

**Análisis Multicriterio para la Selección de Residuos Orgánicos para
Co-digestión de Biodigestor Anaeróbico en una Asociación Rural del
Centro del Valle del Cauca**

:

Autores:

Brayan Steeven Ríos Becerra

Juan David Cardona Morales

Director:

Ing. José Daniel Ballen Briceño

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Facultad de Ingeniería Industrial

Guadalajara de Buga

2024

**Análisis Multicriterio para la Selección de Residuos Orgánicos
para Co-digestión de Biodigestor Anaeróbico en una Asociación
Rural del Centro del Valle del Cauca**

Autores:

Brayan Steeven Ríos Becerra

Juan David Cardona Morales

Director:

Ing. José Daniel Ballen Briceño

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Facultad de Ingeniería Industrial

Guadalajara de Buga

2024

Agradecimientos

Agradecemos a Dios, a la familia por su apoyo incondicional y a nuestros compañeros de curso por su amistad y colaboración, gracias a los profesores por su dedicación y entrega, al director de tesis por su invaluable acompañamiento, comprensión y sobre todo dedicación, su apoyo y contribuciones hicieron posible este logro.

Contenido

Agradecimientos	3
Introducción	13
Planteamiento del Problema.....	15
Objetivos.....	17
Objetivo General	17
Objetivos Específicos.....	17
Justificación	18
Revisión Literaria	22
Biodigestores	22
Co-digestión	28
Metodología.....	39
Biodigestores Anaeróbica	40
Etapas de la Digestión Anaeróbica.	41
Fases de Fermentación Anaeróbica	42
Hidrolítica.....	42
Bacterias que Participan en el Proceso de Hidrólisis	42
Acidogénesis	43
Acetogénica.....	43
Bacterias que Participan en el Proceso de Acetogénesis	43
Metanogénica	44
Bacterias que Participan en el Proceso de Metanogénesis.....	44

Crecimiento y Reproducción Bacteriana	44
Inóculo	46
Fase de Latencia Bacteriana.....	47
Etapas Exponencial.....	47
Etapas Estacionaria	47
Etapas de la Muerte Exponencial.....	48
Elementos que Componen un Biodigestor	49
Tanque de Digestión	49
La laguna de Compensación.....	49
El Registro de Carga.....	50
El Conducto de Carga.....	50
Capacidad de los Biodigestores.....	50
Clasificación de Biodigestores	50
Tubular o Taiwanesees.....	50
Chinos o Rígidos.....	51
Continuos.....	51
Semicontinuos.....	51
Parámetros Operativos.....	52
Temperatura.....	52
Parámetros de Funcionamiento de Biodigestor	53
Nivel de pH, Acidez o Alcalinidad.....	54
Presión:.....	54

Granulometría	54
Humedad	54
Tiempo de Retención	55
Sólidos Volátiles.....	55
Tiempo de Retención Hidráulica	55
Tipos de Sustratos.....	56
Sustratos	56
Producción de Biogás y Otros Elementos	57
Biogás	57
Composición del Biogás.....	58
Biol	59
Biosol	59
Beneficios de Implementación de Biodigestores a Nivel Rural.....	59
Beneficios económicos:	59
Beneficios ambientales:	60
Sustratos	60
Purín	61
Aceite de colza.....	61
Sorgo	61
Triticae	62
Rastrojo de maíz	62
Disponibilidad de Sustratos	63

Manejo	64
Pretratamiento Térmico.....	64
Pretratamiento Químico	65
Pretratamiento Mecánico	66
Riesgos Asociados de los Sustratos.....	66
Compatibilidad del Sustrato	67
Contenido de Sólidos Volátiles	68
Relación Carbono/Nitrógeno	68
Costos de Adquisición de Sustratos	69
Producción de Biogás	69
Impacto Ambiental.....	73
Impacto social.....	75
Beneficios Económicos.....	76
Comparativo por autores.....	77
Identificación de alternativas	82
Criterios de evaluación (SV, C/N, Costos, Impacto ambiental, etc)	84
Descripción de Criterios y Subcriterios	86
Criterios Ambientales:.....	87
Subcriterio Producción de subproductos.....	87
Sub-Criterio Biodegradabilidad	87
Criterio Social	88
Subcriterio Trabajo con la comunidad.....	88

Subcriterio Generación de empleo.....	89
Subcriterio Buenas prácticas.....	89
Criterio Económico	89
Subcriterio Ingresos	90
Sub-Criterio Costo de adquisición de insumos.....	90
Sub-Criterio Costo de operación	90
Criterio Técnico.....	91
Sub-Criterio Calidad del producto	91
Sub-Criterio Aprovechamiento de los residuos	91
Sub-Criterio Capacidad de transformación	92
Comparación por pares (evaluación de expertos).....	92
Estructura Jerárquica:	92
Perfiles de Evaluación.....	93
Perfil Ingeniero Agroindustrial:	93
Perfil Ingeniero Ambiental:	93
Perfil Ingeniero mecánico.....	93
Asignación de peso (Determinar la relevancia de cada criterio - “AHP interno”) 94	
Materia orgánica vegetal:	94
Estiércol animal:.....	94
Residuos de industria agrícola:	94
Consolidación	95
Conclusiones	97

Referencias Bibliografía..... 98

Tablas

Tabla 1 Materiales con valor C/N más bajos y altos	31
Tabla 2 Características del estiércol de cerdo y residuos vegetales	32
Tabla 3 Características del estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate ..	33
Tabla 4 Características de los Materiales	34
Tabla 5 Características del Estiércol, Maíz e Inóculo	35
Tabla 6 Características de restos de comida y poda	36
Tabla 7 Escala de Saaty	39
Tabla 8 Metodología	40
Tabla 9 Desechos Orgánicos de Origen Animal	57
Tabla 10 Propiedades específicas del Biogás	58
Tabla 11 Resumen de composición Química del Biogás.....	58
Tabla 12 Estado Térmico de Baterías	65
Tabla 13 Características de los RRSS	68
Tabla 14 Relación C/N de Sustratos.....	69
Tabla 15 Relación C/N de Residuos.....	70
Tabla 16 Variables de Producción de Biogás	70
Tabla 17 Biogás a Base de Estiércol Porcino	71
Tabla 18 resultados de cantidad de biogás y metano.....	73
Tabla 19 Revisión Literaria de Criterios Seleccionados.....	81
Tabla 20 Materiales con valor C/N más bajos y altos	82
Tabla 21 Características del estiércol de cerdo y residuos vegetales	83

Tabla 22 Características del estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate	83
Tabla 23 Características de restos de comida y poda	84
Tabla 24 Criterios y subcriterios	86
Tabla 25 Consolidado.....	95
Tabla 26 Resultados de consolidado.....	96

Figuras

Figura 1 Proceso de Digestión Anaeróbica	23
Figura 2 Etapas de Digestión Anaeróbica	41
Figura 3 Proliferación Bacteriana.....	45
Figura 4 Curva de Crecimiento Bacteriano.....	49
Figura 5 Gráfica de Temperatura de Proliferación Bacteriana.....	53
Figura 6 Estructura jerárquica de las alternativas.....	92

Introducción

Entre India, Filipinas, China y los Estados Unidos, se producen cerca de 55 millones de toneladas de desechos de frutas y verduras debido al procesamiento, envasado, distribución y consumo de estas (Recabarren, P. E., et al. 2016). La agro industrialización de frutas y hortalizas es una de las prácticas industriales que más desechos sólidos orgánicos genera en el mundo (Valderrama, A. 2013). En general, analizando el per cápita, se desperdicia mucho más en los países industrializados que en los países en vía de desarrollo, en Europa y Norte América, el desperdicio de alimentos per cápita se encuentra entre 95 a 115 Kg al Año y en los países de África Subsahariana, Asia Meridional y Sudoriental, es de solo 6 a 11 Kg al Año (FAO, 2020). En países en vía de desarrollo, como Colombia, los residuos orgánicos, normalmente son llevados a vertederos o incinerados, desaprovechando el gran potencial que tienen estos residuos para la generación de nuevos productos (Rojas Avendaño, M. C. 2022).

Las investigaciones actuales se centran en la elaboración de técnicas que mitiguen los impactos negativos que conlleva una mala disposición de los residuos orgánicos. Dentro de estas técnicas, los biodigestores alimentados con residuos agroindustriales han ganado popularidad en los sectores energéticos y agrícola, debido a su capacidad para convertir materia orgánica en gas y fertilizantes, específicamente los biodigestores anaerobios, que operan mediante la fermentación de desperdicios orgánicos, lo cual, genera como resultado, la producción de biogás, compuesto principalmente por Metano, Dióxido de Carbono, Hidrógeno, Sulfuro de Hidrógeno y Amoníaco (Kalaiselvan et al., 2022). Además de la generación de Biogás, el proceso de biodigestión produce un subproducto en forma de abono orgánico, enriquecido con nutrientes para el suelo (Cáceres Jurado, 2021) .

Los biodigestores de gas son herramientas útiles en la gestión de residuos, debido a su capacidad para procesar una amplia gama de materiales orgánicos, incluidos excedentes agrícolas, residuos de alimentos, estiércol y lodos. La conversión de estos residuos en gas metano, los convierte en una fuente generadora de energías renovables y contribuye a la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI),

(Wug, F., & Rafael, F. 2022). Existen distintos tipos de biodigestores, clasificados según su diseño y funcionamiento, como, por ejemplo: los de flujo discontinuo, semidiscontinuo y continuo. Asimismo, pueden clasificarse, según sus etapas de producción, las cuales, modifican las propiedades de los productos y se utilizan en función de los objetivos específicos de implementación (Wong Arguelles et al., 2023).

Por lo tanto, la selección del tipo de biodigestor estará determinada por las necesidades y objetivos específicos del proyecto, considerando factores como, el tipo de sustrato, el volumen de residuos a procesar y el presupuesto disponible. Además, es importante destacar los beneficios que los biodigestores proporcionan a las comunidades ganaderas y rurales de bajos ingresos, que actualmente dependen de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, lo cual puede resultar costoso e insostenible a largo plazo (Andriamanohiarisoamanana F. J., et al., 2022). Investigaciones recientes indican que la implementación de biodigestores fabricados con resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio, y alimentados con desechos de cocina, puede generar aproximadamente 1 m³ de biogás por cada 25 Kg de biorresiduos, esto supone una contribución del 40 % para satisfacer las necesidades energéticas de un hogar (Glivin et al., 2021).

Otra ventaja significativa de los biodigestores es su capacidad para integrarse en sistemas de producción agrícola (Corrales Roa, E. 2014), ya que, los residuos orgánicos generados por la agricultura pueden ser aprovechados como materia prima para la producción de biogás y abono orgánico, lo que conlleva mejoras en la productividad de los cultivos y reducciones en los costos de producción (Vega Daza, M. A. 2024). Por ende, la adopción de estos sistemas integrados de producción representa una herramienta decisiva para promover la sostenibilidad y la eficiencia de la actividad agrícola (Mendoza Rodríguez, J. E., & Villa Mejía, S. 2023).

Planteamiento del Problema

El crecimiento exponencial de la población humana exige que la producción de alimentos sea eficiente y sostenible, obligando a los países a desarrollar estrategias para satisfacer la creciente demanda alimentaria (Cabeza, M. D. (2010), a su vez, esto conlleva a la acumulación de residuos orgánicos resultantes de la producción, por consiguiente, la gestión inadecuada de estos residuos genera sólidos y líquidos que contaminan el medio ambiente, degradan el suelo y afectan las fuentes hídricas, produciendo un impacto ambiental significativo en las zonas donde se encuentran (Carhuaricra Espinoza, 2022).

Por consiguiente, en Colombia, los biodigestores se presentan como una solución efectiva, estos contenedores herméticamente sellados digieren materia orgánica anaeróbicamente, produciendo biofertilizante y biogás para calefacción, cocción y electrificación de los hogares, su relevancia es alta debido a su potencial de implementación en la industria ganadera y agrícola, reduciendo la contaminación y el calentamiento global, mejorando tanto zonas rurales como urbanas (Martín Hernández, L. A., & Guerrero Hernández, O. E. (2022).

Además, según Pabuena, M. A., & Pasqualino, J. C. (2014), el uso de biodigestores a nivel rural ha desarrollado lentamente debido al escaso apoyo institucional, sin embargo, la aplicación de esta tecnología en la zona andina (Antioquia, Norte de Santander, Santander, Boyacá, Caldas, Risaralda, Quindío, Huila, Tolima y Cundinamarca) a nivel doméstico ha crecido en los últimos años, por otro lado, el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2012) informa que, en 2009, aproximadamente el 93 % de los residuos se dispuso adecuadamente, principalmente en rellenos sanitarios, mientras que el resto se vertió en fuentes hídricas, botaderos al aire libre, se quemó o enterró.

Sin embargo, UN-HABITAT (2010) afirma que los residuos domésticos están compuestos en su mayoría por dos tercios de material orgánico, además, los restaurantes y vendedores ambulantes de frutas y verduras no reciben un servicio adecuado de recolección de residuos, o este es pobre e ineficiente, lo que genera

acumulación de residuos en las calles y cerca de vertederos hídricos, como consecuencia, se produce estancamiento de aguas, cría de mosquitos y otros vectores.

Por lo tanto, en Colombia, según Tobón Abello, A. H. (2018), los biodigestores se presentan como la mejor alternativa para el tratamiento y aprovechamiento de residuos, permitiendo mitigar las emisiones de CO₂ (Dióxido de Carbono) y CH₄ (Metano) a la atmósfera, demostrando ser un componente esencial en las estrategias de desarrollo sostenible, tanto en áreas rurales como urbanas, estos dispositivos posibilitan la utilización eficiente del material biodegradable (Elvin, 2019).

Por ende, esta investigación propone abordar este problema mediante un análisis multicriterio, conocido como AHP (Proceso de Jerarquía Analítica), este método permite determinar las alternativas más adecuadas según diferentes criterios, asignándoles un peso, determinado por evaluadores expertos, basado en su relevancia, como resultado, se obtiene la opción más adecuada (Irreño, C. A. B. 2018).

Por consiguiente, el problema radica en la necesidad de abordar la gestión de residuos y encontrar soluciones efectivas que permitan determinar el sustrato más idóneo para la alimentación del biodigestor anaeróbico, en este contexto, surge la pregunta: ¿Cómo afecta el tipo de sustrato al funcionamiento del proceso de digestión anaeróbica dentro de un reactor y su eficiencia en la producción de biogás y biofertilizante?

Para esta investigación se tendrán en cuenta los aportes literarios sobre las variables determinantes que influyen en el proceso, ya que la selección del sustrato para la alimentación de un biodigestor anaeróbico es crucial para su productividad.

Objetivos

- Acorde a la anterior, se establecen los objetivos que busca cumplir la siguiente investigación:

Objetivo General

- Determinar la alternativa más adecuada de residuos orgánicos para la co-digestión de un biodigestor anaeróbico en una asociación rural

Objetivos Específicos

- Caracterización de tipos biodigestores anaeróbicos.
- Identificar los criterios relevantes para la selección del sustrato en la alimentación de un biodigestor anaeróbico.
- Determinar las alternativas más adecuadas de sustrato para optimizar la productividad del biodigestor.

Justificación

El calentamiento global y la crisis energética son dos de los problemas más significativos a nivel mundial, además del agotamiento progresivo de las reservas de hidrocarburos (Estenssoro Saavedra, F. 2010). Por ende, existe una creciente necesidad de que los gobiernos impulsen y apoyen la investigación de nuevas fuentes energéticas, por lo cual, se ha impulsado la investigación y el desarrollo de tecnologías orientadas a la obtención de energías alternativas, como los biocombustibles y el aprovechamiento de las energías renovables, este tipo de enfoque está generando un cambio importante en los esfuerzos de desarrollo sostenible y en la conciencia energética a nivel global (León Torres et al., 2019).

