estabilización de los mismos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.4. CONCLUSIONES

- La activación microbiológica de las unidades experimentales se logró con la adición de microorganismos anaeróbicos, además, se le suministró carbono mediante residuos vegetales (tomate y pimiento) y de fruta (naranja), así como biocatalizadores de sacarosa. Se buscó un proceso de digestión anaerobia mediante la adición de microorganismos mesofílicos.
- La evaluación de los parámetros como indicadores del proceso biológico permitió observar que, la digestión anaeróbica constó de un proceso mesofílico, con rangos de temperatura entre 27 y 29 °C. Mientras que el rango de pH entre 5,5 y 7,5 UpH indicó que en la digestión se dio un proceso principalmente acetogénico, es decir, con liberación de ácido acético y poca generación de metano y gas natural. La evaluación de la relación SV/ST mostró que la estabilización si fue la adecuada en cuanto a remoción de materia putrescible, puesto que el tratamiento (T4) alcanzó un valor óptimo de 40.10 %, es decir, se ubicó en la zona inferior del 60% de SV/ST según lo establecido en el criterio de la Normativa 503 de la EPA "BIOSOLIDS RULE" considerándose una estabilización efectiva, este mismo tratamiento mostró una remoción de coliformes fecales del 33 %, llegando a 19600 UFC/mL, por lo que se categoriza como lodo Clase B, es decir, que es apto para cultivos forestales, relleno y remediación de suelos. La relación C/N del T4 fue de 56:44 vs 17:60 del lodo inicial, lo cual indica una nutrición con carbono gracias al cosustrato añadido. Con todo esto se concluye que el proceso fue óptimo en el T4 (188 g de residuos de frutas + 62 g de residuos de vegetales + 50 mL de microorganismos + 20 g de sacarosa) para estabilización de lodos residuales de hato porcino.
- Por medio del análisis de la varianza DBCA, se observó que no existieron factores con significancia para ninguna de las variables estudiadas, así como sus interacciones, por lo que se concluye que, mediante esta

experimentación, no existe un tratamiento mejor, tampoco alguna interacción que mejore el proceso de estabilización de lodos del hato porcino.

5.5. RECOMENDACIONES

- La activación microbiana se realizó con microorganismos anaeróbicos, aplicados sobre lodos residuales sin tratar, por lo que se recomienda replicar esta investigación realizando un tratamiento previo a los lodos para eliminar microorganismos patógenos, esto con el fin de promover el desarrollo únicamente de los microorganismos degradadores de la materia orgánica.
- Mediante la evaluación de los indicadores se pudo obtener una idea del proceso de estabilización, sin embargo, los indicadores de coliforme fecales y relación C/N no fue posible medir de manera periódica, estudiar la evolución temporal de estos parámetros ayuda a determinar una tendencia en el proceso. Debido a esto, se recomienda realizar un análisis temporal del tratamiento T4 para los parámetros de coliformes fecales y relación C/N.
- El análisis de la varianza mostró que no hay ningún efecto en la aplicación de los tratamientos sobre el lodo residual del hato porcino. Por lo que se recomienda experimentar con otros factores, como el tipo de digestión (aerobia y anaerobia) y las condiciones de temperatura (mesofílica y termofílica) con el fin de encontrar un mejor tratamiento para los lodos residuales, con el fin de obtener lodos de Clase A.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Protección Ambiental. (2000). *Folleto de Tecnología de biosólidos. Aplicación de Biosólidos al terreno*. <https://nepis.epa.gov/Exe/tiff2png.cgi/>
- Aguero, S. D., García, S. R. y Gaete, M. C. (2018). Aporte de vitaminas y minerales por grupo de alimentos en estudiantes universitarios chilenos. *Nutrición Hospitalaria*, 28(3), 830-838. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.3.6397>
- Al-Gheethi, A., Efaq, A., Bala, J., Norli, I., Abdel, M. y Kadir, M. (2018). Removal of pathogenic bacteria from sewage-treated effluent and biosolids for agricultural purposes. *Applied Water Science*, 8(2), 74. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0698-6>
- Almeida, A., Elian, S. y Nobre, J. (2008). Modificações e alternativas aos testes de Levene e de Brown e Forsythe para igualdade de variâncias e médias. *Revista Colombiana de Estadística*, 31(2), 241-260.
- Amat, J. (2016). *Análisis de la homogeneidad de varianza (homocedasticidad)*. https://cienciadedatos.net/documentos/9_homogeneidad_de_varianza_homocedasticidad#Introducci%C3%B3n
- Amparo, B., y Betancur, W. (2019, abril 2). *Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras*. 14(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552019000100033&script=sci_arttext
- Apolo, V. (2019). *Diseño y emplazamiento de un biodigestor para el aprovechamiento de biogás en la granja de explotación porcina «Mis Tres Marías» Arenillas-El Oro-Ecuador*. 76.
- Araujo, L., Molina, S., y Noguera, L. (2018). Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción: Revisión bibliográfica. *Revista Agunkuyâa*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.33132/27114260.1231>

