



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS



ESCUELA DE AGRICULTURA, SILVICULTURA, PESCA Y
VETERINARIA
CARRERA DE AGROINDUSTRIA

TRABAJO DE TITULACIÓN

Componente práctico del examen de carácter Complexivo, presentado al
H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito previo para obtener
el título de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

TEMA:

Comparación de tres tratamientos (aerobia, anaerobia y combinado)
para la descomposición de materia orgánica en la obtención de biogás
y biofertilizante en el Ecuador.

AUTOR:

Rodolfo Alexander Barragán Torres

TUTOR:

Ing. Enrique Salazar Llorente PhD.

Babahoyo – Los Ríos – Ecuador

2024

RESUMEN

Los residuos orgánicos a nivel mundial representan el 40% en este estudio se evalúan los diferentes tipos de descomposición aerobia, anaerobia y la combinada para constatar la eficacia de éstos a la hora de tener biogás y biofertilizantes a partir de residuos agroalimentarios, ganaderos, de jardinería y agrícolas, y los resultados muestran que la materia orgánica proveniente del residuo agroalimentario y los residuos ganaderos, son especialmente indicados para la digestión anaerobia, obteniendo biogás y biofertilizantes con un contenido muy alto de macro y micronutrientes, entre ellos, nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, que permiten mejorar de manera muy sustancial la fertilidad de los suelos, y además, con efectos muy positivos en la fertilidad de los suelos. La degradación anaerobia se divide en varias fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis, donde se descomponen las macromoléculas orgánicas y se transforman en biogás y en digestato. Por otro lado, el proceso en aerobiosis, contiene la glucólisis, ciclo de Krebs, y concluye con una producción de CO₂, agua, ATP, y además produce biofertilizantes con un alto contenido en macro y micronutrientes. En cuanto a la producción de biogás, el más eficiente resulta la co-digestión anaerobia, puesto que llega a producir diariamente 0,00128 m₃ de biogás por tonelada de materia prima, consiguiendo unas 0,008 m₃ en un plazo de quince días. La producción de biofertilizantes la co-digestión anaerobia, aunque la aerobia, consigue un mejor rendimiento, generando valores de 0,026 y 0,030 m₃ por tonelada de materia prima.

Palabras claves: *Descomposición, digestión, materia orgánica.*

SUMMARY

In this study, the different types of aerobic, anaerobic and combined decomposition are evaluated to verify their effectiveness in obtaining biogas and biofertilizers from agri-food, livestock, gardening and agricultural waste, and the results show that organic matter from agri-food waste and livestock waste, are particularly suitable for anaerobic digestion, obtaining biogas and biofertilizers with a very high content of macro and micronutrients, including nitrogen, phosphorus, potassium and calcium, which can substantially improve soil fertility, and also have very positive effects on soil fertility. Anaerobic degradation is divided into several phases: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, methanogenesis, where organic macromolecules are broken down and transformed into biogas and digestate. On the other hand, the process in aerobiosis, contains glycolysis, Krebs cycle, and concludes with a production of CO₂, water, ATP, and also produces biofertilizers with a high content of macro and micronutrients. As for biogas production, the most efficient is anaerobic co-digestion, since it produces 0.00128 m³ of biogas per ton of raw material per day, obtaining 0.008 m³ in a period of fifteen days. The production of biofertilizers the anaerobic co-digestion, although the aerobic one, achieves a better yield, generating values of 0.026 and 0.030 m³ per ton of raw material.

Key words: *Decomposition, digestion, organic matter.*

ÍNDICE

RESUMEN	II
SUMMARY	III
ÍNDICE	IV
INDICE DE TABLAS	VII
1. CONTEXTUALIZACION	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de la investigación	2
1.3 Justificación de la investigación.....	2
1.4 Objetivo de la investigación	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
1.5 Línea de investigación.....	3
2. DESARROLLO	4
2.1. Marco conceptual	4
2.1.1 Producción nacional de residuos orgánicos	4
2.1.2 Producción de biogás en el Ecuador	4
2.1.3 Residuo orgánico.....	5
2.1.4 Tipos de residuos orgánicos	5
2.1.5. Métodos de descomposición	5
2.1.5.1 Descomposición anaerobia	5
2.1.5.2 Metabolitos.....	7

2.1.5.3 Descomposición combinada.....	8
2.1.5.3.1 Proceso de Descomposición Combinada	8
2.1.6 Equipos donde se realiza la descomposición de materia orgánica	9
2.1.6.1 Biorreactor	9
2.1.6.2 Tanque fermentador aerobio y anaerobio	9
2.1.6.3 Biodigestor	10
2.1.7 Cambios bioquímicos y metabolitos.....	10
2.1.8 Biogás.....	11
2.1.8.1 Composición del biogás	11
2.1.9 Biofertilizante.....	12
2.1.9.1 Composición del biofertilizante	12
2.1.10 Parámetros físicos-químicos para una buena descomposición de materia orgánica.....	13
2.1.11 Métodos de extracción para la obtención de biogás y fertilizante	14
2.1.11.1 Digestión anaeróbica	14
2.1.11.2 Fase I: Hidrólisis	14
2.1.11.3 Principales microorganismos que intervienen.....	14
2.1.11.4 Metabolitos y Procesos Bioquímicos	15
2.1.11.5 Fase II: Acidogénesis.....	15
2.1.11.6 Principales microorganismos que intervienen.....	15
2.1.11.7 Metabolitos y Procesos Bioquímicos	15
2.1.11.8 Fase III: Acetogénesis	16
2.1.11.9 Principales microorganismos que intervienen.....	16

2.1.11.10 Metabolitos y Procesos Bioquímicos	16
2.1.11.11 Fase IV: Metanogénesis	16
2.1.11.12 Principales microorganismos que intervienen	17
2.1.11.13 Metabolitos y Procesos Bioquímicos	17
2.1.12 Co-digestión anaerobia	17
2.1.13 Digestión Aeróbica	17
2.1.13.1 Metabolitos y Procesos Bioquímicos	18
2.1.14 Producción de Biogás en diferentes países	18
2.2 Marco metodológico	20
2.3 Resultados	21
2.3.1 Resultados del objetivo específico 1	21
2.3.2 Resultados del objetivo específico 2	22
2.3.3 Resultados del objetivo específico 3	22
2.4 Discusión	23
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	25
3.1 Conclusiones.....	25
3.2 Recomendaciones.....	26
4. REFERENCIAS Y ANEXOS.....	27
4.1 Referencias bibliográficas	27
4.2 Anexos	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Microorganismos que intervienen en la descomposición anaerobia.	6
Tabla 2: Microorganismos que intervienen en la descomposición aerobia.	7
Tabla 3: Bacterias que intervienen en el proceso de descomposición de materia orgánica para la obtención de biogás y sus metabolitos.	11
Tabla 4: Microorganismos que intervienen en el proceso de descomposición de materia orgánica para la obtención de biofertilizante y sus metabolitos.	13
Tabla 5: Tipos de residuos.	18
Tabla 6: Métodos de descomposición para la obtención de biogás y biofertilizante.	19
Tabla 7: Rendimiento de biogás y biofertilizante según el método de extracción.	23

1. CONTEXTUALIZACIÓN

1.1 Introducción

Se generan grandes cantidades de desechos orgánicos a nivel global, siendo una parte importante de los residuos sólidos urbanos. Alrededor del 40% de los desechos que se generan a nivel mundial provienen de desechos orgánicos. Esto se traduce en más de 1.3 mil millones de toneladas de desechos orgánicos generados al año. Esta cantidad crece sin cesar, debido al aumento de la población y al desarrollo industrial, por ello, la gestión adecuada de estos desechos es esencial para paliar los efectos negativos que ocasiona (Mosquera & Sinisterra, 2022).