Por otro lado, el uso de vertederos es uno de los factores primordiales en la generación de GEI, estos gases, sino se almacena de manera adecuada, pueden contribuir a la generación de smog (mezcla de gases contaminantes) y por ende al calentamiento global (Jelínek et al., 2021). Además, el sector energético actual es uno de los responsables de la generación de GEI, lo que lo convierte en un contribuyente fundamental al cambio climático, por lo tanto, se han realizado esfuerzos a nivel mundial para encontrar e implementar nuevas fuentes de energía con bajas emisiones de GEI.

En este contexto, se han identificado varias opciones que generan menos GEI, y una de ellas es la generación de energía partir de Biomasa, dentro de esta categoría, se destaca la opción de degradación bioquímica de los residuos orgánicos, este proceso emplea la digestión anaeróbica, que utiliza microorganismos que prosperan en un ambiente sin la presencia de oxígeno, descomponiendo la materia orgánica, como resultado de este proceso, se generan varios productos, entre los que se destacan el biogás, este gas es una mezcla gaseosa de Dióxido de Carbono (CO₂) y Metano (CH₄), con un potencial para utilizarse como fuente de generación de energía, ya que puede emplearse como combustible (Espinosa Mantilla, 2021).

En comparación, en países en vías de desarrollo, la pobreza energética es un factor recurrente que limita el acceso a servicios básicos como la calefacción y la cocción de alimentos, en las zonas rurales, estas necesidades se satisfacen mayormente con el

uso de leña, estimado que alrededor de un tercio de la población mundial aún depende de este recurso, lo que ha provocado una sobreexplotación de los bosques a nivel global (Sheinbaum-Pardo et al., 2012). Además, la generación de desechos orgánicos, como el estiércol de animales, constituye un problema de contaminación ambiental, debido a las emisiones de GEI (Ritchie, 2020), asimismo, genera un impacto en la salud pública debido a la proliferación de enfermedades al ser arrojadas a fuentes hídricas (FAO, 2021; Pinos-Rodríguez et al., 2012).

Ante este escenario, el empleo de la tecnología de los biodigestores anaeróbicos emerge como una solución viable, estos dispositivos permiten la generación de biogás, por medio de la digestión de residuos orgánicos y estiércol, el cual puede ser utilizado para diversas aplicaciones como calefacción, iluminación, y producción de energía eléctrica (Garfí et al., 2016). El biogás es una mezcla de gases, que contiene en promedio un 55 % y un 65 % de metano (CH₄) y entre un 45 % y un 35 % de dióxido de carbono (CO₂), así como pequeñas cantidades de gases residuales como sulfuros de hidrógeno (H₂S), nitrógeno (N₂) e hidrógeno (H₂) (Lyu et al., 2018).

Por otro lado, el efluente o digestato proveniente del biodigestor es un valioso fertilizante orgánico, ideal para la fertilización de cultivos y la producción de alimentos de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente (Lansing et al., 2010).

Es importante destacar que el uso del biogás conlleva una serie de beneficios significativos, contribuye considerablemente a reducir el consumo de leña y, por ende, mejora la calidad de vida de las familias en zonas rurales, debido a que, disminuye el riesgo de intoxicación y problemas de salud asociados con la exposición al humo en los hogares, asimismo, reduce de manera considerable los olores y la presencia de moscas relacionados con la acumulación de estiércol de animales domésticos (Mukeshimana et al., 2021).

Con respecto, al empleo del digestato (material que queda tras la digestión anaeróbica de una materia prima biodegradable) en la agricultura permite reducir los costos en la producción, al sustituir la necesidad de adquirir fertilizantes comerciales

sintéticos (Kelebe et al., 2017; Mukeshimana et al., 2021; Uhunamure et al., 2019; Wassie et al., 2020).

Es esencial mencionar que la tecnología de la digestión anaeróbica tiene sus orígenes hace más de 200 años, siendo instalado el primer biodigestor en la India (Rodríguez, 2010), sin embargo, su adopción a nivel mundial ha sido lenta, especialmente en los países en vías de desarrollo, factores como aspectos financieros, técnicos, ambientales, socioculturales e institucionales han contribuido a esta demora en su implementación (Kelebe et al., 2017; Mukeshimana et al., 2021; Uhunamure et al., 2019; Wassie et al., 2020).

Por consiguiente, el crecimiento de las urbanizaciones, la industrialización y el aumento de la producción, conlleva a un incremento en la demanda energética, en respuesta a esta situación, las Naciones Unidas han establecido los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con el objetivo de reducir la generación de desechos a nivel mundial para el año 2030 (Khan & Kabir, 2020).

En consecuencia, la implementación de sistemas de biodigestión anaeróbica, por medio de los biodigestores, contribuye a promover los ODS, en primer lugar, el uso de biodigestores genera fertilizantes y gas a bajo costo, lo que impacta en el objetivo 2 de los ODS (Hambre y Seguridad Alimentaria), esto se debe a que los fertilizantes producidos, pueden aumentar la productividad agrícola, mejorando así la seguridad alimentaria, además la implementar este tipo de tecnologías, implica la capacitación del personal que lo va a poner en marcha, lo que contribuye al objetivo 4 (educación), ya que aquellos que se benefician de los biodigestores necesitan adquirir conocimientos sobre su funcionamiento y mantenimiento, lo que lleva a un mayor entendimiento del entorno y promueve la educación ambiental. Por último, la tecnología de los biodigestores impacta sobre el objetivo número 12 (Consumo y Producción Responsable), dado que, al obtener fertilizantes y gas de forma sostenible, se contribuye a mitigar los problemas medioambientales asociados con la producción y el consumo sostenible.

En conclusión, a partir de lo expuesto previamente, se constata que la tecnología del biodigestor anaeróbico, la cual facilita la transformación de la materia orgánica en productos aprovechables de manera sostenible, constituye una alternativa que permite una gestión adecuada de los desechos orgánicos. Sin embargo, es importante destacar que la falta de conocimientos necesarios para establecer los diferentes tipos de residuos que deben suministrarse al biodigestor para su correcto funcionamiento puede generar problemas que afectan la eficiencia del sistema, esto repercute negativamente en el proceso, ocasionando que el producto deseado no se produzca en el tiempo estimado. Por lo que, es fundamental implementar una herramienta que permita determinar adecuadamente el tipo de residuo orgánico que se puede emplear para el óptimo desarrollo del proceso de digestión anaeróbica que tiene lugar en el interior del biodigestor.

Revisión Literaria

Biodigestores

En el ámbito de la gestión de residuos orgánicos, la degradación del material orgánico mediante el proceso de digestión anaeróbica es una técnica sujeta a diversos factores ambientales y químicos (Esteban-Gutierrez, M. 2014), por consiguiente, resulta esencial obtener un conocimiento profundo, para comprender los diferentes procesos involucrados en esta transformación de residuos orgánicos en subproductos con valor agregado y bajo impacto medioambiental, para reafirmar más estos conceptos, se presenta a continuación diversas propuestas relacionadas con la gestión de residuos orgánicos a través de la digestión anaeróbica, así como los diferentes aspectos que influyen en este proceso.

Para comenzar, la biodegradación anaeróbica implica la descomposición de materia orgánica en un ambiente húmedo y sin presencia de oxígeno, este proceso consta de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016), a causa de esto, los productos resultantes del proceso de digestión anaeróbica son los siguientes: biofertilizantes, como el biol (componente líquido) y el biosol (componente sólido o fango), que constituyen los efluentes del biodigestor, finalmente, se produce biogás, compuesto principalmente por gas metano (CH₄), (Barrena Gurbillón, et al., 2019).

Para comprender mejor el proceso de digestión anaeróbica, se proporciona a continuación una ilustración gráfica de este.

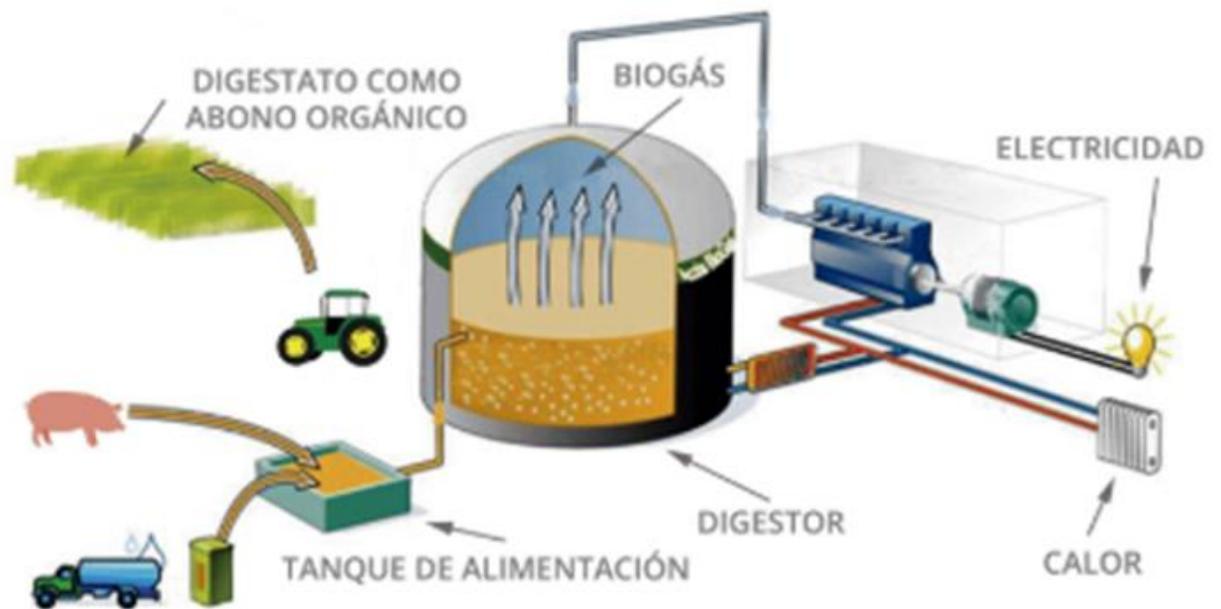


Figura 1 Proceso de Digestión Anaeróbica

Fuente: Espinosa Mantilla, K. G. (2021)

Además, los biodigestores son herramientas para la implementación exitosa de políticas públicas en pro del desarrollo sostenible en entornos rurales, especialmente cuando se destinan recursos para su fabricación por parte de una comunidad campesina, ya que una estrategia de promoción adecuada puede fomentar la participación comunitaria e incluso generar nuevas dinámicas económicas, donde varios beneficiarios pueden obtener ingresos adicionales mediante la construcción de biodigestores (Sims & Sinclair, 2008), un ejemplo destacado de los beneficios derivados del uso de biodigestores se evidencia en una región de Costa Rica entre el año 2002 y 2006, donde se logró evitar el ingreso a las cuencas acuíferas de 4.440 toneladas de residuos, el uso generalizado de biodigestores permitió a esta región, conocida por su actividad lechera, obtener ahorros significativos en las facturas de energía eléctrica, además de lograr una independencia en la producción de combustibles para el proceso de calefacción y suministro de gas para la cocina (Sims & Sinclair, 2008). Sin embargo, un caso más reciente que ilustra la implementación exitosa de políticas públicas para el desarrollo

sostenible en entornos rurales es el proyecto de construcción de cuartos verdes sustentables en regiones campesinas de México; en este contexto, la expansión del programa incluye la implementación de los biodigestores para el aprovechamiento de los residuos orgánicos como parte integral de estrategia de desarrollo rural. (Reynoso Patiño & Perales García, 2022).

Igualmente, los biodigestores tienen una amplia difusión en entornos urbanos o institucionales, como es el caso de la aplicación de un biodigestor en un restaurante universitario que obtuvo resultados satisfactorios con la generación de gas combustible de alta calidad, además de obtener resultados prometedores en la producción de biofertilizantes (F.Granzotto, 2021). Asimismo, los biodigestores pueden ser utilizados a gran escala, por ejemplo, en Brasil, se están llevando a cabo estudios de viabilidad para aprovechar las grandes cantidades de residuos generados por las haciendas porcícolas o bovinas, estos estudios tienen como objetivo la generación eléctrica, destinada a satisfacer los requerimientos energéticos para la climatización de diversas edificaciones (Demeu et al., 2020).

Sin embargo, el mayor riesgo asociado al uso de biodigestores radica en la presencia de patógenos tanto en el gas combustible como en los biofertilizantes, esta preocupación resalta la necesidad de investigar el uso de materia orgánica y de encontrar, a través de la experimentación, las mezclas y aditivos que permitan una óptima estabilidad biológica (Vinnerås, 2011). Por lo tanto, una de las principales líneas de investigación derivadas de la construcción y operación de biodigestores es la evaluación de la estabilidad química y biológica de los biofertilizantes, en este contexto, Veroneze, et al. (2019) realizó pruebas en cinco biodigestores, utilizando diferentes mezclas de agua, materia orgánica y glicerina, con el objetivo de lograr una mejor estabilidad biológica del producto final.

Además, un biodigestor puede ser considerado una innovación eco-tecnológica, y, por esta razón, no puede ser evaluado como una tecnología tradicional, su impacto

puede ser medido en términos de resultados concretos, tales como los efectos ambientales, sociales y económicos, estos resultados, a su vez, contribuyen a la formación de recursos humanos, al desarrollo institucional, a la introducción de innovaciones en las prácticas diarias de la población rural, a la detección oportuna de ocurrencias no deseadas y a la caracterización de la gestión ambiental alcanzada (de Jesús, et al., 2022).

Asimismo, la implementación exitosa de los biodigestores tradicionales no se limita únicamente a la percepción del aprovechamiento de residuos orgánicos, también es necesaria la medición de variables químicas que confirmen, por ejemplo, la eficiencia en la remoción de materias orgánicas (Trejo Lizama et al., 2014). En la región Amazónica del Ecuador, el Ministerio de Ambiente, responsable de la biodiversidad, implementó biodigestores para el tratamiento de aguas en la Reserva de Producción de Fauna Cuyabeno, después de tres años de implementación del sistema, se propuso evaluar la calidad de las aguas efluentes de los biodigestores mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos, como temperatura, conductividad, pH, sulfatos, nitratos, nitritos, detergentes, demanda química de oxígeno (DQO), demanda química de oxígeno a 5 días (DBO5), aceites y grasas, así como parámetros microbiológicos, los resultados indicaron que una parte significativa de los biodigestores evaluados no cumplían con los parámetros ambientales establecidos, principalmente debido a problemas de instalación y mantenimiento de los equipos (Gutiérrez Cruz, et al., 2016).

También es crucial contar con metodologías para la valoración de la eficiencia ambiental de los biodigestores. Soberats, et al. (2019) propone evaluar las condiciones estructurales y de funcionamiento, incluyendo la ubicación de los equipos y la prevención de residuos de aceites, jabón y detergente a través de dispositivos instalados en los sistemas de drenaje y alcantarillado (drenajes tipo trampa). Asimismo, se deben considerar los flujos de entrada y salida del biodigestor, la caracterización de los efluentes líquidos mediante parámetros fisicoquímicos y biológicos de estos dispositivos, además del volumen de biogás obtenido, por lo que, resalta la importancia de las buenas

prácticas en la instalación, operación y mantenimiento de los biodigestores para su máximo aprovechamiento.

De igual manera, los sustratos que generan una mayor producción de biogás son las aguas residuales y la vinaza de tequila, estos sustratos resultan más adecuados para una mayor producción de biogás en comparación con el ensilaje de maíz y el ensilaje de pasto, (Rodríguez, L. D. M., et al. 2021).

Además, es importante destacar que un pH neutro facilita un proceso anaeróbico óptimo (Daniela, et al., 2021). Por otro lado, la evaluación de sustratos realizada por Palomino Arango y Quispe Pizarro (2022) determinó que el sustrato con el rendimiento más alto es aquel al que se le incorpora helecho acuático fijador de nitrógeno (*Azolla Filiculoides* o Helecho de Agua). Además, de acuerdo con Parra Huertas (2015), el pH del biodigestor tiene un impacto directo en la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, el rango óptimo de pH oscila entre 6.5 y 8.2, siendo un pH promedio de 7.5 el que favorece un mejor rendimiento.