- Becerra, L. K., Horna, M. V., y Barrionuevo, K. I. (2019). Influencia de microorganismos nativos en el tratamiento de efluentes residuales de camales. *Revista Del Cuerpo Médico Hospital Nacional Almanzor Aguinaga Asenjo*, 8(1), 15-18. <https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2015.81.231>
- Bertici, R., Dicu, D., Herbei, M. y Sala, F. (2022). The Potential of Pig Sludge Fertilizer for Some Pasture Agricultural Lands' Improvement: Case Study in Timiș County, Romania. *Agronomy*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030701>
- Breda, A., Hummes, V., Silva, R. S. da, y Sánchez, A. (2021). El Papel de la Fase de Observación de la Implementación en la Metodología Estudio De Clases. *Bolema: Boletim de Educação Matemática*, 35, 263-288. <https://doi.org/10.1590/1980-4415v35n69a13>
- Calvo, D. A., Ravelo, M. R., Cadavid, C. A. P., & Gutiérrez-Montero, D. J. (2019). Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(2), Article 2. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555>
- Cárdenas, G. T. y Molina, F. P. (2022). *Alternatives to Treat Sludge from Sewage Treatment Plants: A Review | Ingeniería*. 27(3). <https://geox.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/17945>
- Casanoves, F., Balzarini, M., Di Rienzo, J., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. (2012). *User Manual*. Universidad Nacional de Córdoba. <https://www.infostat.com.ar/>
- Castillo, J. G. S., Saltos, L. D. B., Obando, M. B. V. y 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), Article 1. <https://doi.org/10.33936/riemat.v5i1.2499>
- Cattani, D. S. P. (2018). *ESTABILIZACIÓN DE LODOS ACTIVADOS PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS*

RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA
[Universidad de las Américas].
<https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/9033/1/UDLA-EC-TIAM-2018-11.pdf>

- Cedeño, G. A. G. y Pincay, L. E. P. (2019). *Elaboración de equipo piloto a escala para el tratamiento de lodos residuales para determinar el porcentaje de humedad y la eficiencia del método* [Thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas. Carrera de Ingeniería Civil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/42636>
- Cupe, B. E. F. y Juscamaita, J. G. M. (2018). Tratamiento de lodos residuales de una industria cervecera a través de fermentación homoláctica para la producción acelerada de abono orgánico. *Ecología Aplicada*, 17(1), 107-118. <https://doi.org/10.21704/rea.v17i1.1179>
- Dagnino, J. (2014). Análisis de Varianza. *Revista Chilena de Anestesia*, 5(43), 306-310.
- Delgado Arroyo, M. del M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L., Martín Sánchez, J. V., Delgado Arroyo, M. del M., Mendoza López, K. L., González, M. I., Tadeo Lluch, J. L. y Martín Sánchez, J. V. (2019). Evaluación del proceso de compostaje de residuos avícolas empleando diferentes mezclas de sustratos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 965-977. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15>
- Demirbas, A., Coban, V., Taylan, O. y Kabli, M. (2017). Aerobic digestion of sewage sludge for waste treatment. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(10), 1056-1062. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1289282>
- Diaz, F. D. (2020). *Remoción de fármacos emergentes en aguas residuales mediante un biorreactor con biomasa inmovilizada acoplado a un sistema de filtración con membranas sumergidas*. 93.
- Dominguez, V. (2021). *Eficiencia técnica y costo – eficiencia del vermicomposteo comparada con la estabilización aerobia y anaerobia de lodos residuales en México*. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/8744>