Hoy en día, en todo Ecuador se generan aproximadamente 5 millones de toneladas de basura, lo que da una idea del problema latente, poniendo sobre la mesa la gran cantidad de residuos generados en nuestro país, alrededor de las 14.000 toneladas que se generan al día. De todo este conjunto, más concretamente, el 56,2% de él se corresponde con la fracción que es orgánica, lo que implica de inmediato una serie de cuestiones relacionadas con la adecuada gestión que ha de hacerse de los mismos residuos, con la necesidad clara de implementar aquellas estrategias que abiertamente y de una forma práctica permitan su posterior tratamiento e, incluso en su caso, su valorización (Castallena, 2020).

La descomposición orgánica es el proceso natural por el cual los materiales orgánicos se descomponen gracias a la acción microscópica de bacterias, hongos y lombrices en él se puede dar en el suelo, en cuerpos de agua y también en sistemas artificiales como los biodigestores, bien de forma aeróbica (con oxígeno) o bien de forma anaeróbica (sin oxígeno) (Ojewumi *et al.*, 2020).

El biogás y biofertilizante se obtiene a través de la descomposición controlada de materia orgánica. El objetivo de esta investigación bibliográfica es la comparación de tres tratamientos

(aerobia, anaerobia y combinado) para la descomposición de materia orgánica en la obtención de biogás y biofertilizante.

1.2 Problema de la investigación

La inadecuada gestión de los desechos orgánicos a nivel global resulta en más de 1.3 millones de toneladas de residuos orgánicos al año, de los cuales una parte importante termina en vertederos, donde se descomponen anaeróbicamente, generando grandes cantidades de metano, un potente gas de efecto invernadero, y lixiviados contaminantes que pueden afectar el agua subterránea y los ecosistemas circundantes (Venegas *et al.*, 2023).

En Ecuador, un residente promedio de las zonas urbanas produce cerca de 0,9 Kg de desechos sólidos por día. De la totalidad de los desechos sólidos producidos en áreas urbanas y clasificados por los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM), el 55 % son residuos orgánicos y el 45 % son inorgánicos (INEC, 2021).

Por otra parte, la descomposición de materia orgánica en vertederos sin oxígeno produce metano y otros gases que contribuyen al efecto invernadero, lo que a su vez provoca el calentamiento global y el cambio climático (German *et al.*, 2023). Los residuos orgánicos mal gestionados atraer vectores de enfermedades, plagas y microorganismos patógenos, incrementando la probabilidad de transmisión de enfermedades, así como dificultades respiratorias por causa de la inhalación de gases tóxicos (Lema & Vega, 2023). Posteriormente para el manejo y disposición de estos residuos orgánicos se puede obtener biogás y biofertilizante, y así contribuir con la reducción de estos residuos en el medio ambiente.

1.3 Justificación

A nivel global y nacional se genera más de 1.3 millones de toneladas de desechos al año. Estos residuos incrementan la emisión de metano y lixiviados contaminantes, así como la atracción de plagas y enfermedades. En el marco de la transición hacia energías renovables y

prácticas agrícolas más ecologistas, esta revisión se presenta con la intención de identificar métodos que sean capaces de ser eficaces a la hora de incrementar la producción de biogás y biofertilizantes, con lo que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y se aboga por un sistema agrícola más ecológico. Una gestión responsable de estos residuos aporta beneficios a las comunidades, ya que se convierten en fuente de energía asequible y mejoran la eficacia de la actividad agrícola gracias al uso de biofertilizantes, puesto que se reduce la dependencia de los fertilizantes químicos de alto precio y se trata de proteger el medioambiente.

1.4 Objetivo de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Comparar tres tratamientos (aerobia, anaerobia y combinado) para la descomposición de materia orgánica en la obtención de biogás y biofertilizante en el Ecuador.

1.4.2 Objetivos específicos

- Contrastar que tipos de residuos orgánicos son más apropiados para cada método de descomposición (aerobia, anaerobia y combinada) en la generación de biogás y biofertilizante.
- Describir los diferentes métodos de descomposición (aerobia, anaerobia y combinada) utilizados para la producción de biogás y biofertilizante.
- Establecer que método de extracción es más favorable en cuanto al rendimiento para la obtención de biogás y fertilizante.

1.5 Línea de investigación

Dominio: Recursos agropecuarios, ambiente, biodiversidad y biotecnología.

Líneas: Desarrollo agropecuario, agroindustrial sostenible y sustentable.

Carrera: Agroindustria.

Sublínea: Procesos Agroindustriales

2. DESARROLLO

2.1. Marco conceptual

2.1.1 Producción nacional de residuos orgánicos

En Ecuador, el porcentaje de la producción de desperdicios es de índole orgánica con un porcentaje de un 60-70% del conjunto de la producción total de desechos en Ecuador, de acuerdo con la información ofrecida por el Ministerio del Ambiente de Ecuador y otros organismos del ámbito estatal que tienen la obligación de gestionar los residuos (Castallena, 2020).

En Ecuador, la provincia de Pichincha es la que genera más residuos orgánicos debido a que se trata de una región de alta densidad de población y de un desarrollo urbano. En lo que se refiere a residuos orgánicos, encontramos los restos de la comida, restos de jardinería y de cocina. Es el tipo de residuo que destaca por su volumen que representan un 40% a 60% de los residuos orgánicos en un área urbana. Por otro lado, las hojas, las ramas, la hierba o el césped y el resto de residuos de la jardinería están representados entre un 20% a 30% del total de los residuos orgánicos según la época del año y la actividad agraria. Por el contrario, en el caso de los restos de origen forestal, los porcentajes suelen encontrarse entre un 10% a 20% (Ministerio del Ambiente, 2020).

2.1.2 Producción de biogás en el Ecuador

Bajo la Dirección ejecutiva de Santiago Andrade el Gerente General de la Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP) señaló que Quito produce diariamente aproximadamente 2,000 toneladas de desechos, de los cuales, alrededor de 1,000 toneladas son orgánicos. Gracias a esta planta se produce biogás que está compuesto de gas metano (CH_4), que es 50 veces más contaminante que el CO_2 . Con la operación de la planta de tratamiento de desechos, se ha logrado mitigar al medio ambiente la liberación de 26 millones de metros cúbicos de biogás, lo cual equivale a evitar la emisión de 250,000 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) (Emgirs, 2020).

2.1.3 Residuo orgánico

Los residuos orgánicos son catalogados como materiales biológicos que son fácilmente descompuestos a través de la influencia de microorganismos. Tales elementos, derivados en su mayoría de la acción humana, engloban desechos que proceden de desperdicios de carácter alimenticio, de restos vegetales, de basuras agrícolas, y de purines (Xu *et al.*, 2023).

2.1.4 Tipos de residuos orgánicos

- Residuos de Cocina (como restos de alimentos, cáscaras de frutas y verduras, posos de café y cáscaras de huevo).
- Residuos Agrícolas (como restos de cultivos, tales como hojas, tallos de árboles; restos de cosechas y de poda de árboles).
- Residuos de Jardinería (como hojas, césped recogido, ramas de árboles y flores que se han marchitado).
- Residuos Ganaderos (como estiércol de animales y restos de alimentos)
- Residuos Forestales (como hojas de árboles que ya se han caído; ramas, troncos de árboles).
- Residuos de industrias agroalimentarias (como subproductos de la alimentación, como cáscaras de frutos secos, bagazo de caña de azúcar, pulpa de fruta).
- Residuos del tratamiento de aguas residuales (como lodos de depuradoras) (C. Castillo, 2021).

2.1.5. Métodos de descomposición

2.1.5.1 Descomposición anaerobia

Es un proceso mediante el cual los materiales orgánicos se descomponen por la acción de los microorganismos descomponedores y en condiciones de medio anaerobio y los microorganismos descomponedores usan una diversidad de mecanismos metabólicos para degradar materia orgánica (Indran *et al.*, 2021).

En la “tabla 1” muestra los microorganismos que intervienen en la descomposición anaerobia.