Además, de acuerdo con Buettner, et al. (2019), la bacteria Peptococcaceae, encargada de ayudar en la descomposición del material orgánico, es altamente influenciada por el pH, una disminución de esta variable, afecta negativamente su producción debido a la desestabilidad de sus proteínas, provocada una alta concentración de ácidos grasos volátiles (VFA), estos ácidos impide el correcto desarrollo de la etapa hidrolítica (proceso en el que las moléculas orgánicas complejas se descomponen en más simples) y de la metanogénesis (etapa en la que los VFA son convertidos en biogás). De igual manera, los ácidos grasos volátiles son influenciados por los sustratos utilizados en el proceso, por lo cual es importante evaluar el tipo de sustrato a emplear para alimentar los biodigestores anaeróbicos.

Otros autores, como Wang et al. (2017), exponen que la alta salinidad ejerce un impacto significativo en el proceso de digestión anaeróbica, una elevada concentración de sal puede afectar negativamente la actividad bacteriana, originando una disminución o desaparición de la actividad microbiana, aunque una pequeña cantidad de Cloruro de Sodio (NaCl) puede aumentar la producción de Metano (CH₄), una alta concentración de

NaCl reduce el rendimiento del proceso, esto afecta directamente la etapa de metanogénesis. Por otro lado, la etapa de acidogénesis (proceso en el cual los azúcares y aminoácidos son fermentados por bacterias acidogénicas), presenta una mayor resistencia.

Desde otra perspectiva, Navarro (2017) señala que la alimentación adecuada de las bacterias es fundamental para la producción de biogás, los principales nutrientes requeridos son el carbono (C) y el nitrógeno (N), los cuales deben mantener una relación óptima de (C:N = 20:1) como mínimo y (C:N = 30:1), como máximo, mantener esta relación es fundamental para garantizar un desarrollo adecuado en el proceso de digestión anaeróbica.

A su vez, Osorio y Ciro (2007) desarrollaron un biodigestor para granjas porcícolas que constaba de dos etapas en serie, a pesar de su simplicidad, los resultados obtenidos confirmaron una mayor eficiencia y productividad en comparación con los biodigestores de una sola bolsa o compartimiento. No obstante en Colombia, se han construido biodigestores con el propósito de contribuir a la producción de gas en granjas locales y para realizar mediciones de variables con fines educativos, un ejemplo de esto es el estudio de Acevedo (2016), quien, a través de la construcción de un biodigestor instrumentado (dispositivo equipado con una variedad de instrumentos de medición y monitoreo para recopilar datos), logró realizar balances de masa y energía, así como mediciones de temperatura, pH, y estabilidad química y biológica de los productos finales, de esta manera, se caracterizaron los diferentes subproductos del proceso de digestión anaeróbica, permitiendo determinar cuáles son las variables que tienen mayor incidencia en el proceso.

En consecuencia, han surgido industrias dedicadas a la generación de biogás mediante la co-digestión, un proceso en el cual se mezclan diferentes tipos de sustratos orgánicos para su tratamiento en biodigestores. Según Neshat et al. (2017), la co-digestión aumenta la eficiencia de la producción de metano y la estabilidad del proceso, esto permite la generación simultánea de bioenergía y enmiendas (adición de ciertas sustancias al material orgánicos antes de su introducción en el biodigestor), ricas en

nutrientes, además, la co-digestión contribuye positivamente a la reducción de los GEI y permite controlar los olores asociados al proceso.

Dentro del proceso de co-digestión anaeróbica del estiércol con otras materias primas, como desechos de alimentos, fracciones orgánicas de residuos sólidos urbanos (FORSU), residuos agrícolas, lodos de depuradoras de agua y efluentes de mataderos, se ha observado una mejora significativa en el rendimiento de digestión anaeróbica, esto se debe a un mejor desempeño en la producción de gas metano (Orozco Yarasqui & Salazar Pillpe, 2022). Ya que, los mejores rendimientos reportados de metano, son producto de la mezcla de estiércol con otras materias primas, esto se atribuyen a una mejor degradabilidad del sustrato, lo que se traduce en un mayor contenido de sólidos volátiles (son la fracción orgánica de los sólidos presentes en un material, que puede descomponerse a altas temperaturas) y un mayor potencial de generación de gas metano en comparación con la digestión del estiércol solo (Rabii et al., 2019).

Co-digestión

Un ejemplo de la co-digestión anaeróbica es la mezcla del estiércol de pollo, o del ganado, juntos con ensilaje de maíz, lo cual resultó en un aumento del rendimiento de producción de metano de un 20% en comparación de la digestión anaeróbica del estiércol animal solo (Yangin-Gomec, C., & Ozturk, I. (2013). Además de mejorar el rendimiento de la producción de metano, esta práctica conlleva otros beneficios, por ejemplo, el estiércol actúa como portador de las materias primas secas (parte que resta de un material tras extraer toda el agua posible) debido a su alto contenido de humedad (Montoro, S. B., et al. 2019). También funciona como un amortiguador, manteniendo el pH del reactor en un nivel estable (Sun, H., et al. (2019), y es rico en nutrientes, lo cual es esencial para que los microorganismos inicien el proceso y prosperen (Leiva Trujillo, B. F. (2018).).

Estos factores resaltan la importancia de la implementación del estiércol en la mezcla del sustrato para mejorar e impulsar el proceso de digestión anaeróbica, los co-sustratos (materiales orgánicos adicionales que se mezclan con el sustrato principal), optimizan el rendimiento de la producción de metano al proporcionar una mayor cantidad

de materia orgánica biodegradable, lo que se traduce en una mayor cantidad de sólidos volátiles (SV) (Gao et al., 2019).

Es importante destacar que el contenido de los SV es la unidad de medida base que se utiliza comúnmente para determinar el rendimiento de producción de metano (Sun et al., 2019). Castro Rivera, et al.,(2020) informan que existe una alta correlación entre la producción de metano y la descomposición de los sólidos volátiles. Por consiguiente, los SV del estiércol de ganado son relativamente bajos, oscilando entre 17.6 y 100 g/Kg, en contraste con los residuos de alimentos, que varían entre 52.8 y 804.3 g/Kg.

Por otra parte, la relación del Carbono y el Nitrógeno (C/N) se emplea para medir el equilibrio de estos elementos en el sustrato, lo que permite determinar su idoneidad para el proceso de digestión anaeróbica (X. Wang et al., 2014), la relación óptima de Carbono y el Nitrógeno para los microbios, se encuentra generalmente en el rango de 20 a 30 (R. Li et al., 2017). Sin embargo, la relación de estos elementos en el estiércol animal no es óptima, ya que se encuentra en un rango más bajo, entre 7.2 y 7.7 unidades de carbono (Morken et al., 2018).

Por otro lado, el rango requerido de pH para la digestión anaeróbica, se sitúa entre 6.5 y 7.6 (Matheri et al., 2017). En síntesis, debido al bajo contenido de sólidos volátiles y al desequilibrio en la relación C/N del estiércol animal, la mono-digestión, que es el proceso de digestión anaeróbica en el que se utiliza un solo sustrato como material de alimentación para el biodigestor, resulta en un rendimiento reducido de metano. (Zahan et al., 2018).

Conforme a lo anterior, autores como Romero et al. (2020) definen la co-digestión anaeróbica como la mezcla de dos o más residuos, lo cual conlleva a ventajas significativas en cuanto a la recuperación de energía a partir de diversos tipos de biomasa. Por otro lado, Hagos et al. (2017) señalan que la utilización directa de residuos agrícolas por parte de los microorganismos es complicada debido al desequilibrio en sus macronutrientes (carbohidratos, proteínas y grasas), además del balance inadecuado de C/N y la estructura lignocelulósica (composición y organización de los componentes principales de la pared celular de las plantas). Estas dificultades pueden ser mitigadas al

combinar diferentes sustratos para lograr un mayor equilibrio, por ejemplo, mezclando sustratos ricos en carbono con subproductos ricos en nitrógeno, como el estiércol animal, desechos de cocina y residuos alimentarios.

Por lo anterior, en la tabla N° (1), se muestran la caracterización de diferentes tipos de sustratos.

Materiales con valor C/N relativamente más bajo		Materiales con valores C/N relativamente más altos	
Sustratos/materiales	relación C/N	Sustratos/materiales	relación C/N
Estiércol de vaca	16-25	Paja de arroz	51-67
estiércol de aves	5-15	Paja de trigo	50-150
estiércol de cerdo	6-14	Bagazo de caña de azúcar	140-150
estiércol de oveja	30-33	Tallos de maíz/paja	50-56
Estiércol de caballo	20-25	Paja de avena	48-50
Desperdicios de cocina	25-29	Remolacha azucarera/follaje azucarero	35-40
Residuos de frutas y verduras	7-35	Hojas caídas	50-53
Desechos alimentarios	3-17	Algas marinas	70-79
Brotos/cáscaras de maní	20-31	Algas	75-100
Cereales de desecho	16-40	Serrín	200-500
Hierba/recortes de hierba	12-16	Papas	35-60
alfalfa	12-17		
Residuos de matadero	22-37		
estiércol de cabra	10-17		
Residuos de alimentos mezclados	15-32		

Tabla 1 Materiales con valor C/N más bajos y altos

Fuente: Hagos et al., (2017)

De acuerdo con la investigación realizada por Jaramillo, J. A. Q. (2022), en la cual se emplearon diferentes tipos de sustrato, como estiércol de cerdo (E) y residuos vegetales (RV) en una co-digestión, se analizaron las pruebas y se determinó que el sustrato con mayor producción de metano, fue el estiércol de cerdo con 1080.17 ml, mientras que los residuos vegetales generaron una cantidad de 863.8 ml. La mezcla de estos sustratos produjo 714.7 ml de metano, estos resultados sugieren que la combinación de RV+E representa una alternativa económicamente viable para la producción de biogás a partir de estos tipos de residuos, ya que se necesitaría solamente un biodigestor.

Por consiguiente, en la tabla N° (2), se muestra la caracterización de los sustratos utilizados en la investigación de Jaramillo.

Sustrato	%Humedad	%ST	%SV	pH	%C	%N	C/N
E	67,25	15,60	83,28	5,84	34,94	3,11	11,25
RV	86,65	11,32	66,10	4,74	36,56	1,01	36,11
E + RV	61,38	16,00	68,71	5,48	11,69	3,09	11,69

Tabla 2 Características del estiércol de cerdo y residuos vegetales

Fuente: Jaramillo, J. A. Q. (2022)

Por otra parte, Castro Rivera et al. (2020), evaluaron la co-digestión de residuos de cosecha de tomate junto con el estiércol bovino, mezclados en una proporción de 50:50 y ajustando un pH inicial de 7.5, este enfoque presentó un mejor rendimiento en la producción de biogás combustible. A continuación, en la tabla N° (3), se presentan las características de las materias primas utilizadas.

Materias primas	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	pH inicial	Relación C/N
Estiércol	20.65	17.30	6.71	12.70
Residuos de cose- cha de tomate	21.15	18.25	6.91	19.60

Tabla 3 Características del estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate

Fuente: Castro Rivera et al. (2020)

Asimismo, en la investigación realizada por Marín Batista et al. (2016), se llevaron a cabo diferentes ensayos de biometanización (proceso biológico mediante el cual la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno), mezclando vinaza y gallinaza en diversas proporciones basadas en sólidos volátiles, este estudio determinó que la mezcla que tuvo un mejor rendimiento fue la de 3:1 de vinaza y gallinaza, lo que permitió un incremento en la producción de metano. Cabe resaltar que esta mezcla tuvo un impacto sinérgico positivo, ya que la gallinaza de jaula mejoró notablemente la capacidad de amortiguación de la mezcla, reduciendo así el riesgo de acidificación debido a cambios drásticos en el pH durante el proceso de digestión de la vinaza. por ende, en la tabla N° (4), se presenta la caracterización de los sustratos empleados.

Material	Units	Vinasse	Chicken manure
Total solids (TS)	g/L	89.2	226.2
Volatile solids (VS)	g/L	78.5	107.4
Chemical oxygen demand (COD)	g/L	82.3	731.7
pH	-	4.2	8.3
Carbohydrates	g/L	54.6	78.6
Lipids	g/L	2.7	2.7
Proteins	g/L	19.3	35.5
Total kjeldahl nitrogen (TKN)	g/L	9.0	5.5

Tabla 4 Características de los Materiales

Fuente: Marín Batista et al. (2016)

También, en la investigación desarrollada por Palavecino et al. (2016), se evaluó la producción de biogás utilizando como materia prima estiércol vacuno y maíz, al realizar las diferentes pruebas, se determinó que, a medida que aumenta el contenido de maíz, se incrementa tanto el volumen de biogás producido como la cantidad de CH₄ liberada, a continuación, en la Tabla N° 5 se muestra la caracterización de los sustratos empleados en la investigación.

	Estiércol	Maíz	Inoculo
ST (%)	20,7	88,7	11,8
SV (%)	15,7	1,7	5,1
MO (%)	75,8	98,3	43,3
C/N	24	34,6	18,8

Tabla 5 Características del Estiércol, Maíz e Inóculo

Fuente: Palavecino et al. (2016)

Del mismo modo, la investigación desarrollada por Solarte Toro et al. (2017), evaluó la eficiencia, el rendimiento y la productividad del proceso de co-digestión y digestión anaerobia de residuos de comida y poda, con el objetivo de valorar su viabilidad como sustrato en la generación de biogás, los resultados de esta investigación determinaron que la mezcla de residuos de comida y poda tiene un impacto positivo en el rendimiento de producción de gas y en la estabilidad del sistema en términos de pH, esto permite concluir que la generación de bioenergía a partir de estos residuos es una alternativa viable, por lo que a continuación, en la tabla (6), se presenta la caracterización del sustrato utilizado.

PARÁMETRO	UNIDAD	PODA	COMIDA	INÓCULO
Sólidos totales		88,7	29	2,2
Sólidos volátiles	% p/p	81,7	25,3	0,5
SV/ST	%	92,1	87,2	22,7
C		44,7	48,3	12,5
H		5,9	6,8	1,9
N		2,7	2,1	1,6
S		0,2	0,2	3,2
O	% p/p (b.s)	35,9	39	9,6
Celulosa		26,9	NA	NA
Hemicelulosa		48,6	NA	NA
Lignina		24,5	NA	NA
C/N	gmol/gmol	19	27	9,1
Densidad	kg/m ³	NA	NA	990

%p/p: peso a peso, b.s.: Base seca, NA: No analizado.

Tabla 6 Características de restos de comida y poda

Fuente: Solarte Toro et al. (2017)

Por estos factores, la co-digestión anaeróbica de estiércol está adquiriendo una relevancia creciente, debido a los beneficios que conlleva esta prácticas (Ma, et al., 2020).

AHP

Para evaluar qué tipo de sustrato tiene una mayor viabilidad, se utiliza la metodología denominada Analytic Hierarchy Process (AHP), esta herramienta, propuesta por Thomas Saaty en 1980, es un método cualitativo empleado para la toma de decisiones multicriterio, el AHP permite generar una serie de escalas de prioridades basadas en el juicio de expertos, mediante comparaciones por pares utilizando una escala de preferencia, esto facilita la determinación de la preferencia de una alternativa

en comparación con otra en relación con una característica o atributo (Nantes, 2019). Por consiguiente, es posible identificar de manera pertinente el tipo de sustrato a emplear.

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), está diseñado para abordar problemas complejos que implican considerar múltiples criterios, en este proceso, el tomador de decisiones proporciona evaluaciones subjetivas sobre la importancia relativa de cada criterio y luego especifica sus preferencias para cada alternativa de decisión y cada criterio, el resultado del AHP es una jerarquía con prioridades que reflejan la preferencia global para cada alternativa de decisión, esta metodología permite descomponer un problema complejo en una serie de decisiones más simples, facilitando así la identificación de la opción más adecuada mediante la comparación sistemática de todos los elementos implicados (Jiménez, J. (2002).

El AHP se describe como:

- Una técnica para resolver problemas multicriterio, multi-entorno y multiactor, que incorpora aspectos tangibles e intangibles, así como subjetividad e incertidumbre en el proceso de toma de decisiones.
- Una teoría matemática de la medida generalmente aplicada para determinar la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo.
- Una filosofía para abordar la toma de decisiones en general.