- Dominguez-Villanueva, J. E., Alcázar-Medina, F. A., Rosales, M. D. J.-R., Peña-Arellano, L. A. de la y Valencia-Vázquez, R. (2021). Co-digestión anaerobia de lodos residuales y estiércol porcino para mejorar la producción de biogás. *RINDERESU*, 5(2), Article 2. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/89>
- Durán, J., Cárdenas, M. y Balsa, L. (2020). Situación ambiental de las granjas porcinas inspeccionadas por el ministerio con competencia ambiental en el estado Táchira, Venezuela. *2020*, 44, 226.
- Ejarque, M., Barrionuevo, M., Zanovello, L. y Bartucci, S. (2019). *Prácticas y usos de los residuos pecuarios de productores familiares en un valle de la Patagonia Argentina*. 23(44). <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/10050>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2005). 2540-A. *Solids*. Standard methods for the examination of water and wastewater.
- ESPAC. (2021). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*. Ecuadorencifras. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/
- España, H., Gandarillas M., Quinteros, J., Ginocchio, R., Bas, F. y Arias, R. (2016). Efecto de la enmienda orgánica con lodos de cerdo sobre el establecimiento de *Lolium perenne* en relaves mineros. *Agro Sur*, 44(3), 41-52. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n3-05>
- Federación de Científicos Europeos de Osteopatía. (2014). *Las pruebas estadísticas*. Scientific European Federation Osteopaths. <https://www.scientific-european-federation-osteopaths.org/las-pruebas-estadisticas/>
- Fernández, P. y Vallejo, G. (1996). Diseño de medidas repetidas con dependencia serial en el error bajo la violación de la asunción de homogeneidad. *Anales de psicología*, 12(1), 87-106.

- Flores, P., Ocaña, J. y Sánchez, T. (2018). Verificación de supuestos en las pruebas de comparación de medias. Una revisión. *Ciencia Digital*, 2(4.1.), 5-22. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i4.1..187>
- Garibay, E. A. A. (2020). Aprovechamiento de lodos residuales provenientes de las PTAR para la reducción del impacto ambiental. *Repositorio Institucional* – UCS. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/1502>
- Gómez, E. L., Fernando-Navas, D., Aponte-Mayor, G. y Betancourt-Buitrago, L. A. (2014). *Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización.*
- Gualoto, J. (2016). *Propuesta de gestión de lodos residuales municipales. Caso de estudio: Planta de tratamiento de agua residual de la parroquia rural de nono* [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17066/1/CD-7650.pdf>
- Hanum, F., Yuan, L. C., Kamahara, H., Aziz, H. A., Atsuta, Y., Yamada, T. y Daimon, H. (2019). Treatment of Sewage Sludge Using Anaerobic Digestion in Malaysia: Current State and Challenges. *Frontiers in Energy Research*, 7. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2019.00019>
- Herrandiz, A. C., Bagué, T. B., Rondón, U. V., Herrandiz, A. C., Bagué, T. B. y Rondón, U. V. (2019). Actividades de extensión agraria: Contribución a la gestión ambiental de una finca en el sector cooperativo. *Cooperativismo y Desarrollo*, 7(3), 420-434.
- NTE INEN 1205-1. (2013). *Agua. Determinación del número total de bacterias en placa.* <https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE%20INEN%201205-1%20-%20AGUA.%20DETERMINACI%C3%93N%20DEL%20N%C3%9AMERO%20TOTAL%20DE%20BACTERIAS%20EN%20PLACAS.pdf>