Tabla 1

Microorganismos que intervienen en la descomposición anaerobia.

Grupo de Microorganismo	Género y Especie
Bacterias anaerobias fermentativas	<i>Clostridium acetobutylicum</i>
Bacterias productoras de metano (metanogénicas)	<i>Bacteroides thetaiotaomicron</i> <i>Methanobacterium formicicum</i> <i>Methanosarcina acetivorans</i>
Bacterias acetogénicas	<i>Methanococcus maripaludis</i> <i>Acetobacterium woodii</i>
Bacterias desulfuradoras	<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>
Bacterias sulfato-reductoras	<i>Desulfotomaculum nigrificans</i>
Bacterias propionogénicas	<i>Propionibacterium freudenreichii</i>
Bacterias butiríferas	<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>

Fuente: Corrales *et al.* (2015).

2.1.5.1. Descomposición aerobia

Se trata de una respiración celular que se da en presencia de oxígeno. Teóricamente, la energía se produce a partir de la descomposición de los nutrientes aunque no siempre es así, y es esta energía la que se combina con el oxígeno, que interviene un papel receptora, formando dióxido de carbono y agua; aunque en ocasiones pueden aparecer metales pesados y otros compuestos; esto sucede en algunos vertederos donde se depositan residuos en bolsas de plástico, donde las condiciones salinas del vertedero favorecen algunas de estas sustancias (Carrillo *et al.*, 2021).

En la “tabla 2” muestra los microorganismos que intervienen en la descomposición aerobia.

Tabla 2

Microorganismos que intervienen en la descomposición aerobia.

Grupo de Microorganismo	Género y Especie
Bacterias aerobias	<i>Bacillus subtilis</i>
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Hongos	<i>Aspergillus niger</i>
	<i>Penicillium chrysogenum</i>
	<i>Trichoderma reesei</i>
Actinobacterias	<i>Streptomyces coelicolor</i>
	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>
	<i>Nocardia asteroides</i>

Fuente: Castillo, (2019).

Durante la hidrólisis de polímeros orgánicos complejos (como proteínas, lípidos y polisacáridos), estos últimos se desglosan en monómeros más sencillos (como aminoácidos, ácidos grasos y azúcares sencillos), los cuales procedentes de la hidrólisis se oxidan para liberar energía, y los aminoácidos se descomponen para eliminar los grupos amino. El resto de la glucosa y de otros compuestos intermedios se oxidan en el ciclo del ácido cítrico dando como producto CO₂, agua, y energía en forma de ATP. Los electrones que se liberan en la oxidación de los compuestos orgánicos se trasladan por la cadena de transporte de electrones que produce un gradiente de protones que se aprovecha para la síntesis de ATP (Morocho *et al.*, 2019).

2.1.5.2 Metabolitos

- Agua (H₂O).
- Dióxido de carbono (CO₂).
- Amoníaco (NH₃) (en la desaminación de aminoácidos).
- Glucosa y otros azúcares simples
- Aminoácidos
- Ácidos grasos

- Cetoácidos
- NADH y FADH₂
- Energía (ATP) (Morocho *et al.*, 2019).

2.1.5.3 Descomposición combinada

La descomposición combinada anaerobia y aerobia se refiere a un proceso de degradación de la materia orgánica en el que intervienen tanto organismos anaerobios como aerobios, en diferentes etapas o zonas del sistema (Martínez & Ortega, 2021).

2.1.5.3.1 Proceso de Descomposición Combinada

- **Degradación biológica y transformación**

La degradación biológica aeróbica en la fase inicial posibilita que los microorganismos reduzcan compuestos orgánicos complejos en compuestos más sencillos (CO₂, H₂O y calor), que hacen que la biodegradación anaerobia en la parte más profunda de los lechos biológicos tenga lugar.

- **Calor**

La producción de calor por la degradación biológica aumenta la temperatura y favorece la actividad de los microorganismos dando lugar a condiciones termofílicas (Álvarez *et al.*, 2021).

- **Cambio de condiciones anaeróbicas**

La falta de O₂ consume en las capas más profundas, el ambiente se vuelve anaerobio, la descomposición y producción de ácidos grasos volátiles siguen transformando compuestos orgánicos complejos en gases, alcoholes y ácidos grasos volátiles.

- **Etapas Anaerobia**

Formación de metano a través del metanógeno y la transformación de los ácidos grasos volátiles o de otros compuestos en metano y dióxido de carbono. Finalmente, tiene lugar la descomposición de los restos orgánicos aerobios y de la formación de biogás (CH_4 , CO_2) en procesos anaerobios, como el de los digestores (Álvarez *et al.*, 2021).

2.1.6 Equipos donde se realiza la descomposición de materia orgánica

2.1.6.1 Biorreactor

El biorreactor opera con la degeneración de sustancias orgánicas a través del uso de procedimientos controlados (Temperatura, pH, oxígeno disuelto, agitación y niveles de nutrientes) biológicos, físicos o químicos. Al degenerar sustancias orgánicas, los microorganismos degradan los elementos orgánicos, partiendo desde la descomposición, se trata de un tipo de reactor que provee las condiciones correctas (temperatura, pH, nutrientes y mezclado) con el objetivo de llevar a cabo efectivamente los microorganismos y obtener una descomposición correcta de los elementos orgánicos (Vargas, 2019).

2.1.6.2 Tanque fermentador aerobio y anaerobio

Un tanque fermentador es un equipo diseñado para trabajar con procesos biológicos que pueden requieren de oxígeno, como no. En concreto, en esta fermentación es el proceso por el cual los microorganismos son capaces de desintegrar materia orgánica con la finalidad de obtener distintos compuestos entre los que se halla el biogás y biofertilizantes.

La suma de estos dos procesos aerobia y anaerobia llevada a cabo en un en un tanque fermentador maximizará la mineralización de la materia orgánica, optimizará la eficiencia de generación de energía y acortará el tiempo de tratamiento de las aguas. El proceso comenzará con una fase aerobia primaria, donde intervienen los microorganismos como *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas aeruginosa* que mineralizan el CO_2 , agua y biomasa microbiana y al mismo tiempo que liberan calor. Posteriormente el sistema es purgado con gas inerte para eliminar el oxígeno

y para proseguir con la fase anaerobia donde los microorganismos como *Clostridium acetobutylicum* y arqueas metanogénicas mineralizan el resto de la materia en metano y CO₂ (Acura, 2023).

2.1.6.3 Biodigestor

Un biodigestor es un equipo de cierre que facilita la disgregación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos en un proceso anaeróbico, la descomposición de los microorganismos habilita la desintegración de la materia orgánica, el proceso puede hacerse desde diferentes materiales biodegradables como pueden ser restos de cosechas, excremento de animales o sobrantes de comida humana, de manera que se logre la obtención de biogás y bioabono como productos finales (Reascos *et al.*, 2022).

2.1.7 Cambios bioquímicos y metabolitos

1. Hidrólisis

- **Cambios:** Descomposición de macromoléculas en las unidades más simples.
- **Metabolitos:** Azúcares simples, aminoácidos, ácidos grasos.

2. Acidogénesis

- **Cambios:** Transformación de monómeros en ácidos grasos volátiles y de otros compuestos más simples.
- **Metabolitos:** Ácidos grasos volátiles, alcoholes, CO₂, hidrógeno.

3. Acetogénesis

- **Cambios:** Transformación de ácidos grasos volátiles y de alcoholes en acetato.
- **Metabolitos:** Acetato, hidrógeno, CO₂ (Guimarães & Maia, 2023).

4. Metanogénesis

- **Cambios:** Transformación de acetato y de CO₂+H₂ en metano y CO₂
- **Metabolitos:** Metano (CH₄) y (CO₂).

Productos finales

- **Biogás:** Mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) con trazas de otros gases. El metano es el componente más importante por convertirse en fuente de energía renovable.
- **Digestato:** Material sólido y líquido que resulta de la digestión anaerobia; rico en nutrientes y puede usarse como abono orgánico (Guimarães & Maia, 2023).