Además, la metodología AHP establece los siguientes términos para su elaboración:

- **Objetivo:** el problema a resolver o el objetivo principal.
- **Criterios:** los elementos que definen el objetivo principal.
- **Subcriterios:** los elementos que definen un criterio más amplio.
- **Alternativas:** diferentes soluciones o cursos de acción.
- **Actores:** participantes involucrados en el proceso de decisión.

Como menciona Nantes, (2019) para la aplicación de la herramienta AHP se tienen en cuenta los siguientes 4 pasos:

1. La definición del problema y el tipo de conocimiento que se quiere obtener, esto definido en la etapa 1 y 2 respectivamente.
2. La estructuración del problema a través de la descomposición jerárquica en subproblemas (criterios y subcriterios), que deben resolverse para arribar a una solución satisfactoria, las alternativas se encuentran en el nivel más bajo de dicha jerarquía, en la segunda etapa se definen los criterios y subcriterios a usar para la construcción del método AHP.
3. La construcción de matrices de comparación, en las que se cargan los juicios expertos mediante el método de comparación uno a uno con la escala sugerida del método.
4. Por último, la síntesis de cada una de las matrices y finalmente del modelo completo para obtener la prioridad global de cada alternativa.

Además, Saaty propone la utilización de una escala fundamental para establecer los valores o juicios correspondientes a las comparaciones mencionadas, como se ilustra en la Tabla (7), esta metodología implica asignar valores en un rango definido entre 1/9 y 9, lo cual aborda de manera efectiva el desafío inherente a las comparaciones relativas. De esta manera, se evitan posibles distorsiones que podrían surgir al comparar elementos con valores que van desde cero hasta infinito, como es común en las fórmulas matemáticas convencionales.

Para garantizar la precisión del proceso utilizado, es fundamental que los elementos comparados pertenezcan a grupos homogéneos o, al menos, sean relativamente similares en características, este enfoque promueve una evaluación más certera y significativa, lo que permite una toma de decisiones más informada y sólida en diversos contextos (Escobar, J. W. (2015)).

INTENSIDAD	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	De igual importancia	Las actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra.
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta e incuestionable
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.
Recíprocos	$a(ij) = 1/(ji)$	Cuanto i tiene un valor respecto a j igual a un entero de los indicadores de arriba, entonces el valor de j respecto a i es igual a $1/a$

Tabla 7 Escala de Saaty

Fuente: Flórez Mora, J. J et al., (2023)

Metodología

La presente metodología está diseñada para abordar de manera sistemática y rigurosa la evaluación de la configuración y funcionamiento de un biodigestor anaeróbico, la identificación de criterios relevantes para la selección de sustratos, y la determinación de las alternativas de sustrato más adecuadas para optimizar la productividad del biodigestor. El enfoque adoptado combina una revisión exhaustiva de la literatura, consultas con expertos, técnicas de análisis multicriterio como el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), y experimentos controlados para asegurar una selección precisa de los sustratos, esta metodología integral proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en el contexto de la generación de biogás a partir de residuos orgánicos.

Por consiguiente, en la tabla N° (8), se describe en detalle la metodología, aplicada para cada uno de los objetivos específicos, con la finalidad de cumplir con el objetivo general propuesto de esta investigación.

Fase 1. Caracterización de Biodigestores anaeróbicos	Fase 2. Definición de Criterios para la Selección del Sustrato.	Fase 3. Determinar Alternativas Más Adecuadas de Sustrato para Optimizar la Productividad del Biodigestor por medio de AHP
<ul style="list-style-type: none"> • Etapas de la Digestión Anaeróbica • Elementos que componen un Biodigestor • Clasificación de Biodigestores • Parámetros Operativos • Tipos de Sustratos • Producción de Biogás y Otros Elementos • Beneficios de Implementación de Biodigestores a Nivel Rural • Disponibilidad de Sustratos 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad • Facilidad de manejo • Riesgos Asociados • Compatibilidad del sustrato • Contenido de SV • Relación C/N • Costo del Sustrato • Eficiencia de producción de biogás • Impacto ambiental • Beneficios Económicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de alternativas • Criterios de evaluación • Comparación por pares • Asignación de peso • Cálculo de prioridades • Selección de Sustrato • Validación de resultados

Tabla 8 Metodología

Fuente: Elaboración Propia

Biodigestores Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que la materia orgánica se descompone en un ambiente cerrado y sin oxígeno, mediante la acción de un grupo específico de bacterias. Este proceso genera una mezcla de gases conocida como biogás y un subproducto llamado digestato. Esta materia residual conserva la mayoría

de los nutrientes presentes en la materia orgánica original y se utiliza como biofertilizante, mejorando la calidad del suelo y la productividad agrícola (Carreras, N. (2024).

Además, este proceso consta de cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, las interacciones entre los diferentes microorganismos responsables de estas etapas son cruciales para el desarrollo y la eficiencia del proceso, durante la hidrólisis, las macromoléculas orgánicas se descomponen en moléculas más simples, en la acidogénesis, estos productos son convertidos en ácidos grasos volátiles, por consiguiente, la acetogénesis transforma estos ácidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, para finalmente, en la etapa de metanogénesis, el acetato y el hidrógeno se convierten en metano y dióxido de carbono, que constituyen el biogás (Meegoda & Li, 2018).

Etapas de la Digestión Anaeróbica.

El proceso de digestión anaeróbica se desarrolla a través de una serie de etapas sucesivas, gracias a diversas poblaciones de bacterias que forman un consorcio equilibrado. Este balance entre las bacterias y etapas del proceso, aseguran su óptimo desarrollo (Martí, 2019).

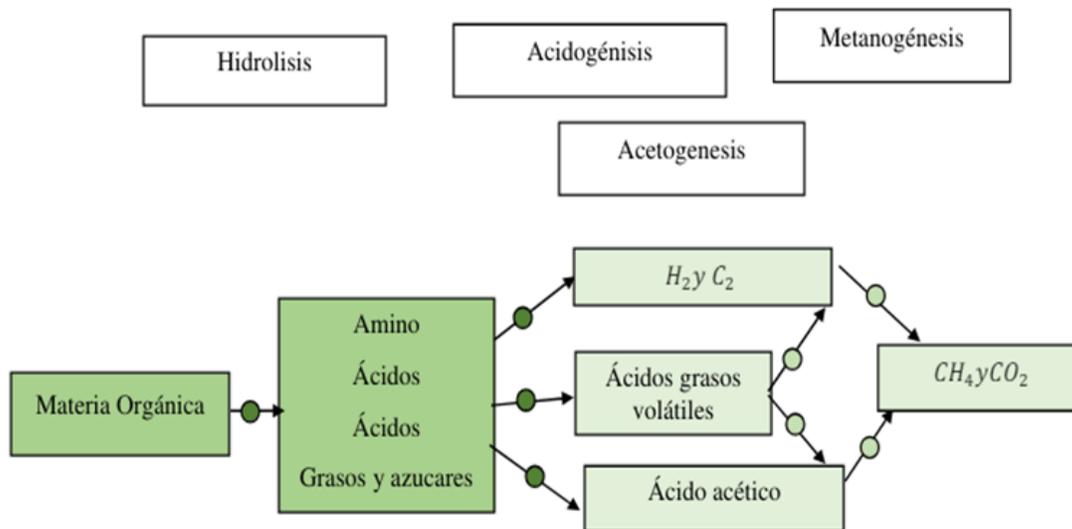


Figura 2 Etapas de Digestión Anaeróbica

Fuente: (Marti, 2019).

Fases de Fermentación Anaeróbica

Hidrolítica

Durante esta fase, los microorganismos predominantes son las bacterias anaerobias facultativas, que tienen la capacidad de proliferar en ambientes carentes de oxígeno. En los digestores anaeróbicos, la biomasa orgánica comúnmente contiene polímeros complejos que requieren procesos de hidrólisis adicionales o pretratamientos con enzimas extracelulares para que sean accesibles a los microorganismos, la hidrólisis es una reacción química que utiliza agua para descomponer compuestos, y las enzimas involucradas son secretadas por organismos implicados en la fermentación, basándose en reacciones de oxidación-reducción (Escobar S., 2018). Durante el proceso de hidrólisis, se producen enzimas extracelulares que ayudan a descomponer macromoléculas como proteínas, lípidos y carbohidratos en fracciones más pequeñas, tales como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena corta, por esta razón, es común añadir enzimas para mejorar la hidrólisis de estos compuestos, ya que algunos sustratos, como la lignina, la celulosa y la hemicelulosa, son difíciles de degradar debido a la complejidad de su estructura, lo que los hace inaccesibles para los microorganismos. (Meegoda & Li, 2018).

Bacterias que Participan en el Proceso de Hidrólisis

Por consiguiente, esta es la primera etapa en la degradación de la materia orgánica compleja, durante la hidrólisis se produce una reacción de óxido-reducción, facilitada por bacterias hidrolíticas como *Streptococcus* y *Enterobacterium*. En esta etapa, los compuestos complejos se transforman en compuestos simples y solubles que pueden ser absorbidos por la pared celular de estas bacterias, además, estos compuestos simples son fermentados por microorganismos acidogénicos, produciendo subproductos como ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono e hidrógeno (Merino, 2018). Por otra parte, esta etapa es considerada como limitante de la velocidad del proceso de digestión anaeróbica, ya que su eficiencia depende de variables como el

pH, la temperatura, el tamaño de partícula, la composición del sustrato y la producción de enzimas. (Villacreses & Feijoo, 2020).

Acidogénesis

En esta etapa, la materia orgánica disuelta, producida durante la hidrólisis, se convierte en Ácidos Grasos Volátiles (AGVs) y en una mezcla de CO₂ y H₂, la velocidad de esta reacción es rápida, y el pH desciende aproximadamente 5.5, ya que el ácido acético es uno de los ácidos utilizados por las arqueas metanogénicas para la producción de metano (Tomal, 2019). Es importante destacar que en esta fase también se generan otros compuestos, como ácidos grasos y alcoholes (Canul, 2020).

Las bacterias que participan en el proceso de acidogénesis son fundamentales para esta transformación, entre las más frecuentes se encuentran *Ibutyvirio*, *Propionibacterium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus* y *Enterobacterias*, estas bacterias son responsables de transformar los ácidos grasos y los aminoácidos en ácidos orgánicos y alcoholes (Sánchez I., 2022).

Acetogénica

En esta fase del proceso de digestión anaeróbica, los AGVs y otros componentes intermedios se transforman en acetato e hidrógeno, estos compuestos se utilizan directamente para la producción de metano gracias a las bacterias metanogénicas, como *Methanosphaera Stadtmanae*, esta fase es crucial para determinar la eficiencia en la obtención de biogás, dado que se obtiene un 25% de acetatos, y aproximadamente un 11% de hidrógeno, por lo que se genera un 65% del metano, mediante la reducción de los acetatos (Chakravarthy, 2019).

Bacterias que Participan en el Proceso de Acetogénesis

En esta etapa, las bacterias acetogénicas y las metanogénicas facultativas coexisten estrechamente, las acetogénicas, como las pertenecientes al grupo *Alphaproteobacteria*, convierten los ácidos grasos volátiles en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono (Segovia, 2018), la reducción de hidrógeno en este punto del proceso

es importante porque convertir el acetato en metano puede ser termodinámicamente favorable si la presión parcial de hidrógeno es baja, esto puede resultar en desafíos energéticos durante la acetogénesis, haciendo fundamental la participación de comunidades microbianas metanogénicas adicionales que consumen el hidrógeno (Canul, 2020).

Metanogénica

La etapa más decisiva en la digestión anaeróbica es la metanogénesis, donde bacterias especializadas en ambientes sin oxígeno descomponen los productos de las etapas anteriores, estas bacterias generan metano a partir de acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, dos tipos de microorganismos participan en este proceso: metanógenos autotróficos, que procesa el 70% del metano total, convirtiendo el acetato en metano, y metanógenos hidrógeno-tróficos, el cual equivale al otro 30% del metano producido, este proceso utilizan H_2 y CO_2 . (Villacreses & Feijoo, 2020).

Bacterias que Participan en el Proceso de Metanogénesis

La diversidad de microorganismos en los digestores anaeróbicos es notable, especialmente en lo que respecta a los *metanogénicos*. Diversos géneros, como *Methanosarcina* y *Methanothrix*, son conocidos por su capacidad para convertir acetato en metano, igualmente, se han identificado bacterias metanogénicas que utilizan hidrógeno, como son: la *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanospirillum* y la *Methanococcus* (Murgueytio & Pacheco, 2021). Esta variedad de microorganismos metanogénicos contribuye a la eficiencia y complejidad del proceso de digestión anaeróbica, asegurando la descomposición completa de la materia orgánica en metano y otros gases.

Crecimiento y Reproducción Bacteriana

El crecimiento bacteriano, caracterizado por el aumento en la masa celular y el número de células, es producto de la división celular, este proceso asexual, denominado bipartición, implica la duplicación del ADN y la posterior división de la célula madre en dos células hijas (Vargas A., 2020). En la figura N° (3), se ilustra la reproducción

bacteriana a partir de una sola célula en un tiempo determinado de 30 minutos, en el eje "Y" de la gráfica se observa el número de microorganismos unicelulares y en el eje "X", el tiempo, la curva exponencial refleja el crecimiento acelerado de la población bacteriana a medida que las células se dividen (Chacha, 2020).

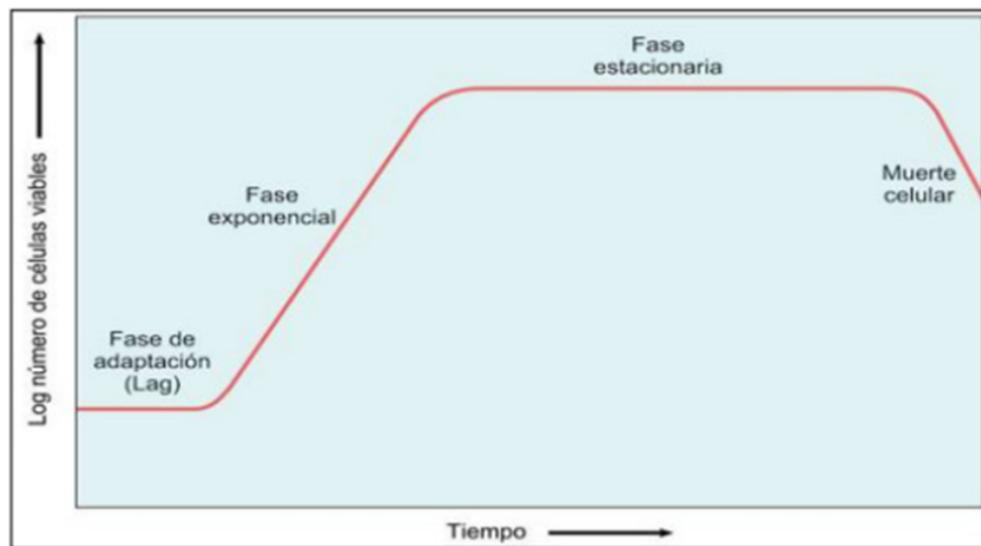


Figura 3 Proliferación Bacteriana

Fuente: (Chacha, 2020).

Inóculo

Con el objetivo de crecer y reproducirse, los microorganismos se transfieren a un medio de cultivo, este entorno, llamado masa activa, es donde se desarrolla y adquiere las características necesarias para eliminar la materia orgánica y ayudar a reducir el tiempo de digestión, los inóculos están compuesto por células jóvenes y activas. (Ramírez & Quijano, 2020).

Fase de Latencia Bacteriana

La fase de adaptación del inóculo, también conocida como fase de latencia bacteriana, es crucial para el éxito del proceso de digestión anaeróbica, durante esta etapa inicial, el inóculo, compuesto por una comunidad de microorganismos seleccionados específicamente para su capacidad de degradar la materia orgánica, se introduce en un nuevo entorno, este requiere tiempo para aclimatarse a las condiciones del medio, como el pH y la temperatura, antes de poder interactuar eficazmente con las aguas residuales (Cruz, 2023). La duración de esta fase de adaptación puede variar según las características del medio, una vez que los microorganismos del inóculo han alcanzado una adaptación adecuada, comienzan a activar su metabolismo, produciendo enzimas y aumentando su producción individual, este proceso es esencial para iniciar el crecimiento y llevar a cabo una digestión efectiva de la materia orgánica (Chacha, 2020).