- InfoStat. (2008). *InfoStat* (versión 2020) [R; Windows].
<https://repositorio.catie.ac.cr>
- Jhessica Daniela, M., Linda Jineth, V. L., Ivan Orlando, C. R. y Angelica Maria, S. N. (2020). *Desarrollo de un modelo empírico para el proceso de co-digestión anaerobia de estiércol de cerdo, lodos de depuradora, residuos sólidos orgánicos, residuos de la industria de bebidas embotelladas de fruta y residuos de la industria del cacao*. Universidad Santo Tomás.
<https://doi.org/10.15332/dt.inv.2020.01677>
- Jiménez, D. F. R. (2021). Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(1), Article 1.
<https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4305>
- Khnaijer, B., Cherkaoui, E., Khamar, M. y Nounah, A. (2020). Characterization of the residual sludge from the wastewater treatment plant of JERADA. *E3S Web of Conferences*, 150, 02004.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015002004>
- Langdon, P. N., Oviedo, C., Suazo Schwencke, A., Ramis Lanyon, F. y Delgado Neira, P. (2019). TECHNOLOGICAL AND MANAGEMENT ASPECTS OF THE ANAEROBIC CO-DIGESTION OF SEWAGE SLUDGE WITH VEGETABLE AND ORGANIC WASTES. *DYNA*, 94(1), 574-578.
<https://doi.org/10.6036/9079>
- Larreategui, E. y Banchón, C. (2014). Un modelo matemático para la reducción del tiempo de compostaje. *Enfoque UTE*, 5(2), 29-37.
<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v5n2.38>
- Liu, Y., Gao, M., Zhang, A. y Liu, Z. (2017). Strengthen effects of dominant strains on aerobic digestion and stabilization of the residual sludge. *Bioresource Technology*, 235, 202-210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.060>
- López, C. y Herrera, Y. (2018). *Aprovechamiento de lodos residuales para la elaboración de Biocompost*. 12(1), 12.

- López, F.-A. (2020). Agroextractivismo y racismo ambiental: La industria porcícola en el estado de Yucatán. *Geopauta*, 4(4), Article 4. <https://doi.org/10.22481/rg.v4i4.7718>
- López, L., Macías, B., Gracia, N., López, A. y Rivera, P. (2018). *Lodos residuales de origen doméstico: Disminución de coliformes fecales y Salmonella spp.* – *Ciencia UANL*. 91. <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=8189>
- Machuca, M. A. V., Soriano, J. R. E., González, J. V., Soto, J. L. M., Equihua, J. L. P. y Navia, M. M. (2019). *Terra Latinoamericana*, 37(3), 243-251. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.409>
- Mainsonnave, R. (2018). *Buenas prácticas de manejo y utilización de efluentes porcinos*. Ministerio de Agrindustria de la Nación. <https://www.magyp.gob.ar/>
- Manjarrés, E. H., Castellanos, J. M., Galvis, J. A. y Merchán, N. A. (2021). Uso de biosólidos en Colombia: Métodos de estabilización y aplicaciones a nivel agrícola. *I3+*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.24267/23462329.792>
- Martínez, A. de J. D., Castillo, J. del carmén J., Castillo, V. A. N. y Orgaz-Agüera, F. (2020). Aprovechamiento de los biosólidos procedentes de plantas de tratamiento de aguas urbanas en agricultura. Estudio de caso en República Dominicana. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 13(37), 12.
- Medina, M., Negrete, M. de la L., Gómez, F., Álvarez, D. y Conde, E. (2021, mayo 4). *LA APLICACIÓN DE LODOS RESIDUALES AFECTA, A CORTO PLAZO, LA BIOMASA MICROBIANA Y SU ACTIVIDAD EN SUELOS SÓDICOS*. 36(3). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992020000300577&script=sci_arttext
- Menéndez, C. y Dueñas, J. (2018). Los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales desde una visión no convencional. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(3), 97-107.
- Meneses Solis, T. E. y Cabrera Carranza, C. F. (2022). Importancia de la estabilización de lodos residuales para su valorización agrícola en el acondicionamiento del suelo. *Revista del Instituto de investigación de la*

Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 25(49), 103-113.
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i49.21447>

Meza, A. R. (2021). Métodos alternativos ante la violación de supuestos en diseños de experimentos factoriales. *Anales Científicos*, 82(2), 318-335.
<https://doi.org/10.21704/ac.v82i2.1795>

Meza Terbullino, G. F. (2023). Eficiencia de los microorganismos en la estabilización de lodos sépticos en en el distrito Huando 2021. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, 558-564.
<https://doi.org/10.52808/bmsa.8e7.632.027>

Mojica, D. V., González-Polo, M. y Beily, M. E. (2023). Evaluación del co-compostaje de lodos cloacales con pulpa de café, para su aprovechamiento en Costa Rica. *Yulök Revista de Innovación Académica*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.47633/yulk.v7i2.595>

Morales, E. (2020). Evaluación de la estabilidad de un digestor anaerobio termófilo | Revista de la Sociedad Química del Perú. *Revista de la sociedad química del Perú*, 86(2.).
<https://revistas.sqperu.org.pe/index.php/revistasqperu/article/view/285>

Muñoz, C. E. P., Molina, J. S. y Correa, M. A. (2022). Análisis y perspectivas del tratamiento anaerobio y el aprovechamiento de lodos biológicos en América Latina. *Revista EIA*, 19(38), 1-25.