2.1.8 Biogás

El biogás es una fuente de energía renovable obtenida por la fermentación anaerobia de materia orgánica, que puede ser desechos agrícolas, estiércol de animales, lodos de depuradoras, desechos orgánicos urbanos. El biogás contiene metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), puede ser empleado como fuente de energía para producir energía eléctrica, calor o alcanzar energía mecánica como combustible para los vehículos (Kabeyi & Olanrewaju, 2022).

2.1.8.1 Composición del biogás

El biogás está compuesto, en su mayor parte, por metano (CH_4) (50-75%) y dióxido de carbono (CO_2) (25-50%), teniendo también otras sustancias a menor nivel: vapor de agua (0-10%), H_2S o azufre de hidrógeno (0-3%) y trazas de NH_3 (amoníaco), H_2 (hidrógeno), O_2 (oxígeno), N_2 (nitrógeno), cuya cantidad dependiendo del tipo de sustrato y régimen de operación (Venegas *et al.*, 2019).

En la “tabla 3” se muestra las bacterias que intervienen en el proceso de descomposición de materia orgánica para la obtención de biogás y sus metabolitos.

Tabla 3

Bacterias que intervienen en el proceso de descomposición.

Género y Especie	Metabolitos Principales
------------------	-------------------------

<i>Clostridium acetobutylicum</i>	Ácidos grasos volátiles (ácido acético, ácido butírico, ácido propiónico), hidrógeno (H ₂), dióxido de carbono (CO ₂)
<i>Clostridium thermocellum</i>	Ácidos grasos volátiles, acetato, hidrógeno (H ₂), dióxido de carbono (CO ₂)
<i>Methanobacterium formicicum</i>	Metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂)
<i>Methanobacterium thermoautotrophicum</i>	
<i>Syntrophomonas wolfei</i>	Ácidos grasos volátiles, acetato, hidrógeno (H ₂), dióxido de carbono (CO ₂)
<i>Syntrophomonas sapovorans</i>	
<i>Acetobacterium woodii</i>	Acetato, hidrógeno (H ₂), dióxido de carbono (CO ₂)
<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	Hidrógeno (H ₂), sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)
<i>Cloacibacterium normanense</i>	Ácidos grasos volátiles, acetato, hidrógeno (H ₂), dióxido de carbono (CO ₂)

Fuente: Carrillo *et al.*, (2021).

2.1.9 Biofertilizante

El biofertilizante se obtiene a través de la descomposición controlada de materia orgánica, como restos de plantas, estiércol animal o lodos de depuradoras. Contiene nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio, así como microorganismos beneficiosos. Su uso está orientado a mejorar la calidad del suelo, incrementar la producción agrícola y disminuir la necesidad de fertilizantes químicos (Chew *et al.*, 2019).

2.1.9.1 Composición del biofertilizante

En el biofertilizante es probable que encontremos macroelementos como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y también microelementos como el calcio (Ca), magnesio (Mg), y azufre (S). Se espera que, además de esto, cuente con material orgánica la cual mejora en gran medida la estructura del suelo y su capacidad de retener el agua, microorganismos beneficiosos para la salud del suelo y el desarrollo de las plantas, así como ácidos húmicos que ayudan a la absorción de nutrientes. La composición del biofertilizante puede cambiar según el tipo de sustrato

(estiércol animal, residuos vegetales, compost, restos de cosechas, e incluso residuos agroindustriales como bagazo de caña o vinazas), que se haya utilizado y según las condiciones en las que se haya realizado el proceso de digestión (Ramírez *et al.*, 2023).

En la “tabla 4” se muestra los microorganismos que intervienen en el proceso de descomposición de materia orgánica para la obtención de biofertilizante y sus metabolitos.

Tabla 4

Microorganismos que intervienen en el proceso de descomposición.

Género y Especie	Metabolitos Principales
<i>Rhizobium leguminosarum</i>	Nodulinas, ácido láctico, ácido succínico
<i>Azotobacter chroococcum</i>	Ácido indolacético, ácido giberélico, sideróforos
<i>Glomus intraradices</i>	Glucanos, aminoácidos, vitaminas
<i>Bacillus subtilis</i>	Fito hormonas, enzimas degradadoras, sideróforos
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Sideróforos, antibióticos, enzimas degradadoras
<i>Trichoderma harzianum</i>	Celulasas, quitinasas, metabolitos antagónicos

Fuente: Guardiola *et al.*, (2023).

2.1.10 Parámetros físicos-químicos para una buena descomposición de materia orgánica

- **pH:** 7
- **Potencial redox:** Entre -220 mV y -350 mV
- **Temperatura:** Psicrófilico 25 °C (*Pseudomonas aeruginosa* *Pseudomonas fluorescens*), Mesófilo 45 °C (*Bacillus subtilis*) y Termófilo 80 °C (*Thermus aquaticus* y *Geobacillus thermoglucosidasius*).
- **Humedad:** El rango óptimo de humedad se encuentra entre el 70 y el 80%
- **Relación C/N:** La relación C/N óptima es de 30:1, es decir, la materia orgánica cuenta con 30 veces más carbono que nitrógeno (Luna *et al.*, 2023).

2.1.11 Métodos de extracción para la obtención de biogás y fertilizante

Para la extracción de biogás se realiza a través de la digestión anaeróbica de materia orgánica la cual se lleva a cabo en 4 fases que han sido estudiadas bien bioquímicamente como microbiológicamente.

2.1.11 Digestión anaeróbica

2.1.11.1. Fase I: Hidrólisis

Para que la digestión empiece, los materiales orgánicos tienen que traspasar una pared celular; agentes hidrolíticos que actúan en forma de enzimas extracelulares (celulasas, xilanasas, amilasas y pectinasas) transforman la materia polimérica en compuestos orgánicos solubles, esta fase es crítica y se puede ver influenciada por factores externos como el pH, la composición bioquímica del sustrato o la temperatura (Suárez *et al.*, 2019).

2.1.11.2. Principales microorganismos que intervienen

Bacterias

- *Clostridium thermocellum*
- *Cellulomonas fimi*
- *Bacteroides thetaiotaomicron*

Hongos

- *Trichoderma reesei*
- *Aspergillus niger*
- *Neurospora crassa* (Tonato, 2019).

2.1.11.3. Metabolitos y Procesos Bioquímicos

- Descomposición de macromoléculas orgánicas (proteínas, lípidos, carbohidratos) en moléculas más pequeñas (monómeros).
- Producción de aminoácidos, ácidos grasos, monosacáridos, y otros compuestos simples.
- Actividad de enzimas hidrolíticas.
- Liberación de oligosacáridos, polisacáridos, lípidos y proteínas (Muñoz *et al.*, 2020).

2.1.11.4. Fase II: Acidogénesis

En la acidogénesis se transforman las moléculas solubles en compuestos más sencillos (hidrógeno, ácidos grasos volátiles (fórmico, propiónico, láctico, etc.) que consumen los metanógenos; además, los microorganismos consiguen eliminar cualquier resto de oxígeno del proceso de la digestión (Castro *et al.*, 2020).

2.1.11.5. Principales microorganismos que intervienen

- *Clostridium acetobutylicum*
- *Bacteroides fragilis*
- *Lactobacillus acidophilus*
- *Enterococcus hirae* (Tonato, 2019).

2.1.11.6. Metabolitos y Procesos Bioquímicos

- Fermentación de los productos de la fase I por bacterias acidogénicas.
- Producción de ácidos orgánicos de cadena corta (acetato, propionato, butirato, lactato, etc.).
- Acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV).

- Reducción del pH debido a la acumulación de ácidos (Muñoz *et al.*, 2020).