Etapa Exponencial

Durante la etapa exponencial, se inicia la división celular, un proceso que está influenciado por la capacidad del organismo para metabolizar los nutrientes y la velocidad con la que los produce, esta fase se caracteriza por un crecimiento máximo en condiciones ambientales óptimas, como el tipo de sustrato, la temperatura y el pH, durante este período, la población microbiana experimenta un rápido aumento en número, lo que resulta en un incremento exponencial de la biomasa (Chacha, 2020).

Etapa Estacionaria

Durante la etapa estacionaria, las cantidades de población bacteriana se mantienen constantes en volúmenes de control cerrados, lo que significa que el sistema no presenta intercambio de materia con el entorno externo, como resultado, el crecimiento celular se detiene, debido a la acumulación de componentes tóxicos generados por el metabolismo bacteriano y al reemplazo de células nuevas por células viejas, estos factores conducen al cese del crecimiento bacteriano. En esta fase, aunque

las células continúan metabolizando nutrientes, el crecimiento neto de la población se detiene debido a un equilibrio entre la reproducción celular y la muerte celular (Chacha, 2020).

Etapas de la Muerte Exponencial

Durante esta etapa, las bacterias cesan su crecimiento debido a la putrefacción de la biomasa, aunque continúan con su proceso metabólico, esto conduce a un número relativamente menor de bacterias, además, durante esta fase, pueden ocurrir fenómenos como la depredación y la lisis celular (proceso de ruptura de la membrana celular de células o bacterias que produce la salida del material celular), así como el agotamiento del carbono y de energía celular (Lopez, 2017). En la Figura N° (4), se representa la evolución del crecimiento bacteriano a lo largo del tiempo, mostrando las diferentes fases mencionadas anteriormente: la fase de adaptación, la fase exponencial, la fase estacionaria y la fase de declinación, en esta gráfica se ilustra cómo varía la concentración de biomasa en relación con la concentración de sustrato a lo largo de estas etapas, en el eje "Y" se representa la concentración de biomasa y del sustrato, mientras que en el eje "X" se muestra el tiempo transcurrido.



Figura 4 Curva de Crecimiento Bacteriano.

Fuente: (Martha, 2019)

Elementos que Componen un Biodigestor

Tanque de Digestión

El elemento central del proceso de digestión anaeróbica es el tanque de digestión, en este recipiente se genera el proceso de descomposición de la materia orgánica, su diseño y dimensiones varían dependiendo de la cantidad de material a tratar y las condiciones específicas del proceso. Además, el sistema de digestión consta de varios componentes esenciales, que, en conjunto, operan en sinergia, asegurando la descomposición efectiva de la materia (Cuní, 2011), entre ellos están:

La laguna de Compensación

Esta actúa como un depósito temporal para el material ya procesado, permitiendo la separación del efluente tratado del biodigestor, su volumen normalmente se compone

de un tercio de la capacidad de biodigestor, permitiendo un almacenamiento adecuado (Cuní, 2011).

El Registro de Carga

Posibilita la introducción controlada del material a procesar en el tanque de digestión, su forma y tamaño varían según el diseño específico del biodigestor, asegurando un flujo apropiado de la carga de alimentación (Cuní, 2011).

El Conducto de Carga

Conecta el registro de carga con el tanque de fermentación, facilitando el ingreso del material al proceso digestivo, su diseño debe garantizar un flujo eficiente y prevenir obstrucciones (Cuní, 2011).

Capacidad de los Biodigestores

Los biodigestores anaeróbicos se componen de tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante que almacena el biogás generado, en este tipo de biodigestores, tanto la carga del sustrato como la descarga se llevan a cabo una vez durante el proceso, específicamente después de que la producción de gas combustible ha finalizado. Por otro lado, el diseño del biodigestor determina la capacidad de los sustratos con los que pueden ser alimentados, además de permitir determinar la cantidad de producción de biogás. Asimismo, el diseño permite estimar el potencial de diversos tipos de sustratos para la producción de biogás (Casanovas, 2019).

Clasificación de Biodigestores

Tubular o Taiwanesees

Los biodigestores tubulares, también conocidos como biodigestores taiwaneses, son ampliamente utilizados en Taiwán, estos biodigestores, se componen de tubos

largos que pueden estar enterrados o colocados sobre el suelo, a los cuales se les implementan diferentes tipos de membranas con un grosor mínimo de 0.80 mm, el cual puede variar según el tipo de material, coste, grosor y características, entre las opciones más populares se encuentran las membranas de policloruro de vinilo (PVC), Etileno Propileno Tipo M (EPDM) o Polietileno de Alta Densidad (PDA), además, la forma alargada de estos biodigestores permite que, al cargar todo el líquido dentro del mismo, este se mueva hacia la salida, generando un efecto de agitación que mejora el proceso de digestión anaeróbica (Casanovas, 2019).

Chinos o Rígidos

Los biodigestores chinos o rígidos se distinguen por ser completamente subterráneos y tener una forma tubular o cilíndrica, con un techo y suelo en forma de cúpula donde se almacena el biogás dentro del sistema, ya que no cuentan con un gasómetro, estos biodigestores se construyen con materiales rígidos como hormigón, ladrillo, tanques plásticos o una combinación de estos, lo que permite adaptar el sistema de agitación, sin embargo, debido a su tamaño, no se pueden transportar después de su construcción (Curilla, 2022).

Continuos

En estos biodigestores, la carga de materia orgánica es continua, lo que los convierte en una opción ideal para el tratamiento de aguas residuales, como resultado de este proceso continuo, se produce una cantidad notable de biogás (Tobon, 2018).

Semicontinuos

En este tipo de biodigestores, la carga se realiza diariamente, y la cantidad de materia orgánica que entra es igual a la cantidad de biogás producido, estos biodigestores son comúnmente adoptados en zonas remotas, entre los diseños más

empleados y conocidos para este tipo de biodigestores se encuentran la cúpula fija, el tipo chono, hindú, tubular o el tipo salchicha (Tobon, 2018).

Parámetros Operativos

Temperatura

La temperatura desempeña un papel crucial en el proceso de producción de biogás, ya que influye directamente en su eficiencia, es fundamental asegurar las condiciones térmicas óptimas para acelerar el ritmo de producción.

La temperatura es el parámetro que influye en el crecimiento y la vitalidad de las bacterias presentes en los biodigestores, diferentes tipos de bacterias prosperan en distintos rangos de temperatura, por ejemplo, los microorganismos termófilos, que pueden soportar condiciones extremas de temperatura, se desarrollan en rangos entre 26°C y 79°C, siendo óptimo su crecimiento a 56°C. Por otro lado, los microorganismos psicrófilos, capaces de vivir a temperaturas por debajo de los 5°C, prosperan en rangos entre -5°C y 29°C, siendo los 15°C el punto más alto de su reproducción, finalmente, se encuentran los mesófilos, cuya temperatura de crecimiento óptima está entre los 20°C y los 45°C, siendo su temperatura óptima de desarrollo alrededor de 30°C (Castro, 2018).

En la figura (5), se muestra la gráfica de temperatura de proliferación bacteriana de diferentes tipos de microorganismos.

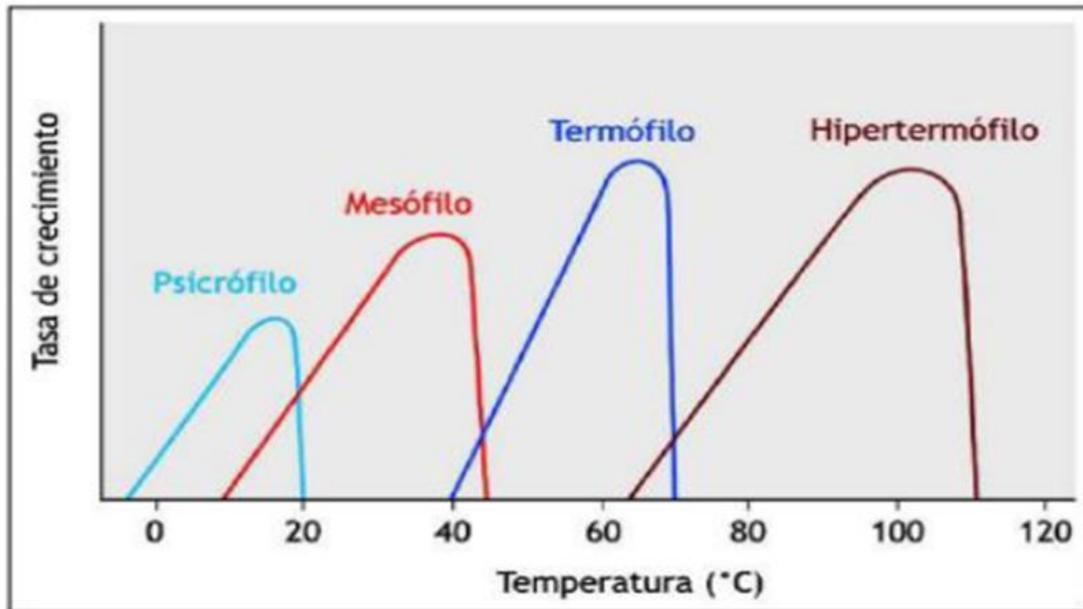


Figura 5 Gráfica de Temperatura de Proliferación Bacteriana

Fuente: (Lopez, 2017).

Parámetros de Funcionamiento de Biodigestor

De acuerdo con Tavizó (2010), algunas condiciones fundamentales para asegurar el funcionamiento óptimo de un biodigestor, son el pH, que determina el nivel de acidez o alcalinidad del medio; la presión, que puede influir en el proceso de digestión anaeróbica; la materia prima utilizada, que puede variar en composición y calidad; la humedad, que es crucial para mantener un ambiente propicio para la actividad microbiana; el tiempo de retención, que indica el período durante el cual los sustratos permanecen en el biodigestor; los sólidos volátiles presentes en la materia orgánica, que son los componentes susceptibles de ser convertidos en biogás; y el tiempo de retención hidráulica, que determina la velocidad de flujo del sustrato a través del biodigestor. Además, la ausencia de oxígeno, la presencia de material orgánico adecuado y la granulometría del sustrato también son factores importantes a considerar para maximizar la producción de biogás y asegurar el funcionamiento adecuado del biodigestor a lo largo del tiempo. A continuación, se describen algunas de ellas:

Nivel de pH, Acidez o Alcalinidad

Durante el proceso de digestión anaeróbica en el biodigestor, el pH óptimo se sitúa entre 6,6 y 7, valores por debajo de 5 o por encima de 8 pueden resultar en la detención del proceso de fermentación, por lo que, mantener un pH adecuado es fundamental para asegurar la actividad óptima de las bacterias responsables de la producción de biogás, además de evitar la proliferación de microorganismos no deseados que podrían afectar negativamente el proceso (Peláez Merchán, J. M., 2020).

Presión:

Durante el inicio de la generación de gas dentro del biodigestor, se produce un aumento de la presión en su interior, por lo que es importante, monitorizar esta presión mediante el uso de un manómetro con una escala de 10 PSI, libra por pulgada cuadrada (Tavizó, 2010).

Granulometría

Con el propósito de acelerar el proceso de fermentación, la materia suministrada al biodigestor se encuentra fragmentada en trozos muy pequeños, esto permite agilizar las reacciones metabólicas de las comunidades microbianas presentes (Tavizó, 2010).

Humedad

La presencia de agua es crucial para la generación de biogás, ya que actúa como uno de los medios que facilita las reacciones químicas y biológicas necesarias para la descomposición de la materia orgánica y la producción de biogás (Tavizón, 2010).

Tiempo de Retención

El tiempo de retención se refiere al período durante el cual la materia orgánica permanece dentro del sistema para su degradación, este tiempo está estrechamente relacionado con la temperatura ambiente, en condiciones óptimas, donde la temperatura es de 30°C, se recomienda un tiempo de retención (TR) de 20 días para asegurar una descomposición efectiva de la materia orgánica (Tavizó, 2010).

Sólidos Volátiles

El volumen de la masa de materia orgánica que contiene la biomasa, se comprende como los sólidos volátiles (SV), este representa el contenido real de la materia orgánica empleada, el resto comprende humedad, trazas inorgánicas y otras materias que no influyen en la producción de biogás (Torres Pérez, A. G., 2020).

Tiempo de Retención Hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es el período durante el cual la materia orgánica a digerir, permanece dentro del biodigestor, este valor depende de varios factores, como la temperatura ambiente, la materia orgánica empleada y la carga orgánica del reactor, una materia orgánica fácil de degradar requiere menos TR (Torres Pérez, A. G., 2020).

Tipos de Sustratos

Sustratos

Es el componente más importante del proceso de digestión anaerobia, ya que, en circunstancias ideales, determina el grado de metano y el volumen de gas producido, se considera el principal componente del proceso anaeróbico, y su biodegradabilidad es lo que determina la velocidad del proceso y la calidad del biogás producido (Rojas & Contreras, 2018).

Para determinar las características del sustrato, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros: el grado de dilución, la concentración, características cuantitativas, el porcentaje de Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), estos parámetros son cruciales para el desarrollo del proceso de metanogénesis (FAO, 2011).

Los sustratos, que suelen ser de naturaleza orgánica, permiten a las bacterias descomponerlos hasta producir biogás, estos compuestos pueden incluir desechos orgánicos de origen animal, como estiércol vacuno, porcino, avícola y de cuyes, además de desechos de origen vegetal, como residuos de arroz, maíz o grama. Por otro lado, se recomienda que al menos dos tercios del total del sustrato sean de origen animal (Torres Pérez, A. G., 2020).

Además, las bacterias requieren nutrientes específicos para su metabolismo, principalmente carbono en forma de carbohidratos y nitrógeno presente en proteínas, nitratos, amoniacó, entre otros, el carbono lo utiliza para obtener energía, mientras que el nitrógeno lo emplean para la construcción de estructuras celulares, ambos nutrientes son necesarios para el crecimiento y reproducción bacteriana, siendo el carbono consumido de 25 a 30 veces más que el nitrógeno (Vega, 2018).

En la tabla N° (9) se muestran algunos desechos orgánicos de origen animal y sus propiedades.

Material	%Humedad	%Sólidos Totales	%Carbono Base Seca	%Nitrógeno Base Seca	Relación C/N en peso
		ESTIERCOL			
Vacuno	79	21	32	1,5	21
Ovino	73	27	60	3,7	16
Equino	75	25	47	2,4	20
Porcino	69	31	73	2,6	28
Aves de corral	44	56	70	6,0	12
Auquénidos	57	43	42	3,7	11
Cuyes	32	60	37	2,2	17
Conejos	20	80	37	2,02	23

Tabla 9 Desechos Orgánicos de Origen Animal

Fuente: Torres Pérez, A. G. 2020).

Producción de Biogás y Otros Elementos

Biogás

El biogás, es una mezcla gaseosa compuesta principalmente de metano y dióxido de carbono, además de diversas impurezas, la composición del biogás está estrechamente relacionada con el material digerido y el funcionamiento del proceso de digestión, cuando la cantidad de metano presente en el biogás supera el 45%, este se convierte en un gas inflamable. Se estima que esta producción alcanza aproximadamente 300 m³ por tonelada de materia seca, con un poder calorífico de alrededor de 5.500 Kcal/m³ (Peláez Merchán, J. M., 2020). Por ende, en la tabla (10), se muestra las propiedades de este gas.

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Tabla 10 Propiedades específicas del Biogás

Fuente: (Peláez Merchán, J. M. 2020).

Composición del Biogás

El biogás contiene aproximadamente entre un 55 % y un 70 % de metano y entre un 35 % y un 40 % de dióxido de carbono. Además, presenta una pequeña cantidad de ácido sulfhídrico, que es responsable de generar el olor a huevos podridos (Marti, 2008). A continuación, en la Tabla N° (11), se muestra la composición química del Biogás.