Navarro, E. R., Polo, E. A. S., Ortega-Parra, A. J., Silva, O. N., Cruz-Montero, J. M., Salazar Montoya, E. O., Reynosa Navarro, E., Serrano Polo, E. A., Ortega-Parra, A. J., Navarro Silva, O., Cruz-Montero, J. M. y Salazar Montoya, E. O. (2020). Estrategias didácticas para investigación científica: Relevancia en la formación de investigadores. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(1), 259-266.

Noriega, J. P. J., Guzmán, J. M. G. y Aranguren, C. I. (2019). Reutilización de biosólidos generados en las plantas de tratamiento de agua residual para la reducción de impactos ambientales gracias a su reciclaje. Casos de estudio. *Semilleros*, 6(11), Article 11.

- NTE INEN 1205-1. (2013). *Agua. Determinación del número total de bacterias en placa*. <https://www.insistec.ec/images/insistec/02-cliente/07-descargas/NTE%20INEN%201205-1%20-%20AGUA.%20DETERMINACI%C3%93N%20DEL%20N%C3%9AMERO%20TOTAL%20DE%20BACTERIAS%20EN%20PLACAS.pdf>
- NTE INEN-ISO 5667. (2014). *Calidad de agua—Muestreo*.
- Núñez, L. (2017). *Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales* [Tesis de maestría, Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/a7be354b-d8aa-45f5-bdc4-ef2a0251d27b/content>
- Olan, S. M., Canepa, J. R. L. y Olivier, J. A. S. (2016). *Codigestión anaerobia de excretas generada en una granja porcina*. 79, 5.
- Ortiz, R. (2017, noviembre 21). *Estadística básica agronómica*. RPubS. <https://rpubs.com/Rortizdu/333014>
- Pacco, A., Vela, R., Miglio, R. y Quipuzco, L. (2018). *Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas*. 9(3). http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172018000300009
- Peñaherrera, M., Posligua, P., Villegas, E. y Banchon, C. (2018). Gravimetric Evolution During Sewage Sludge Biostabilization. *Journal of Ecological Engineering*, 19(5), 76-85. <https://doi.org/10.12911/22998993/91272>
- Pulgarín, C. (2023). *Evaluación del proceso de estabilización de la materia orgánica en el proceso de co-digestión anaerobia de lodos residuales con residuos de alimentos*. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/34306>
- Pulgarín-Muñoz, C. E. y Wills-Betancur, B. A. (2019). Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual

- mediante pacas biodigestoras. *Producción + Limpia*, 14(1), 33-45.
<https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a3>
- Ramírez-Alán, O. (2017). *Correlación y Regresión Lineal*. RPubS.
<https://rpubs.com/osoramirez/316691>
- Reinoso, A. M. C., Quizphi, E. C. C. y Oñate, M. P. O. (2020). Diseño e implementación de una PTAR por lodos activos a escala de laboratorio, Facultad de Ciencias Espoch. *Ciencia Digital*, 4(1), Article 1.
<https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i1.1119>
- Rodríguez-León, L. D., Ordoñez-Vásquez, K. M. y Quizhpe-Cordero, P. F. (2019). Estrategias para mitigar el impacto ambiental generado por la porcicultura hacia la contribución del desarrollo sostenible: Sitio Banasur, cantón Pasaje. *Polo del Conocimiento*, 4(8), 51.
<https://doi.org/10.23857/pc.v4i8.1043>
- Román, P., Martínez, M. y Pantoja, A. (2015). *Manual de Compostaje para el Agricultor.pdf* [Fao.org]. Plataforma de conocimientos sobre agricultura familiar. <https://www.fao.org/3/i3388s/i3388s.pdf>
- Salazar, O. N. C. (2021). *Evaluación de sistema de tratamiento de efluentes generados de una granja porcina con aireación y microorganismos activos en la comuna zapotal, provincia de santa elena* [Universidad Estatal Península de Santa Elena].
<https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6395/1/UPSE-TIA-2021-0101.pdf>
- Saldaña, R. E. y Castillo, J. K. G. (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), Article 1. <https://doi.org/10.22490/21456453.4504>
- Sampieri. (2014). Recuperado 12 de diciembre de 2022, de <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Sánchez, J. (2020). *Evaluación de Impacto Ambiental de los Desechos Sólidos Generados por la Granja Porcina, Artesanal Cantón Guayaquil*. 77.