2.1.11.7. Fase III: Acetogénesis

En la acetogénesis las bacterias transforman los compuestos que han quedado sin descomposición de las fases anteriores como pueden ser los ácidos grasos, el etanol, compuestos aromáticos y los convierten en compuestos más sencillos, o sea, en acetato e hidrógeno (Ignatowicz *et al.*, 2023).

2.1.11.8. Principales microorganismos que intervienen

- *Acetobacterium woodii*.
- *Syntrophobacter fumaroxidans* (Tonato, 2019).

2.1.11.9. Metabolitos y Procesos Bioquímicos

- Conversión de ácidos orgánicos (principalmente acetato) a compuestos más simples.
- Producción de CO₂, H₂ y ácidos grasos de cadena corta como acetato.
- Participación de bacterias acetogénicas en la oxidación incompleta de ácidos orgánicos (Castro *et al.*, 2020).

2.1.11.10. Fase IV: Metanogénesis

Y en la fase final, en la metanogénesis se transfieren a partir de los compuestos que hasta ese momento se han ido generando para transformarlos en metano en el proceso de la digestión anaerobia. Del metano que se ha producido en el biodigestor el 70% proviene de la descarboxilación del acetato y ácido acético. Ya que sólo dos familias bacterianas son las que pueden llevar a cabo su descomposición (Atelge *et al.*, 2021).

2.1.11.11. Principales microorganismos que intervienen

- *Methanosarcina acetivorans*
- *Methanococcus maripaludis*
- *Methanothermobacter thermoautotrophicus* (Tonato, 2019).

2.1.11.12. Metabolitos y Procesos Bioquímicos

- Conversión de productos de la fase III (principalmente CO₂ e H₂) en metano (CH₄).
- Actuación de microorganismos metanogénicos (*Methanosarcina*).
- Producción de metano como producto final.
- Reducción de la acumulación de H₂ para mantener el equilibrio redox (Castro *et al.*, 2020).

2.1.12 Co-digestión anaerobia

Es un método de extracción que se basa en la digestión común de dos o más sustratos de orígenes distintos y composiciones diferentes, lo que enriquece el aporte de nutrientes equilibrando, por tanto, las características fisicoquímicas del sustrato permite optimizar la estabilización del sistema y el rendimiento del biogás sea mayor (Benítez *et al.*, 2020).

2.1.13 Digestión Aeróbica

La digestión aeróbica es un tratamiento de residuos orgánicos que se caracteriza por la destrucción de estos materiales por acción de microorganismos presentes en el aire (principalmente bacterias) en ausencia de oxígeno. Supone una oxidación de los mismos por parte de estos microorganismos, que tienen una amplia capacidad de degradación, y que convierten la materia orgánica en compuestos más sencillos, lo que redundará en una disminución

del potencial contaminante de los residuos (porque los residuos orgánicos son transformados en CO₂ y H₂O principalmente), y en un aumento del volumen de la masa viva (Sánchez *et al.*, 2022).

2.1.13.1 Metabolitos y Procesos Bioquímicos

- Oxidación completa de la materia orgánica por microorganismos aeróbicos (principalmente bacterias y hongos).
- Descomposición de compuestos orgánicos complejos (proteínas, lípidos, carbohidratos) en CO₂, H₂O y otros compuestos.
- Producción de energía en forma de ATP mediante el ciclo de Krebs y la fosforilación oxidativa.
- Liberación de calor durante la respiración aeróbica.
- Conversión de glucosa y otros monosacáridos en piruvato mediante la glucólisis.
- Oxidación completa del piruvato a CO₂ y H₂O en el ciclo de Krebs.
- Producción de NADH y FADH₂ como transportadores de electrones.
- Reducción del NAD⁺ y FAD a NADH y FADH₂ durante la cadena de transporte de electrones.
- Síntesis de ATP mediante la fosforilación oxidativa en la membrana mitocondrial.
- Eliminación de productos finales como CO₂ y H₂O (Castro *et al.*, 2020).

2.1.14 Producción de Biogás en diferentes países

- **Alemania:** Alemania es uno de los líderes en la producción de biogás en Europa. El país ha desarrollado una infraestructura robusta para la generación de biogás a partir de residuos orgánicos y agrícolas.

- **Capacidad de Producción:** Alemania tiene más de 10,000 plantas de biogás, que generan aproximadamente 1.5 TWh de electricidad al año.
- **Estadísticas:** En 2022, Alemania produjo alrededor de 1,6 millones de toneladas de biogás.
- **Políticas:** Alemania implementa la Ley de Energías Renovables (EEG), que incentiva la producción de biogás mediante tarifas fijas para la energía generada (Martínez *et al.*, 2021).
- **Holanda:** Holanda ha estado avanzando en la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, especialmente en el sector agrícola y de gestión de residuos.
- **Capacidad de Producción:** El país cuenta con más de 50 plantas de biogás que generan electricidad y calor a partir de residuos orgánicos.
- **Estadísticas:** En 2022, la producción de biogás en Holanda fue de aproximadamente 0,5 TWh.
- **Políticas:** Holanda ha implementado políticas que incluyen subsidios y tarifas de alimentación para fomentar la producción de biogás, así como objetivos nacionales de reducción de emisiones (Manager, 2019).
- **España:** España ha ido desarrollando su infraestructura de biogás en los últimos años, con un enfoque en la valorización de residuos agrícolas y municipales.
- **Capacidad de Producción:** España tiene cerca de 90 plantas de biogás y está aumentando la capacidad de generación.
- **Estadísticas:** En 2022, España produjo alrededor de 0,7 TWh de biogás.
- **Políticas:** España promueve la generación de biogás a través de incentivos en el marco del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), que incluye objetivos para las energías renovables (Carpio, 2023).

- **Suecia:** Suecia también ha implementado un sistema avanzado para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos.
- **Capacidad de Producción:** Suecia cuenta con más de 30 plantas de biogás, muchas de ellas centradas en la gestión de residuos municipales y agrícolas.
- **Estadísticas:** En 2022, Suecia produjo aproximadamente 0,4 TWh de biogás.
- **Políticas:** Suecia tiene políticas robustas para la producción de biogás, incluyendo incentivos fiscales y subsidios para la instalación de plantas de biogás. El país también tiene un objetivo para aumentar el uso de biogás como combustible para transporte (Castillo, 2023).

2.2 Marco metodológico

Esta investigación se basa en el método exploratorio que consiste en una revisión bibliográfica sistemática, centrándose en la recopilación de gestores bibliográficos relevante de los últimos 5 años. Se analizaron libros, revistas, artículos científicos, revistas científicas, tesis de pregrado, tesis de posgrado y páginas web.

2.3 Resultados

2.3.1 Resultados del objetivo específico 1

La “tabla 5” muestra que los residuos agroalimentarios y ganaderos son ideales para producir biogás mediante digestión anaerobia, una fuente de energía renovable. Los residuos de jardinería y agrícolas son más adecuados para obtener biofertilizantes, mejorando la fertilidad del suelo. Los biofertilizantes resultantes de la digestión anaeróbica de residuos agroindustriales y ganaderos contienen nutrientes esenciales, promoviendo una agricultura sostenible y eficiente.

Tabla 5

Tipos de residuos.

Tipo de residuo	Método de descomposición	Obtención	Referencias
Residuos de Cocina (como restos de alimentos, cáscaras de frutas y verduras, posos de café y cáscaras de huevo).	Anaerobia	Biogás y biofertilizante	(Luna <i>et al.</i> , 2023)
Residuos Ganaderos (como estiércol de animales)	Anaerobia	Biogás	(Tonato, 2019)
Residuos Agrícolas (como restos de cultivos, tales como hojas, tallos de árboles; restos de cosechas y de poda de árboles).	Aerobio y anaerobio	Biofertilizantes	(Viteri, 2020)
Residuos de Jardinería (como hojas, césped)	Aerobio	Biofertilizantes	(Castillo, 2021)

2.3.2 Resultados del objetivo específico 2

En la “tabla 6” se muestra que la digestión anaerobia y el proceso aerobio son métodos eficientes para extraer biogás y biofertilizantes. En la digestión anaerobia, se degradan macromoléculas en fases sucesivas, produciendo biogás. En el proceso aerobio, se catabolizan sustratos a través de la glucólisis y el ciclo de Krebs, generando CO₂, agua y ATP. Ambos procesos ofrecen beneficios como la reducción de contaminación y la obtención de biofertilizantes ricos en nutrientes esenciales.