Componente	Porcentaje (%)
Metano (CH ₄)	54 a 70
Dióxido de carbono (CO ₂)	27 a 45
Nitrógeno (N ₂)	0,5 a 3,0
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0 a 0,1
Hidrógeno (H ₂)	1 a 10

Tabla 11 Resumen de composición Química del Biogás

Fuente: Guerrero (2012).

Biol

Se denomina biol a la parte líquida resultante del proceso de digestión anaeróbica, esta resulta de la descomposición del 90% del material orgánico que ingresa al biodigestor, mientras que se eliminan los gases generados en el proceso, los cuales representan entre el 1% y el 5% del volumen total de la materia prima empleada, este componente, está destinado al fortalecimiento, crecimiento y desarrollo de las plantas (Guerrero, 2012).

Biosol

El biosol es un fertilizante orgánico que resulta del proceso de digestión anaeróbica en el interior de un biodigestor, durante este proceso, los desechos orgánicos se descomponen, liberando hormonas vegetales, vitaminas, aminoácidos, macro y micronutrientes, estos componentes presentes en los biofertilizantes, regulan el metabolismo de las plantas, así como en el enraizamiento, crecimiento, floración y germinación de semillas, además, contribuyen al control de enfermedades y plagas, y promueven la presencia de microorganismos beneficiosos. El biosol se utiliza tanto en cultivos tradicionales como orgánicos debido a su capacidad para mejorar la salud de las plantas y la calidad del suelo, además, su uso genera un bajo impacto ambiental, lo que lo convierte en una opción favorable para la agricultura sostenible (Sánchez, J. D. C. et al., 2023).

Beneficios de Implementación de Biodigestores a Nivel Rural

Beneficios económicos:

El desarrollo de tecnologías para la gestión adecuada de desechos orgánicos conlleva múltiples beneficios, estos incluyen la producción de energía y abonos orgánicos, así como el impulso a la agricultura orgánica, este enfoque reduce la dependencia de fertilizantes externos, lo que promueve la sostenibilidad y la autonomía para los productores agrícolas, además, al aprovechar los recursos forestales

disponibles, fomenta la integración comunitaria y el intercambio de conocimientos, fortaleciendo así el tejido social (Guerrero Vargas, 2021).

Beneficios ambientales:

La disponibilidad de tecnologías que permiten la transformación de desechos orgánicos en materia prima para la producción de fertilizantes ecológicos es fundamental, esto contribuye a la recuperación de suelos, además, este enfoque facilita la transición hacia modelos más limpios de agricultura y producción de energía, lo que ayuda a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, además al emplear estos abonos orgánicos y generar energía de manera más amigable con el medio ambiente, se promueve una mayor sostenibilidad y respeto por el entorno natural (Guerrero Vargas, 2021).

Sustratos

Material de origen orgánico procedente de desechos animales o vegetales, este componente se deposita en un contenedor donde puede ser convertido en energía, ya sea de forma individual o mezclado, lo que permite el desarrollo de los microorganismos (Apolo, 2015), en términos generales, los sustratos se pueden clasificar en cuatro clases según sus características físicas, grado de dilución, nivel de concentración y características cuantitativas, como el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y la demanda química de oxígeno (DQO) (FAO, 2011). La naturaleza y composición química del sustrato son variables que influyen en la composición cualitativa de las diferentes poblaciones bacterianas en cada etapa del proceso. Esto establece un equilibrio que puede ser fácilmente perturbado si algún tipo de tóxico impide el desarrollo de alguna de las poblaciones bacterianas (García Salazar, 2019).

Es importante destacar que existen diversos sustratos que son susceptibles a la degradación mediante el proceso de digestión anaerobia, como ha sido señalado por Alcobendas en 2020.

Purín

Estos residuos orgánicos, de origen principalmente ganadero, están compuestos por una mezcla de heces y orines de diferentes animales, así como agua de lavado y residuos de comida, como señala Serrano E.M. en 2001. Dada la importancia de las aplicaciones asignadas a este residuo, es crucial conocer su composición. Este efluente presenta una elevada carga orgánica y un pH prácticamente neutro. No obstante, su composición puede variar significativamente debido a factores como la dieta del ganado, la edad de los animales y el régimen de explotación de la granja, entre otros. Del total de nitrógeno presente en el purín, aproximadamente el 70% corresponde a nitrógeno amoniacal, mientras que el resto se atribuye a nitrógeno orgánico, según lo indicado por Serrano E.M. en 2001.

Aceite de colza

El aceite de colza tiene una alta carga orgánica debido a su naturaleza oleica, lo que lo convierte en un excelente co-sustrato para la digestión anaerobia, aumentando así la concentración de metano en el biogás producido. Según la literatura, existen varios estudios que han investigado el uso del aceite de colza en procesos de digestión anaerobia (Kougias et al., 2015).

Sorgo

El sorgo, una planta originaria de África tropical, fue introducido en los Estados Unidos en su variedad Durra, lo que permitió su amplia difusión (Vallati, 2001). En varias partes del mundo, el sorgo está reemplazando al cultivo de maíz y su importancia ha crecido debido a su uso en la alimentación humana. En la industria de la panificación, la harina de sorgo está ganando popularidad; de hecho, se ha demostrado que puede sustituir hasta un 50% de la harina de trigo en mezclas para la elaboración de pan, manteniendo la calidad del producto final (Zeledón et al., 2007).

Además de su uso como alimento para animales y humanos, el sorgo puede desempeñar un papel clave como sustrato degradable en un proceso anaeróbico para la

producción de gases con valor energético, en lo que se conoce como co-digestión anaerobia. Según Dareioti (2015), numerosos investigadores han llevado a cabo diversas experiencias para producir biogás e hidrógeno a partir de este cultivo.

Triticae

El triticae es el resultado de un cruce artificial realizado por el hombre entre el trigo y el centeno. Este cruce se llevó a cabo con el objetivo de combinar la calidad del grano (particularmente su contenido proteico y de aminoácidos) y la productividad del trigo con el vigor de la planta de centeno, su resistencia a la sequía, bajas temperaturas y su capacidad para crecer en suelos limitantes (Mellado et al., 2008). Precisamente, las ventajas de este cultivo, al igual que las del sorgo, lo convierten en una excelente materia prima para la producción de bioenergía (Cantale et al., 2016).

Rastrojo de maíz

El rastrojo de maíz se refiere al conjunto de tallos y hojas que quedan en el terreno después de cosechar el cereal. Este cultivo fue introducido en Europa desde México en el siglo XVII. En la actualidad, el maíz está completamente adaptado a las condiciones de la región extremeña, destacándose por su gran capacidad para crecer en diversos climas. Después de la cosecha, los restos de la planta, o rastrojo, pueden secarse y empacarse para ser utilizados como alimento para animales (Sinclair R et al., 1992).

Debido a su contenido de materia orgánica, su alto contenido de carbono (43%), y su proporción adecuada entre los macronutrientes carbono y nitrógeno (35), el rastrojo de maíz se convierte en un sustrato muy adecuado para ser utilizado en co-digestión con purines (YuQian L et al., 2017).

Disponibilidad de Sustratos

El Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) determinó que en Colombia, el área destinada al uso agropecuario abarca 43 millones de hectáreas, distribuidas en un 80 % para pastos y rastrojos, un 19,7 % para uso agrícola y un 0,3 % para el desarrollo de infraestructura agropecuaria (DANE, 2016). La ganadería ha sido identificada como una de las fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (M. Peters et al., 2013). Diversos autores han propuesto alternativas para mitigar este impacto negativo, entre ellas, la digestión anaeróbica (DA), que se presenta como una alternativa a la biomasa tradicional. La DA no solo reduce el impacto medioambiental por emisiones de gases, sino que también disminuye la dependencia de los combustibles fósiles y agroquímicos (N. Sharma et al., 2016). Las fuentes de sustrato más empleadas en la DA incluyen cultivos y residuos agrícolas, aguas residuales, algas marinas, residuos sólidos municipales, estiércol y desechos animales, desechos biodegradables industriales, cultivos y residuos forestales, y melaza, entre otros (T. Abbasi et al., 2012).

En las naciones en vías de desarrollo, se constata una significativa pérdida de alimentos, principalmente atribuible a las fases de almacenamiento, refrigeración y transporte en la cadena de suministro alimentario. Esta problemática conduce al desperdicio de un considerable volumen de frutas y verduras, lo que representa aproximadamente el 50% del total del desperdicio alimentario a nivel mundial. Esta cifra, según lo señalado por Anaya (2017), evidencia la incidencia de fallos en los eslabones de producción y consumo.

En Colombia, se estima que aproximadamente el 34% de los alimentos se pierden y desperdician anualmente, lo que equivale a una cantidad considerable de 9,76 millones de toneladas. De este total, el 22% (equivalente a 6,22 millones de toneladas) se pierde, mientras que el 12% (3,54 millones de toneladas) se desperdicia. Es relevante resaltar que alrededor del 58% (aproximadamente 6,1 millones de toneladas) de esta pérdida y desperdicio se atribuye a frutas y verduras, según lo indicado por la DPN en 2016.

Según datos del Ministerio de Salud y la FAO (2012), en Colombia, durante el año 2010, se desperdiciaron en la poscosecha una cantidad significativa de frutas y verduras.

Este desperdicio representó el 39% del total de la oferta de frutas y verduras de ese año. Dentro de esta pérdida total, el 32% correspondía a frutas, equivalente a 1.154.923 toneladas, y el 7% a verduras, equivalente a 272.009 toneladas, según lo señalado por la DPN en 2016.

En el caso específico de Colombia, en el procesamiento de productos como café, palma de aceite, caña de azúcar, panela, maíz, arroz, banano y plátano, se registra una producción anual de 14.974.807 toneladas. Sin embargo, se estima que se generan alrededor de 71.943.813 toneladas al año de residuos, los cuales en su mayoría son incinerados o depositados en rellenos sanitarios, según lo mencionado por Chávez en 2016.

Con base en los datos anteriores, se puede concluir que la disponibilidad de material orgánico como materia prima para un proceso de digestión anaerobia es factible en Colombia. La cantidad considerable de material orgánico de desecho generado en el país sugiere que es posible aprovecharlo y, por ende, valorizar un producto que de otro modo sería destinado a un relleno sanitario o a la incineración, como señaló González en 2017.

Manejo

Aspectos como el potencial de acidificación, el contenido de materia seca y el riesgo de patógenos establecen los parámetros sobre cómo debe manejarse el sustrato, además, la composición química y biológica del sustrato determina el tipo de material de construcción adecuado para el biodigestor (A. Wellinger et al., 2013). Asimismo, la calidad del sustrato puede mejorarse mediante la variación del tamaño de las partículas del sustrato que alimenta el biodigestor, a través de pretratamientos térmicos, químicos o termoquímicos, así como mecánicos (S. Fang et al., 2011).

Pretratamiento Térmico

Por lo general, se lleva a cabo un pretratamiento térmico en el sustrato, aplicando calor con el objetivo de descomponer los residuos orgánicos complejos en compuestos

más simples y biodegradables, esta etapa afecta principalmente la hidrólisis, reduciendo la cantidad de lodos e incrementando la producción de biogás (S. Fang et al., 2011).

En la tabla (12), se muestra la Relación del tiempo de retención hidráulica en función de la temperatura de algunas baterías, en esta se mide su rendimiento poblacional, comparando la temperatura ideal y el tiempo requerido.

Estado térmico	Temperatura de operación	Tiempo de retención mínimo
Psicrofílico	$< 20^{\circ}\text{C}$	70 – 80 días
Mesofílico	$30 - 42^{\circ}\text{C}$	30 – 40 días
Termofílico	$43 - 55^{\circ}\text{C}$	15 – 20 días

Tabla 12 Estado Térmico de Baterías

Fuente: (S. Fang et al., 2011).

Pretratamiento Químico

El pretratamiento químico mejora significativamente la digestibilidad de los sustratos, especialmente aquellos de tipo lignocelulósico, de origen vegetal, los cuales están compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina (S. Fang et al., 2011), esta técnica implica la adición de productos químicos, como el hidróxido de sodio (soda cáustica) o el hidróxido de calcio, cal básico cristalina y blanca, para facilitar la degradación del carbono presente en los sustratos (W. Uddin et al., 2016), el proceso, también conocido como tratamiento alcalino, tiene efectos positivos en el aumento del contenido de metano (CH_4) (F. Monlau et al., 2015), además, este proceso puede potenciarse mediante la aplicación de calor, lo que se conoce como pre tratamiento termoquímico (H. Wang et al., 2009).

Pretratamiento Mecánico

El pretratamiento mecánico consiste en reducir el tamaño de las partículas del sustrato para incrementar el área de contacto de las bacterias y mejorar la absorción del sustrato (Uddin et al., 2016), para llevar a cabo este proceso, se pueden utilizar molinos de bolas con agitación o homogeneizadores de alta presión (S. Fang et al., 2011). Además, una técnica para climas fríos es agregar anillos de PET al interior del biodigestor, lo que incrementa la superficie de contacto entre las bacterias y el sustrato (Y. Liu et al., 2017), este pretratamiento tiene la ventaja de reducir el tiempo de digestión entre un 23 % y un 29 % en comparación con el proceso sin pretratamiento (S. Fang et al., 2011).

Riesgos Asociados de los Sustratos

El principal riesgo asociado al uso de biodigestores es la presencia de patógenos en el gas combustible y los biofertilizantes, por lo que es necesario investigar cada materia orgánica para encontrar la mezcla o aditivos que garanticen una estabilidad biológica óptima (Vinnerås, 2011), por consiguiente, una de las áreas de investigación que surge de la implementación de biodigestores es la evaluación de la estabilidad química y biológica de los biofertilizantes por ejemplo, Veroneze et al. (2019) llevaron a cabo pruebas en cinco biodigestores diferentes, utilizando mezclas de agua, materia orgánica y glicerina para lograr una mejor estabilidad biológica del producto final.

Por otra parte, la calidad del biol resultante del proceso de digestión anaeróbica en los digestores está estrechamente relacionada con el tipo de sustrato utilizado, así como con sus pretratamientos (Albuquerque et al., 2012). Por su parte, el biol contribuye beneficiosamente al suelo, mejorando el almacenamiento de nutrientes, la retención de humedad y la estimulación de la actividad microbiana (Muscolo et al., 2017).

Por lo tanto, la adición de materia orgánica inestable puede estimular una actividad microbiana excesiva, lo que resulta en un sustrato con niveles elevados de CO₂, el cual, al ser aplicado en el suelo, genera una reducción del oxígeno, esto puede provocar pérdida de nitrógeno y efectos de fitotoxicidad, que se refiere al grado de efecto tóxico

producido por un compuesto sobre el crecimiento de una planta, afectando así su desarrollo adecuado (M. Solé-Bundó et al., 2017). Por lo que, es necesario una adecuada preparación de los sustratos para garantizar su uso seguro en cultivos y la agricultura.

Una de las actividades más comunes para obtener sustratos, es la separación de las fracciones líquidas y las sólidas, utilizando el efecto de la gravedad o máquinas centrífugas dentro del biodigestor (Wellinger et al., 2013), los sólidos mejoran la estabilidad del suelo donde se aplican y aumentan el nivel de humedad, por otra parte, la fracción líquida puede ser empleada como riego para cultivos. Por ende, al realizar un adecuado pretratamiento de la materia orgánica, se asegura que los sustratos sean eficientes para el desarrollo sostenible de alimentos y cuidado del medio ambiente (Muscolo et al., 2017).

Compatibilidad del Sustrato

La co-digestión anaeróbica no se limita a una simple digestión, sino que requiere la selección óptima de proporciones entre los diferentes sustratos para fomentar la sinergia entre los nutrientes y los microorganismos presentes en el sistema, este enfoque permite reducir los efectos inhibitorios y aumenta la capacidad de amortiguación del sistema, mejorando así el contenido de nutrientes en el biodigestor, entre los co-sustratos más utilizados en la co-digestión anaeróbica se encuentran los lodos residuales, estiércoles, residuos sólidos urbanos y agroindustriales (Castro, 2016).