- Sánchez, J. G. C., Saltos, L. D. B., Obando, M. B. V. y 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), Article 1. <https://doi.org/10.33936/riemat.v5i1.2499>
- Sánchez, M. T. (2022). Influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara—Lima 2021. *Universidad Continental*. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11365>
- Santos, S., Vinderola, G., Santos, L., Araujo, E., Santos, S., Vinderola, G., Santos, L. y Araujo, E. (2018). Biodisponibilidad de minerales que lados y no que lados: Una revisión sistemática. *Revista chilena de nutrición*, 45(4), 381-392. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182018000500381>
- Secretaría de Gobernación de México. (2005). *Norma oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005*. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Eje Económico – Plan Nacional 2021 – 2025* [Gubernamental]. <http://oportunidades.planificacion.gob.ec/Plan2125/eje-economico/>
- Silva, D. (2022). *Análisis de peligrosidad de lodos provenientes de aguas residuales de una industria textil y recomendaciones para disposición final* [Tesis de licenciatura, Universidad Central del Ecuador]. <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c44eb8eb-5742-4691-a94f-a34e29347f29/content>
- Solano, M. (2020). *DISEÑO DE UN SISTEMA COMPACTO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS URBANOS* [Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2020/12/TFG-NataliaSolanoHernandez.pdf>

- Statology. (2021). *How to Use Q-Q Plots to Check Normality*. How to Use Q-Q Plots to Check Normality. Statology. <https://www.statology.org/q-q-plot-normality/>
- Sutanapong, C. y Louangrath, P. (2018). *Descriptive and Inferential Statistics, VOL 1, NO 1.pdf*—*International Journal of Research & Methodology in Social Science Vol. 1, No. 1, p.22 (Jan. – | Course Hero*. Course Hero. <https://www.coursehero.com/file/51198944/Descriptive-and-Inferential-Statistics-VOL-1-NO-1pdf/>
- Telles, C., Granhen, C., Prado, B. y Ribeiro, M. (2002). Operation of a slow rate anaerobic digester treating municipal secondary sludge. *Electronic Journal of Biotechnology*, 5(3), 0-0. <https://doi.org/10.2225/vol5-issue3-fulltext-1>
- Toasa, M. I. C. (2018). *Estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante digestión anaerobia* [bachelorThesis, Quito: Universidad de las Américas, 2018]. <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/9840>
- Urquijo Odríguez, M. y Fontalvo Gómez, M. (2020). Hidrólisis enzimática del aceite de *Bactris guineensis* con fracciones del látex de *Carica papaya*: Estudio del efecto de la temperatura, ph y concentración del sustrato. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 18(2), 70. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(18\)70-81](https://doi.org/10.18684/BSAA(18)70-81)
- US EPA, O. (1993). *Biosolids Laws and Regulations* [Other Policies and Guidance]. <https://www.epa.gov/biosolids/biosolids-laws-and-regulations>
- Valdez, M., Bobadilla, Y., Garcia, R., Martinez, C. y Valencia, L. H. A. (2022). Influencia de la separación de agua residual porcina en fracciones sólida y líquida, en la producción de metano con lodo anaerobio granular y disperso. *Biocencia*, 24(1), Article 1. <https://doi.org/10.18633/biocencia.v24i1.1537>
- Valencia, L. H. Á., García Reyes, R. B., Ulloa Mercado, R. G., Arellano Gil, M., García González, A., Álvarez Valencia, L. H., García Reyes, R. B., Ulloa Mercado, R. G., Arellano Gil, M. y García González, A. (2019). Potencial

biotecnológico para la valorización de residuos generados en granjas porcinas y cultivos de trigo. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 7(21), 1-21.

Vásquez, T. (2023). *Diseño de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales porcinas en la finca Linda Vista en Santa Cruz de Turrialba* [Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2023/03/TFG-TatianaVasquezAlvarado.pdf>

Vela, R., Miglio, R. y Quipuzco, L. (2018). *Puesta en marcha de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales de la crianza intensiva de cerdos* | *Agroindustrial Science*. 8(2), 137-145.