Tabla 6

Métodos de descomposición para la obtención de biogás y biofertilizante.

Métodos de descomposición	Descripción	Factores/resultados	Referencias
Digestión Anaeróbica (Hidrolisis)	Enzimas extracelulares transforman materia polimérica en compuestos solubles.	Influenciada por pH, composición bioquímica y temperatura.	(Suárez <i>et al.</i> , 2019)
Digestión Anaeróbica (Acetogénesis)	Bacterias transforman ácidos grasos y etanol en acetato e hidrógeno.	Producción de acetato e hidrógeno.	(Ignatowicz <i>et al.</i> , 2023)
Digestión Anaeróbica (Metanogénesis)	Transformación final en metano a partir de acetato y ácido acético.	70% del metano proviene de descarboxilación.	(Atelge <i>et al.</i> , 2021)
Digestión Aeróbica	Microorganismos oxidan residuos orgánicos, convirtiéndolos en CO ₂ y H ₂ O.	Reducción del potencial contaminante.	(Sánchez <i>et al.</i> , 2022)

2.3.3 Resultados del objetivo específico 3

En la “tabla 7” se muestra que método de extracción es más favorable en cuanto al rendimiento para la obtención de biogás y fertilizante. La co-digestión anaerobia tiene el mayor rendimiento en biogás, produciendo 0,008 m³ por tonelada en 15 días. Para biofertilizantes, la

co-digestión anaerobia genera 0,018 m³ por tonelada en 9 días. Sin embargo, la digestión aerobia supera a la co-digestión en la producción total de biofertilizantes, con rendimientos de 0,026 y 0,030 m³ por tonelada para los dos procesos analizados.

Tabla 7

Rendimiento de biogás y biofertilizante según el método de extracción.

Método de extracción	Obtención	Producción de biogás (m³)	Días	Toneladas	Referencias
Co-digestión anaerobia	Biogás	0,00128	15	0,008	(Viteri, 2020)
Digestión anaeróbica	Biogás	0,000300	13	0,008	(Viteri, 2020)
Digestión anaeróbica	Biogás	0,000274	11	0,008	(Viteri, 2020)
Co-digestión anaerobia	Digestato (biofertilizante)	0,05	9	0,018	(Luna <i>et al.</i> , 2023)
Digestión Aeróbica	Biofertilizante	0,074	13	0,026	(Arguelles <i>et al.</i> , 2023)
Digestión Aeróbica	Biofertilizante	0,1	10	0,035	(Rodríguez, 2019)

2.4 Discusión

Los residuos de origen animal, como el estiércol, contienen una gran cantidad de materia orgánica fácilmente biodegradable, lo que facilita su conversión en biogás mediante procesos de digestión anaerobia estos residuos son propicios para ser valorizados para la obtención de biogás.

Los residuos agrícolas, agroalimentarios y ganaderos como las cascaras de frutas, vegetales y estiércol mediante una digestión combinada tanto aerobia como anaerobia son una fuente propicia para la obtención de biofertilizante, ya que se obtienen grandes rendimientos y son ricas en nutrientes como el fósforo, potasio y nitrógeno que benefician la estructura del suelo, retención de agua y promueve la actividad de los microorganismos.

La fase de hidrólisis en el proceso de digestión anaerobia ya que las enzimas hidrolíticas descomponen las macromoléculas orgánicas en aminoácidos, ácidos grasos y monosacáridos esta fase permite preparar estos compuestos para la fermentación en la fase de acidogénesis donde intervienen las bacterias acidogénicas, produciendo ácidos orgánicos de cadena corta como acetato y propionato, mientras sostiene que la fase de acetogénesis se obtienen los ácidos orgánicos como acetato, CO_2 e H_2 , en la siguiente etapa inicia la producción de biogás en la fase de metanogénesis, donde las arqueas metanogénicas utilizan estas sustancias para producir metano y CO_2 , lo que finalmente resulta en una gran producción de biogás y el resultante del proceso, que es el digestato se obtiene un biofertilizante rico en nutrientes como fosforo, y nitrógeno.

La co-digestión anaerobia produjo $0,00128 \text{ m}^3$ de biogás por día y por cada tonelada de materia prima, durante 15 días, por otro lado, la digestión aerobia puede generar hasta $0,028 \text{ m}^3$ de biofertilizante por tonelada en un proceso de 12 días, mientras que la digestión anaerobia produce un total de $0,015 \text{ m}^3$ de digestato por tonelada en 7 días.

3 . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Conclusiones

Los resultados indican que tanto la digestión anaeróbica como el proceso aeróbico son métodos efectivos para la producción de biogás y biofertilizantes, aunque cada uno tiene ventajas específicas según el tipo de residuo y el producto deseado. Los residuos agroalimentarios y ganaderos son ideales para la digestión anaeróbica, que permite obtener biogás y biofertilizantes con alta eficiencia. En contraste, los residuos agrícolas y de jardinería son más adecuados para la digestión aeróbica, destacándose en la producción de biofertilizantes que mejoran la fertilidad del suelo.

La co-digestión anaeróbica ha mostrado el mayor rendimiento en la producción de biogás, con una generación de 0,008 m³ por tonelada en 15 días, mientras que, para biofertilizantes, la digestión aeróbica es superior, alcanzando hasta 0,035 m³ por tonelada en 10 días. Estos hallazgos subrayan la eficacia de la co-digestión anaeróbica para biogás y la digestión aeróbica para biofertilizantes, destacando la importancia de seleccionar el método adecuado basado en el tipo de residuo y el objetivo de producción. Ambos procesos contribuyen significativamente a la reducción de contaminación y al desarrollo de prácticas agrícolas sostenibles, mejorando así la gestión de residuos y la calidad del suelo.

La implementación adecuada de estos métodos puede optimizar la producción de biogás y biofertilizantes, fomentando un enfoque más integrado y eficiente para la valorización de residuos orgánicos en diversas aplicaciones agrícolas y energéticas.

3.2 Recomendaciones

En base a las conclusiones expuesta se recomienda los siguiente:

- Introducir la co-digestión anaerobia en industrias agroalimentarias y ganaderías para así contribuir a una mayor producción de biogás. Aprovechará la armonía de los diferentes tipos de restos orgánicos y ello servirá para incrementar la eficacia y la generación de energía renovable.
- Mejorar el desarrollo de la digestión aerobia en la obtención de biofertilizantes a partir de restos de jardín y agrícolas. Es un modo más óptimo desde el punto de vista de la cantidad de biofertilizante que se obtiene y, además, acentuará el grado de la fertilidad del suelo.
- Capacitar a los agricultores sobre las ventajas del uso de biogás y de biofertilizantes procedentes de restos orgánicos. Esto fomentará la realización de labores agrícolas más sostenibles y eficaces.
- Impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas en el campo de la digestión anaerobia y la digestión aerobia a fin de mejorar la eficacia de la producción de biogás y de biofertilizantes. Innovaciones en este campo podrían reflejarse en mejores rendimientos y menores costes de operación.
- Llevar a cabo la implementación y el fomento de programas de gestión integrada de los restos que permitan una separación y una recolección de los restos procedentes de la industria agroalimentaria, ganadera, forestal y agrícola. Será la garantía de que se disponga de materiales con regularidad para la producción de biogás y biofertilizantes.