La co-digestión se implementa para desarrollar un balance nutricional adecuado, considerando la relación carbono/nitrógeno (C/N), así como la presencia de macro y micronutrientes, esto permite reducir los componentes potencialmente tóxicos o inhibidores del proceso, como el amoníaco, que frecuentemente actúa como inhibidor en la digestión anaeróbica de residuos con alto contenido de nitrógeno, como los lodos de aguas residuales y los estiércoles (Orejuela Correa, 2021). La co-digestión de materiales lignocelulósicos junto con abonos animales es una estrategia efectiva para equilibrar la relación C/N del material a procesar mediante digestión anaeróbica, generando simultáneamente un subproducto rico en nutrientes que puede emplearse como fertilizante (Neshat et al., 2017).

Contenido de Sólidos Volátiles

Para evaluar la biodegradabilidad de los residuos orgánicos dentro del biodigestor, se utiliza comúnmente el contenido de sólidos volátiles, sin embargo, emplear los SV como medida de la fracción orgánica puede resultar engañoso, debido a que algunos componentes orgánicos, aunque altamente volátiles, presentan una baja tasa de biodegradabilidad, como es el caso del papel periódico y los residuos de jardín, por lo tanto, se considera que estos residuos son más precisos para una buena biodegradabilidad de los sustratos (Huaccha Castillo et al., 2023). En la tabla 13, se presentan los componentes de un sustrato con las cantidades de SV y lignina.

Componentes de los RRSS	Sólidos volátiles (SV) (%)	Contenido de lignina (CL) (%)
Residuos de comida	7-15 ; 11	0.4
Residuos: cartón y papel	-	-
Papel de periódico	94.0	21.9
Cartón	94.0	12.9
Papel de oficina	96.4	0.40
Residuos de jardín	50-90 ; 70	4.10
Otros	-	-

Tabla 13 Características de los RRSS

Fuente: Huaccha Castillo et al., (2023).

Relación Carbono/Nitrógeno

Los diversos materiales utilizados en procesos de fermentación están compuestos principalmente por Carbono (C) y Nitrógeno (N), a continuación, se presenta la relación C/N proporcionada por diferentes tipos de biomásas, destacando el estiércol bovino y la orina, que presentan una relación más baja en comparación con otros sustratos (Varnero, 2011).

Sustancia	Relación C/N	Sustancia	Relación C/N
Orina	0,80	Estiércol de cerdos	13
Estiércol equino	25	Cascaras de papa	25
Estiércol Vacuno	18	Hojas secas	41
Pasto	27	Estiércol ovino	29

Tabla 14 Relación C/N de Sustratos

Fuente: (Varnero, 2011).

Costos de Adquisición de Sustratos

Los costos asociados a la adquisición de sustratos están sujetos a diversos factores, como el costo del transporte, la cantidad y el peso del sustrato (Trapé, 2023), además del coste que implica su almacenamiento, ya que cada tipo de sustrato requiere diferentes atenciones, lo cual impacta en el coste de operación (Chacón Inostroza, 2023). Una estrategia adecuada para determinar qué tipo de sustrato elegir es hacer una comparación entre el coste y el beneficio de su adquisición, además de considerar su disponibilidad y localización, debido a que la falta de un flujo constante del producto puede detener las operaciones en el biodigestor (Sánchez, 2020).

Producción de Biogás

El biogás es una mezcla de varios gases, principalmente contiene metano, lo que lo hace inflamable, cuando su contenido es superior a 45%, para comprender mejor la relación entre el sustrato y las variables necesarias para la producción de biogás, como la cantidad de sólidos totales (ST), los litros de gas producido por kilogramo de sustrato

y la cantidad de metano producido, se presenta a continuación la Tabla N° 15, que muestra la relación entre estas variables para diferentes tipos de sustratos (Huaraya Huahualuque et al., 2020).

Sustrato	ST (% de Kg de sustrato)	L de biogás por Kg de sustrato	%CH ₄
Estiércol de vacuno	7-10	9.7- 34.0	65
Estiércol de cerdo	5-7	11.6-28.4	65-70
Estiércol de gallinaza	18-32	44.6-172.6	60
Estiércol de ovino	25-30	28.8-105.8	63
Estiércol de caprino	2-4	50-250	63

Tabla 15 Relación C/N de Residuos

Fuente: (Huaraya Huahualuque et al.,2020).

En la investigación realizada por Durazno (2018), se llevaron a cabo pruebas para determinar la producción de biogás a partir de sustratos de estiércol bovino y porcino, el objetivo principal era valorizar estos residuos, generando productos como biogás y fertilizante, a continuación, se presentan las cantidades de biogás producidas, junto con otros parámetros como presión y temperatura, en la tabla número 16.

T.R. (Días)	Temperatura (°C)	Presión (PSI)	Biogás (Litros)	Biogás (m3)
10	13,9	10	7	0,007
20	13,7	10	8,1	0,0081
30	14,45	12	10	0,01
40	14,8	16	14,2	0,0142
50	14,5	12	9,5	0,0095
Resultados	14,27	12	48,8	0,0488

Tabla 16 Variables de Producción de Biogás

Fuente: (Durazno, 2018)

Por otro lado, en la siguiente tabla número 17 se muestran las variables a través del tiempo para la producción de biogás a base de estiércol porcino.

T.R. (Días)	Temperatura (°C)	Presión (PSI)	Biogás (Litros)	Biogás (m3)
10	14,9	12	10,2	0,0102
20	13,9	15	12,3	0,0123
30	14,35	22	18,5	0,0185
40	14,1	15	13,3	0,0133
50	15,4	12	11,6	0,0116
Resultados	14,53	15,2	65,9	0,0659

Tabla 17 Biogás a Base de Estiércol Porcino

Fuente: (Durazno, 2018)

Tomando como referencia la revisión realizada por González (2017), cuyo propósito fue analizar la producción de biogás al someter diferentes tipos de sustratos al proceso de digestión anaeróbica, a continuación, se muestran los resultados obtenidos en esta investigación en la tabla N° 18.

N.º	Sustrato	Proporción	Producción		Temperatura	C
			Biogás	CH ₄		
			L/L*d	L/L*d	°C	%v/v
1	Estiércol de vaca + lodo primario + suero de caseína	10:5:1	1,86	1,21	37	65,05%
2	Estiércol de vaca + remolacha	3:1	-	1,22	35	-
3	Estiércol de vaca + arbusto salix	1:3	-	0,63	37	-
4	Estiércol de vaca + residuos de comida	-	1,69	1,53	36	90,53%
5	Estiércol de vaca líquido + El suero de queso	2:1	2,60	1,46	35	56,15%
6	Estiércol de vaca líquido + aguas residuales del molino de aceituna + suero de queso	11:8:1	0,50	0,13	37	26,00%
7	Estiércol de cerdo (sólido) + Ensilado de pasto seco	3:2	-	0,27	35	-
8	Estiércol de cerdo + subproducto de remolacha azucarera	1:1	-	2,91	37	-
9	Estiércol de cerdo + desechos de pescado + residuos de melaza de remolacha	3:1:1	0,35	0,22	37	62,86%
10	Estiércol de vaca + suero de queso	3:2	1,66	0,83	35	50,00%
11	Estiércol de cerdo + residuos de yuca	4:6	2,05	1,40	37	68,29%
12	Estiércol de vaca + abono de vaca con paja + residuos de frutas y hortaliza	1:1:2	-	1,38	35	-

N.º	Sustrato	Proporción	Producción		Temperatura	C
			Biogás	CH ₄		
			L/L*d	L/L*d	°C	%v/v
13	Estiércol de cerdo + desechos de procesamiento de hortalizas + hojarasca + lodos anaeróbicos	1:1:1:1	-	0,97	35	-
14	Estiércol de cerdo + pulpa de yuca	1:4	0,59	0,33	35	55,93 %
15	Estiércol de cerdo + plumas crudas inoculadas con lodo de matadero	1.3:1:1.75	-	0,99	25	-
16	Estiércol de vaca + residuos de cocina	1:1	-	0,70	35	-
17	Estiércol de vaca + residuos de cultivos	1:1	0,52	0,29	35	56,12 %
18	Estiércol de vaca + remolacha	4:1	2,81	1,66	55	59,02 %
19	Estiércol de vaca + estiércol de oveja y de llama	1:3	1,75	0,84	16,6	48,00 %
20	Estiércol de cerdo + residuos de cocina (vegetales residuales, carne, arroz y fideos)	1:1	3,75	2,38	35	63,53 %
21	Estiércol de pollo + pasto de Napier	1:1	0,80	0,52	150	65,00 %
22	Estiércol de ganado sólido y líquido + maíz + fruta + pan	3:2:2:2	2,90	1,71	47	58,97 %

Tabla 18 resultados de cantidad de biogás y metano

Fuente: González (2017).

Impacto Ambiental

La implementación de biodigestores anaeróbicos para generar biogás como combustible para la generación de energía renovable impacta positivamente el medio ambiente, este proceso reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuyendo la deforestación asociada con la extracción de leña, y mejora la salud al reducir la exposición al humo generado en las cocinas, además, en la agricultura, ayuda a minimizar la dependencia de fertilizantes sintéticos, lo que tiene un impacto positivo en la calidad del agua y del suelo de los ecosistemas (Martí-Herrero et al., 2014).

Además, el uso de residuos orgánicos y excremento animal para producir biogás y digestatos en Latinoamérica se usan aproximadamente 316 millones de toneladas de CO₂ al año (Surendra et al., 2014). Esta acción promueve el desplazamiento y la reducción del consumo de combustibles fósiles no renovables, al tiempo que disminuye la producción de CO₂ que no forma parte del ciclo normal del carbono (Ward et al., 2008).

Se considera que la combustión del biogás es carbono neutral, ya que el CO₂ liberado durante este proceso es producido por la mineralización natural. Este CO₂ ha sido previamente retirado de la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis de las plantas, que lo absorben como sustrato, y mediante la alimentación de los animales, reflejando así el ciclo natural del carbono (Seadi et al., 2008).

El biogás, al ser un combustible limpio, desempeña un papel crucial en la reducción de la deforestación asociada al uso de leña. Las cocinas que funcionan con biogás han demostrado reducir el consumo de leña y carbón en un rango del 66 % al 80 % a nivel mundial, gracias a su mayor eficiencia (REN21, 2017). Investigaciones específicas indican que el uso de biogás puede resultar en un ahorro de hasta 1.88 toneladas de leña al año por familia (Garfí et al., 2012), y alrededor de 3 toneladas por año en sistemas mejorados de digestión anaeróbica (Katuwal et al., 2009).

Las estufas de biogás también han tenido un impacto significativo en la reducción de enfermedades respiratorias, como infecciones agudas, bronquitis, asma, cáncer de pulmón e infecciones de oído, provocadas por la inhalación de humo en las cocinas (Bruce et al., 2000). Las mejoras en la calidad del aire oscilan entre el 25 % y el 60,5 %, dependiendo de la eficiencia de las estufas. Este beneficio es especialmente relevante para mujeres y niños, quienes pasan más tiempo en la cocina y son más susceptibles a los efectos nocivos del humo (Katuwal et al., 2009).

En la agricultura, el aprovechamiento de la fracción sólida del digestato puede reemplazar a los fertilizantes sintéticos, lo que conlleva una notable reducción del impacto ambiental generado por las emisiones de CO₂ y CH₄ derivadas de los procesos industrializados de producción de estos fertilizantes (Muscolo et al., 2017). Sin embargo,

los beneficios ambientales asociados dependen de cada fase de la cadena productiva del biogás y el digestato, y resulta crucial gestionarlas de manera adecuada para prevenir posibles efectos adversos en el medio ambiente (Ruile et al., 2015). La adquisición del sustrato puede generar una huella de carbono debido al transporte, por lo que se recomienda evaluar las fuentes locales de sustratos y establecer mecanismos adecuados para su recolección. En cuanto a la producción y operación de los biodigestores, conllevan consumos de energía, materiales y recursos necesarios para los tratamientos del sustrato, el biogás y el digestato (Poeschl et al., 2012).

Impacto social

Se estima que alrededor de 1.2 mil millones de personas, aproximadamente el 16 % de la población mundial, carecen de acceso a la electricidad, mientras que cerca de 2.7 mil millones de personas, el 38 % de la población global, no disponen de tecnologías adecuadas para cocinar. En América Latina, esta cifra afecta a unos 65 millones de personas (REN21, 2017). Los sistemas de producción de biogás se encuentran entre las formas de energía que más han contribuido a proporcionar electricidad y calor a las comunidades más necesitadas. A finales de 2015, se estimaba que alrededor de 700,000 biodigestores estaban en funcionamiento en países en desarrollo (REN21, 2017). Uno de los principales beneficios sociales para los habitantes rurales es la reducción del tiempo que mujeres y niños dedican a la recolección de biomasa sólida y la cocción de alimentos. El tiempo ahorrado suele invertirse en actividades de esparcimiento, aprendizaje y desarrollo de procesos productivos. Muchas mujeres destinan este tiempo a actividades comunitarias, lo que contribuye al empoderamiento femenino en la sociedad (H. Katuwal et al., 2009). Asimismo, como se destacó anteriormente, la sustitución de la biomasa sólida, como la madera, el carbón, la hojarasca o el estiércol seco, por biogás, conlleva a entornos más saludables, libres de humo (A. Visser et al., 1996).

Beneficios Económicos

En comunidades rurales con recursos limitados y dificultades de acceso, los biodigestores tubulares de plástico representan la opción más económica. Los costos de materiales para un biodigestor tubular de plástico pueden situarse entre los 220 y 280 USD (Martí-Herrero et al., 2014). En contraste, los biodigestores fabricados con polietileno de alta calidad, PVC o geomembrana podrían tener un costo entre 500 y 700 USD, mientras que los modelos de domo fijo o tambor flotante podrían oscilar entre los 700 y 1.200 USD (Garfí et al., 2016). En la producción de calor para cocinar alimentos, el biogás tiene un costo específico de 0,17 USD por persona al día, lo cual es el más bajo en comparación con otras fuentes como la biomasa sólida (leña) con un costo de 0,5 USD por persona al día, el gas (LPG) con un costo de 0,43 USD por persona al día y la electricidad con un costo de 1,03 USD por persona al día (REN21, 2017).

En términos de generación de empleo, la producción de biogás demanda mano de obra para la producción, recolección y transporte de los sustratos, así como para la fabricación de equipos técnicos, construcción y mantenimiento. Esto crea empleos directos e indirectos, aumentando así los ingresos en las zonas rurales (Seadi et al., 2008). La producción del efluente digestato (conocido también como Biol) y su uso y comercialización como fertilizante orgánico han demostrado un gran potencial para mejorar los cultivos y, en consecuencia, aumentar los ingresos de los productores. Este subproducto incrementa la sostenibilidad económica de los pequeños agricultores al reducir los costos de fertilizantes (Muscolo et al., 2017). Además de los ingresos generados por el biogás y el digestato, existen beneficios asociados que contribuyen de manera indirecta tanto económica como ambientalmente. Estos incluyen la reducción de olores, la mejora en las cosechas y la disminución de maleza, la reducción de patógenos, la recuperación del contenido de agua en los sustratos y la disminución de gases de efecto invernadero. Estos beneficios asociados ofrecen nuevas e importantes perspectivas sobre la viabilidad de invertir en biogás y, por lo tanto, deben considerarse en los análisis financieros (Yiridoe et al., 2009).

Comparativo por autores.

Tras una revisión exhaustiva de la información sobre los diversos tipos de sustratos empleados en el proceso de digestión anaeróbica, se han identificado aquellos que muestran mayor relevancia y eficacia para el funcionamiento de un biodigestor anaeróbico, dentro de la metodología empleado, se desarrolló una revisión de literatura que consistió en la búsqueda de información sobre la digestores en bases de datos especializadas como SCIENCE DIRECT, SCOPUS, SCIELO y Google Académico, para una búsqueda precisa, se emplearon palabras claves, como: residuos orgánicos, biodigestor anaeróbico, aprovechamiento de residuos y biogás. Posteriormente, se seleccionaron artículos publicados en los últimos 20 años, por consiguiente, en la tabla (9), se presentan los datos que respaldan las decisiones tomadas.