Vicari, M. P. (2012). *Efluentes en producción porcina en Argentina: Generación, impacto ambiental y posibles tratamientos*. 86.

Zhang, Y. y Cuelgue, L. (2019). *Effects of temperature variation on wastewater sludge electro-dewatering—ScienceDirect*. 214, 873-880.

Zhang, Z., Liu, D., Qiao, Y., Li, S., Chen, Y. y Hu, C. (2021). Mitigation of carbon and nitrogen losses during pig manure composting: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 783, 147103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147103>

ANEXOS



Anexo. 1. Recolección de lodos provenientes del hato porcino.



Anexo. 2. Adición de cáscara de vegetales y cítricos.



Anexo. 3. Aplicación de microorganismos anaerobios de la compañía Biomerck Ar.



Anexo. 4. Monitoreo de temperatura y pH.



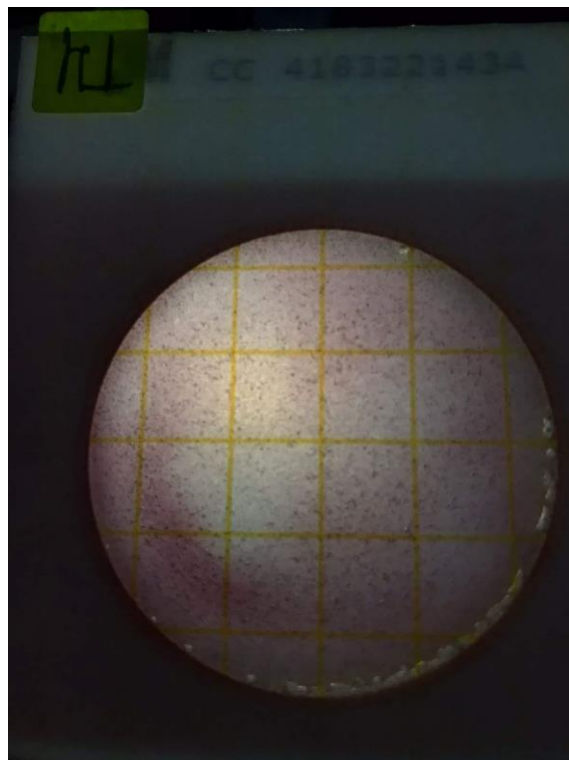
Anexo. 5. Proceso para la determinación de SV/ST



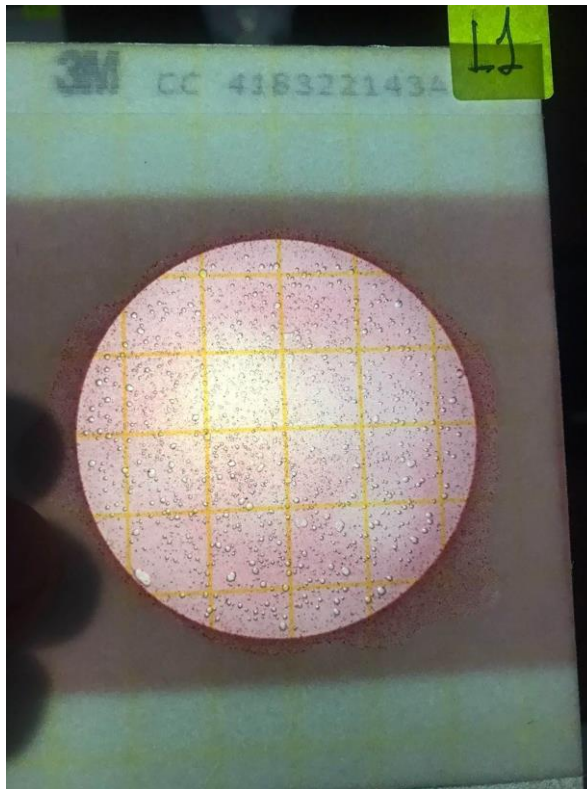
Anexo. 6. Pesaje de cápsulas en el proceso de cálculo de SV/ST.



Anexo. 7. Aplicación de muestra residual en placas Petrifilm para el análisis de coliforme fecales



Anexo. 8. Cuantificación de UFC de coliforme fecales en el T4



Anexo. 9. Cuantificación de UFC de coliforme fecales en el L1.



Anexo. 10. Entrega de muestras al laboratorio de la UDLA.