4 . REFERENCIAS Y ANEXOS

4.1 Referencias

Acura, G. (2023, diciembre 11). *Biorreactores o fermentadores industriales: Tipos y características*. Grupo Acura. <https://grupoacura.com/es/blog/biorreactores/>

Álvarez-Sánchez, A. R., Llerena-Ramos, L. T., Reyes-Pérez, J. J., Álvarez-Sánchez, A. R., Llerena-Ramos, L. T., & Reyes-Pérez, J. J. (2021). Efecto de sustancias azucaradas en la descomposición de sustratos orgánicos para la elaboración de compost. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.916>

Arguelles, C. W., Pintor, D. C. A., Mesinas, C. M., Márquez, H. L., & Becerra, E. V. (2023). Obtención de biofertilizantes enriquecidos en biodigestores semicontinuos a nivel laboratorio. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 5241-5258. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4827

Atelge, M. R., Senol, H., Mohammed, D., Hansu, T. A., Krisa, D., Atabani, A., Eskicioglu, C., Muratçobanoğlu, H., Unalan, S., Slimane, K., Azbar, N., & Kivrak, H. D. (2021). A critical overview of the state-of-the-art methods for biogas purification and utilization processes. *Sustainability (Switzerland)*, 13(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su132011515>

Benítez Fonseca, M., Abafos Rodríguez, A., Rodríguez Pérez, S., Ramírez Vives, F., Benítez Fonseca, M., Abafos Rodríguez, A., Rodríguez Pérez, S., & Ramírez Vives, F. (2020). Co-digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y su lixiviado. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 22(2), 70-81. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n2.70345>

- Carpio, J. (2023). *Biogás | Idae*. Gobierno de España. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>
- Carrillo-Reyes, J., Buitrón, G., Arcila, J. S., & López-Gómez, M. O. (2021). Thermophilic biogas production from microalgae-bacteria aggregates: Biogas yield, community variation and energy balance. *Chemosphere*, 275, undefined-undefined. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129898>
- Carrillo-Sancen, G., Cuautle-Marin, M. A., Martínez-Valdez, F. J., Saucedo-Castañeda, G., Komilis, D., Carrillo-Sancen, G., Cuautle-Marin, M. A., Martínez-Valdez, F. J., Saucedo-Castañeda, G., & Komilis, D. (2021). Tasa de aireación de la degradación aerobia en la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(7), 1149-1159. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2760>
- Castallena, J. (2020). *Ecuador impulsa la gestión adecuada de residuos orgánicos en las ciudades – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-impulsa-la-gestion-adecuada-de-residuos-organicos-en-las-ciudades/>
- Castillo, A. (2023). *El exitoso proyecto de la región sueca de Skåne para eliminar el uso de combustibles fósiles | Euronews*. <https://es.euronews.com/my-europe/2023/05/22/el-exitoso-proyecto-de-la-region-sueca-de-skane-para-eliminar-el-uso-de-combustibles-fosil>
- Castillo, C. (2021, julio 21). *Clasificación de los residuos – Planetica* [Planetica]. <https://planetica.org/clasificacion-de-los-residuos/>

- Castillo, J. (2019, noviembre 26). Microorganismos y nutrientes en el suelo. *Innovatione*.
<https://innovatione.eu/2019/11/26/microorganismos-del-suelo-2/>
- Castro Rivera, R., Solís Oba, M. M., Chicatto Gasperín, V., Solís Oba, A., Castro Rivera, R., Solís Oba, M. M., Chicatto Gasperín, V., & Solís Oba, A. (2020). PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO Y RESIDUOS DE COSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(3), 529-539. <https://doi.org/10.20937/rica.53545>
- Chew, K. W., Chia, S. R., Yen, H. W., Nomanbhay, S., Ho, Y. C., & Show, P. L. (2019). Transformation of biomass waste into sustainable organic fertilizers. *Sustainability (Switzerland)*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su11082266>
- Corrales, L. C., Antolínez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: Procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55-81.
- EMGIRS. (2020). *Quito se destaca en el Ecuador al producir energía eléctrica de la basura*. Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP). <https://emgirs.gob.ec/index.php/julio/45-travels-3/398-quito-se-destaca-en-el-ecuador-al-producir-energia-electrica-de-la-basura>
- German, S. J. S., Torres, J. D. A., Garcés, A. R., & Oviedo, M. E. D. (2023). Evaluación energética de la formación de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario mediante el modelo LandGEM. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.17081/invinno.11.2.6373>

- Guardiola-Márquez, C. E., Santos-Ramírez, M. T., Figueroa-Montes, M. L., Cobos, E. O. V. los, Stamatis-Félix, I. J., Navarro-López, D. E., & Jacobo-Velázquez, D. A. (2023). Identification and Characterization of Beneficial Soil Microbial Strains for the Formulation of Biofertilizers Based on Native Plant Growth-Promoting Microorganisms Isolated from Northern Mexico. *Plants*, 12(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/plants12183262>
- Guimarães, C. de S., & Maia, D. R. da S. (2023). Development of Anaerobic Biodigester for the Production of Biogas Used in Semi-Continuous System Bioprocesses: An Efficient Alternative for Co-Digestion of Low Biodegradability Biomass. *Biomass (Switzerland)*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/biomass3010002>
- Ignatowicz, K., Filipczak, G., Dybek, B., & Wałowski, G. (2023). Biogas Production Depending on the Substrate Used: A Review and Evaluation Study—European Examples. *Energies*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/en16020798>
- Indran, S., Divya, D., Rangappa, S. M., Siengchin, S., Christy, P. M., & Gopinath, L. R. (2021). Perspectives of anaerobic decomposition of biomass for sustainable biogas production: A Review. *E3S Web of Conferences*, 302, undefined-undefined. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130201015>
- INEC. (2021). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Residuos Sólidos 2021*. [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentaci%C3%B3n%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20\(R%20Rev%20CGTPE\)%20\(R%20Dicos\).pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2021/Residuo_solidos_2021/Presentaci%C3%B3n%20residuos%202021%20v07JA_CGTP%20(R%20Rev%20CGTPE)%20(R%20Dicos).pdf)

- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Technologies for biogas to electricity conversion. *Energy Reports*, 8, 774-786. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.007>
- Lema, S., & Vega, K. (2023). "Sistema de gestión de los residuos orgánicos generados en los mercados del Cantón Saquisilí Provincia de Cotopaxi año 2023" [Tesis de pregrado (Título de Ingenieras Ambientales), Universidad Técnica de Cotopaxi]. <https://repositorio.utc.edu.ec/jspui/bitstream/27000/11657/1/PC-003100.pdf>
- Luna, B. E. B., Lahura, N., & Borda, S. (2023). Generación de Biogás a partir de residuos orgánicos mediante la aplicación del NBS gas home organic reactor, en el anexo 14, distrito de San Ramón Junín, Perú. *Revista Científica Pakamuros*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.unj02346>
- Manager, C. (2019, mayo 2). Planta de Biogás de 250kW en Biddinghuizen Holanda. *INDEREN (Ingeniería y desarrollos renovables, S.L.)*. <https://inderen.es/es/planta-de-biogas-de-250kw-en-biddinghuizen-holanda/>
- Martinez, M., & Ortega, R. (2021, noviembre 30). *Microorganismos degradadores de materia orgánica y sus efectos sobre la calidad del suelo—Mundoagro*. <https://mundoagro.cl/microorganismos-degradadores-de-materia-organica-y-sus-efectos-sobre-la-calidad-del-suelo/>
- Martínez-Hernández, C. M., García-López, Y., Oechsner, H., Martínez-Hernández, C. M., García-López, Y., & Oechsner, H. (2021). Biogas Plants in Germany: Revision and Analysis. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(4). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542021000400009&lng=en&nrm=iso&tling=es

- Ministerio del Ambiente. (2020). *Ecuador impulsa la gestión adecuada de residuos orgánicos en las ciudades – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-impulsa-la-gestion-adecuada-de-residuos-organicos-en-las-ciudades/>
- Mosquera, E. V., & Sinisterra, L. R. (2022). Residuos sólidos de origen orgánico, desechos menospreciados y casi despreciados en procesos de reciclaje. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 2455-2478. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2393
- Muñoz Menéndez, M. B., Contreras Moya, A. M., Santos Herrero, R., Rosa Domínguez, E., & Cárdenas Ferrer, T. M. (2020). El proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos. Métodos y resultados. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 5(Extra 1), 548-564.
- Ojewumi, M. E., Obanla, O. R., Ekanem, G. P., Ogele, P. C., & Ojewumi, E. O. (2020). Anaerobic Decomposition of Cattle Manure Blended with Food Waste for Biogas Production. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.35940/ijrte.a1504.079220>
- Ramírez, L. A. G., Cabrera, F. A. L., Escobedo, M. K. L., Vásquez, C. B. B., & Torres, C. A. L. (2023). Biofertilizante “biol”: Caracterización física, química y microbiológica. *Revista Alfa*, 7(20), Article 20. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.219>
- Reascos, G. M. E. R., Álvarez, W. F. G., Villarruel, É. J. C., & Coyago, R. F. S. (2022). Construcción de un biodigestor para generar energía renovable a partir de desechos orgánicos en el camal de Pacto—Ecuador. *Esferas*, 3, 134-153. <https://doi.org/10.18272/esferas.v3i1.2426>

- Rodríguez Morgado, B. (2019). *Producción de un biofertilizante / bioestimulante mediante un proceso biológico / enzimático a partir de subproductos orgánicos: Valorización agronómica y ambiental de lodos de depuradora y plumas de matadero* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Sevilla]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=218262>
- Sánchez-Llevat, I. L., Fuerte-Góngora, L., Ravelo-Ortega, R., & Ávila-García, O. (2022). Estado del arte de los biopreparados por digestión anaerobia como biofertilizantes y bioestimulantes. *Ingeniería Agrícola*, 12(4). <https://www.redalyc.org/journal/5862/586272874007/>
- Suárez-Chernov, V. D., López-Díaz, I., Álvarez-González, M., Suárez-Chernov, V. D., López-Díaz, I., & Álvarez-González, M. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, 46(1), 73-85.
- Tanya Morocho, M., Leiva-Mora, M., Tanya Morocho, M., & Leiva-Mora, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola*, 46(2), 93-103.
- Tonato Sangucho, J. J. (2019). *Generación de energía eléctrica a través del biogás para la avícola de la universidad técnica de Cotopaxi campus Salache* [bachelorThesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <http://localhost/handle/27000/5352>
- Vargas, B. (2019). *Diseño conceptual de un biorreactor tipo batch para la obtención de biogás y biofertilizantes a partir de residuos orgánicos (urbanos y agrícolas)* [Tesis de pregrado (Ingeniero Químico), Universidad de Pamplona].

http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5130/1/Vargas_2019_TG.pdf

Venegas Venegas, J. A., Pinto Ruiz, R., Guevara Hernández, F., Pérez Fernández, A., Raj Aryal, D., & Aguilar Aguilar, F. A. (2023). Potencial de biogás, energía eléctrica, reducción de CO₂eq y rentabilidad de biodigestor-motogenerador para establos lecheros en México. *estudios sociales: revista de alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 33(62), 20.

Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D., Pinto Ruíz, R., Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D., & Pinto Ruíz, R. (2019). Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis económico*, 34(85), 169-187.

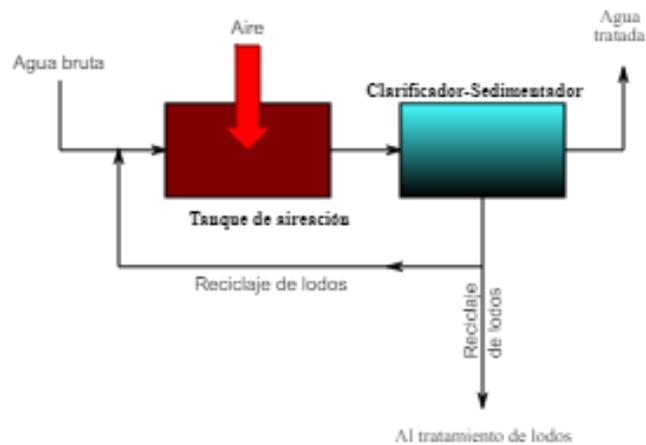
Viteri, L. (2020). *Producción de biogás a partir de residuos orgánicos de frutas y hortalizas generados en el mercado Gómez Rendón*. [Pregrado (Ingeniería Ambiental), Universidad Agraria del Ecuador]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/VITERI%20VEGA%20LADY%20LISBETH.pdf>

Xu, P., Shu, L., Li, Y., Zhou, S., Zhang, G., Wu, Y., & Yang, Z. (2023). Pretreatment and composting technology of agricultural organic waste for sustainable agricultural development. *Heliyon*, 9(5), Article 5. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16311>

4.2 Anexos



Anexo 1: Digestión anaerobia.



Anexo 2: Digestión aerobia.



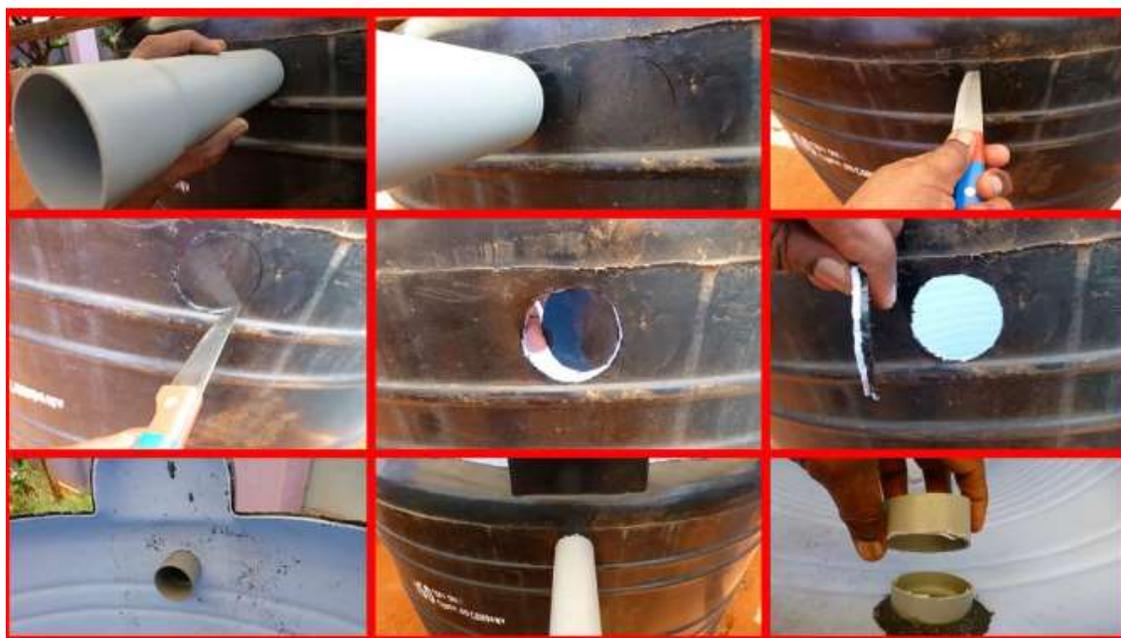
Anexo 9: Preparación del tanque colector de gas.



Anexo 10: Preparación del tanque digesor.



Anexo 11: Colocar la tubería de entrada al tanque digestor



Anexo 12: Colocar la tubería de salida al tanque digestor.



Anexo 13: Proporcionar soporte de guía en el tanque colector de gas.



Anexo 14: Colocación del tubo de salida del gas en el tanque colector.



Anexo 15: Preparación de la tubería de entrada de desechos.



Anexo 16: Coloque el tanque colector de gas y termine su biodigestor casero.