N°	Titulo	Autores	Año	Criterios			
				Técnico	Ambiental	Social	Económico
1	Obtención de biofertilizantes enriquecidos en biodigestores semicontinuos a nivel laboratorio	Wong Arguelles, C., Acosta Pintor, D. C., Mojica Mesinas, C., Márquez, H. L., & Vidal Becerra, E.	2023	x	x		
2	Integración de la tecnología del biogás en la ganadería: estudio sobre la participación de los agricultores disposición a pagar por biodigestores en Madagascar	Andriamanohiarisoamanana, F. J., Randrianantoandro, T. N., Ranaivoarisoa, H. F., Kono, H., Yoshida, G., Ihara, I., & Umetsu, K.	2022	X	X	X	X
3	Evaluación de la ecoinnovación de la tecnología de biodigestores: una aplicación en industrias procesadoras de yuca en el sur de Brasil, estado de Paraná	de Jesus, M. A. S., Aguiar Dutra, A. R. de, Cirani, C. B. S., Jesus, K. R. E., Neto, R. C. S., & Guerra, J. B. A.	2022		x	x	x
4	Producción de biogás, biol y biomasa a partir de residuo orgánico	Edgar Palomino Arango, Jimmy Quispe Pizarro, N. O. S.	2022	x	x		
5	Producción de biogás a partir de procesos de digestión y co-digestión anaerobia usando estiércol de cerdo y residuos vegetales.	Gámez, C., Lozano, M., Cervera, C. A., & Quintero, J. A.	2022	x	x		
6	Una tecnología de conversión de residuos en energía para el enriquecimiento de la generación de biometano: una revisión de los parámetros operativos, tipos de biodigestores, sistemas de calefacción asistidos por energía solar, beneficios y desafíos socioeconómicos	Kalaiselvan, N., Glivin, G., Bakthavatsalam, A. K., Mariappan, V., Premalatha, M., Raveendran, P. S., Jayaraj, S., & Sekhar, S. J.	2022	x	x	x	x
7	Cuartos verdes sustentables	Reynoso Patiño, M. A., & Perales García, M. V.	2022	x	x		
8	Evaluación de la Producción de Biogás con la Aplicación de Diferentes Sustratos en un Biodigestor Anaeróbico Continuo a Partir de una Solución Numérica	Daniela, L., Rodríguez, M., Alberto, C., Trujillo, A., & Felipe, A.	2021	x	x		
9	Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable	Espinosa Mantilla, K. B.	2021	x	x		
10	Uso de biodigestor anaerobio en el tratamiento de residuos orgánicos de un restaurante universitario.	F. Granzotto, A. A.	2021	x	x	x	

11	Estudio comparativo de producción de biogás con estiércol de vaca y residuos de cocina en biodigestores de Plástico Reforzado con Fibra (FRP).	Glivin, G., Mariappan, V., Premalatha, M., Hareesh Krishnan, H., & Joseph Sekhar, S.	2021	x	x	x	
12	Cuantificación del impacto de la sustitución parcial de los combustibles tradicionales para cocinar por biogás en el calentamiento global: evidencia de Vietnam.	Jelínek, M., Mazancová, J., Van Dung, D., Phung, L. D., Benoit, J., & Rubik, H.	2021	x	x	x	x
13	Co-digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y su lixiviado	Benítez, M., Abalos, A., Rodríguez, S., & Ramírez, F.	2020	x	x	x	
14	Producción de Biogás Mediante Co-digestión de Estiércol Bovino y Residuos de Cosecha de Tomate	Castro Rivera, R., Solís Oba, M. M., Chicatto Gasperin, V., & Solís Oba, A.	2020		x	x	
15	Viabilidad económica de un biodigestor canadiense para energía. generación en ganadería lechera	Demeu, F. A., Lopes, M. A., Brandão Reis, E. M., Ribeiro Lima, A. L., de Melo Carvalho, F., Pascale Palhares, J. C., & Otenio, M. H.	2020		x	x	x
16	El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo	FAO	2020		x	x	
17	Las tecnologías de generación de energía a partir de residuos y las economías en desarrollo	Khan, I., & Kabir, Z.	2020	x	x		
18	Rendimientos de metano durante la co-digestión anaeróbica de estiércol animal con otras materias primas: un metanálisis	Ma, G., Ndegwa, P., Harrison, J. H., & Chen, Y.	2020	x	x		x
19	Producción de metano mediante co-digestión anaeróbica de biomasa de frutas tropicales y residuos sólidos urbanos.	Romero, H. I., Vega, C., Feijóo, V., Villacreses, D., & Sarmiento, C.	2020	x	x	x	
20	Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú	Barrena Gurbillón, M. A., Cubas Alarcón, F., Gosgot Angeles, W., Ordinola Ramírez, C. M., Rascón Barrios, J., & Huanes Mariños, M.	2019		x	x	
21	Pseudomonas spp. son jugadores clave en sustrato de biogás agrícola degradación	Buettner, C., von Bergen, M., Jehmlich, N., & Noll, M.	2019	x	x		
22	Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores	FAO	2019	x	x		
23	Dinámica de la comunidad microbiana en digestores anaeróbicos que tratan aguas negras de inodoros convencionales y de vacío.	Gao, M., Guo, B., Zhang, L., Zhang, Y., & Liu, Y.	2019	x	x		
24	Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol.	Leon Torres, C. A., Nomberto Rodríguez, C., Mendoza Avalos, G. A., Bardales Vásquez, C. B., Cabos Sánchez, J., & Barrena Gurbillón, M. A.	2019	x	x		
25	Co-digestión anaeróbica de camote y estiércol de ganado lechero: una evaluación técnica y económica para la producción de energía y biofertilizantes.	Montoro, S. B., Lucas, J., Santos, D. F. L., & Costa, M. S. S. M.	2019	x	x		x

26	El Método Analytic Hierarchy Process Para La Toma De Decisiones	Nantes, E.	2019	x			
27	Una revisión sobre la co-digestión anaeróbica con un enfoque en las poblaciones microbianas y el efecto de la configuración del digestor de múltiples etapas.	Rabii, A., Aldin, S., Dahman, Y., & Elbeshbishy, E.	2019	x	x		
28	Valoración de la eficiencia ambiental en biodigestores a nivel territorial	SOBERATS, J., González, I., Gonzáles, S., & Velázquez, R.	2019	x	x	x	
29	Co-digestión de Laminaria digitata con estiércol de ganado: un estudio de simulación unimodelo de experimentos continuos y por lotes	Sun, H., Kovalovszki, A., Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., Rudatis, A., Wu, S., Dong, R., Kougiás, P. G., & Angelidaki, I.	2019	x	x		
30	Producción de biogás y biofertilizantes mediante reactores anaerobios con estiércol de cerdo y dosis de glicerina Revista de producción más limpia	Veroneze, M, Schwantes, D, Affonso, C, Gonçalves A	2019	x	x		
31	Co-digestión anaeróbica semicontinua de excrementos de pollo con desechos agrícolas y alimentarios: un estudio de caso sobre el efecto de la relación carbono/nitrógeno, la relación de mezcla de sustratos y la carga orgánica	Zahan, Z., Georgiou, S., Muster, T. H., & Othman, M. Z.	2018	x	x		
32	Determinación de constantes cinéticas de la co-digestión de purines de vacas lecheras y residuos alimentarios municipales a tasas de carga orgánica crecientes.	Morken, J., Gjetmundsen, M., & Fjortoft, K.	2018	x	x		
33	Producción de metano y características de la comunidad microbiana en la co-digestión de sustrato gastado de hongos con estiércol lechero.	Luo, X., Yuan, X., Wang, S., Sun, F., Hou, Z., Hu, Q., Zhai, L., Cui, Z., & Zou, Y.	2018	x	x	x	
34	Proceso de co-digestión anaeróbica para la producción de biogás: avances, desafíos y perspectivas	Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., & Lu, X.	2017	x	x		
35	Co-digestión de estiércol de pollo y microalga Chlorella 1067 cultivada en el digestato reciclado: reutilización de nutrientes y mejora del biogás.	Li, R., Duan, N., Zhang, Y., Liu, Z., Li, B., Zhang, D., Lu, H., & Dong, T.	2017	x	x		
36	Optimización de la producción de biogás a partir de la co-digestión anaeróbica de estiércol de pollo y fracción orgánica de residuos sólidos municipales.	Matheri, A. N., Ndiweni, S. N., Belaid, M., Muzenda, E., & Hubert, R.	2017	x	x	x	
37	Potencial Técnico para la Producción de Biogás	Navarro, N.	2017	x	x		
38	La co-digestión anaeróbica de estiércol animal y residuos lignocelulósicos como un enfoque potente para la producción sostenible de biogás	Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P.	2017	x	x		
39	Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio	Solarte Toro, J. C., Mariscal Moreno, J. P., & Aristizabal Zuluaga, B. H.	2017	x	x		
40	Exploración de la relación entre la producción de biogás y la comunidad microbiana en condiciones de alta salinidad.	Wang, S., Hou, X., & Su, H.	2017	x	x		
41	Evaluación de la Producción de Biogás a partir de Residuos Vegetales Obtenidos en la Central de Abastos de Bogotá Mediante Digestión Anaerobia	GARCÍA RODRIGUEZ, ANGIE MARIANA. GÓMEZ FRANCO, J. D.	2016		x	x	

42	Análisis de la calidad de los efluentes de los biodigestores en los lodges ubicados en la zona alta de la Reserva de Producción de Fauna Cuyabeno	Gutiérrez Cruz, I., Rivera Carrión, E., & Roldán Reascos, G.	2016	x	x	x	
43	Co-digestión anaeróbica en estado sólido de residuos de tomate con estiércol de leche y rastrojos de maíz para la producción de biogás.	Li, Y., Li, Y., Zhang, D., Li, G., Lu, J., & Li, S.	2016	x	x		x
44	Co-digestión anaerobia de vinaza y gallinaza de jaula: alternativa para el manejo de residuos agrícolas colombianos	Marín Batista, J. D., Salazar, L., Castro, L., & Escalante, H.	2016	x	x	x	
45	Rendimiento en la producción de biogás a partir de la co-digestión.	Palavecino, A., Herrera, A., Sánchez de Pinto, & Sogari, N.	2016	x	x		
46	Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria.	Parra Huertas, R.	2015	x	x	x	
47	Eficiencia de remoción de materia orgánica de aguas residuales porcinas con biodigestores en el estado de Yucatán, México	Trejo Lizama, W., Vázquez González, L. B., Uicab, A. J., Castillo Caamal, J., Caamal Maldonado, A., Belmar Casso, R., & Santos Ricalde, R.	2014	x	x	x	
48	Efectos de la temperatura y la relación carbono-nitrógeno (C/N) sobre el rendimiento de la co-digestión anaeróbica de estiércol de leche, estiércol de pollo y paja de arroz: centrándose en la inhibición del amoníaco.	Wang, X., Lu, X., Li, F., & Yang, G.	2014	x	x		
49	Efecto de la adición de ensilaje de maíz en la recuperación de biometano de la co-digestión mesófila de estiércol de pollo y ganado para suprimir la inhibición por amoníaco	Yangin-Gomec, C., & Ozturk, I.	2013	x	x		
50	Riesgos microbianos asociados al biogás y lodos de biodigestores. Enciclopedia de salud ambiental	Vinnerås C. Schönning	2011	x	x	x	
51	Aprendizaje a través de programas participativos de gestión de recursos: estudios de caso de Costa Rica	Sims, L., & Sinclair, A. J.	2008	x	x	x	
52	Evaluación de un Sistema de Biodigestión en Serie para Clima Frio	Osorio, J., & Ciro, H.	2007	x	x		

Tabla 19 Revisión Literaria de Criterios Seleccionados

Fuente: Elaboración Propia

Identificación de alternativas

Tras una exhaustiva revisión de la información recopilada para la elaboración de este documento, centrada en los diferentes tipos de sustratos empleados en el proceso de digestión anaeróbica, se ha decidido emplear aquellos que demuestran tener un mayor impacto y efectividad para el funcionamiento de un biodigestor anaeróbico.

Para determinar las alternativas más viables para lograr un proceso de digestión anaerobia estable e incrementar su productividad, se recurrió al análisis de las siguientes tablas, las cuales muestran las características fundamentales de diferentes sustratos. Este enfoque permitió identificar cuál de ellos resulta más adecuado para dicho proceso.

Materiales con valor C/N relativamente más bajo		Materiales con valores C/N relativamente más altos	
Sustratos/materiales	relación C/N	Sustratos/materiales	relación C/N
Estiércol de vaca	16-25	Paja de arroz	51-67
estiércol de aves	5-15	Paja de trigo	50-150
estiércol de cerdo	6-14	Bagazo de caña de azúcar	140-150
estiércol de oveja	30-33	Tallos de maíz/paja	50-56
Estiércol de caballo	20-25	Paja de avena	48-50
Desperdicios de cocina	25-29	Remolacha azucarera/follaje azucarero	35-40
Residuos de frutas y verduras	7-35	Hojas caídas	50-53
Desechos alimentarios	3-17	Algas marinas	70-79
Brotos/cáscaras de maní	20-31	Algas	75-100
Cereales de desecho	16-40	Serrín	200-500
Hierba/recortes de hierba	12-16	Papas	35-60
alfalfa	12-17		
Residuos de matadero	22-37		
estiércol de cabra	10-17		
Residuos de alimentos mezclados	15-32		

Tabla 20 Materiales con valor C/N más bajos y altos

Fuente: (Hagos et al., 2017).

Sustrato	%Humedad	%ST	%SV	pH	%C	%N	C/N
E	67,25	15,60	83,28	5,84	34,94	3,11	11,25
RV	86,65	11,32	66,10	4,74	36,56	1,01	36,11
E + RV	61,38	16,00	68,71	5,48	11,69	3,09	11,69

Tabla 21 Características del estiércol de cerdo y residuos vegetales

Fuente: (Gámez et al., 2022).

Materias primas	Sólidos totales (%)	Sólidos volátiles (%)	pH inicial	Relación C/N
Estiércol	20.65	17.30	6.71	12.70
Residuos de cose- cha de tomate	21.15	18.25	6.91	19.60

Tabla 22 Características del estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate

Fuente: (castro rivera et al., 2020).

PARÁMETRO	UNIDAD	PODA	COMIDA	INÓCULO
Sólidos totales		88,7	29	2,2
Sólidos volátiles	% p/p	81,7	25,3	0,5
SV/ST	%	92,1	87,2	22,7
C		44,7	48,3	12,5
H		5,9	6,8	1,9
N		2,7	2,1	1,6
S		0,2	0,2	3,2
O	% p/p (b.s)	35,9	39	9,6
Celulosa		26,9	NA	NA
Hemicelulosa		48,6	NA	NA
Lignina		24,5	NA	NA
C/N	gmol/gmol	19	27	9,1
Densidad	kg/m ³	NA	NA	990

%p/p: peso a peso, b.s.: Base seca, NA: No analizado.

Tabla 23 Características de restos de comida y poda

Fuente: (Solarte Toro et al., 2017).

Con base en la información recopilada en las diversas tablas que describen las características de diferentes sustratos utilizados en la digestión anaeróbica, se ha decidido que las alternativas a emplear en el desarrollo de este documento serán la materia orgánica vegetal, el estiércol animal y los residuos de las industrias agrícolas.

Criterios de evaluación (SV, C/N, Costos, Impacto ambiental, etc)

Los criterios que se contemplaron para determinar la evaluación son ambiental, social, económica y técnico. Esto se debe a que se consideran los más relevantes a la hora de incursionar en el desarrollo de un sistema de biodigestión anaerobia (Martí-Herrero et al., 2014).

El criterio ambiental es fundamental a la hora de determinar qué tan relevante es para un ecosistema, dado que, si no se tiene en cuenta este aspecto como criterio, se

corre el riesgo de impactar de manera negativa al medio ambiente y por ello generar afectaciones no deseadas (Surendra et al., 2014).

El criterio social es uno de los más relevantes para este tipo de proyectos, ya que se debe tener presente a las comunidades y conocer cuál será su posición frente al proyecto. Cabe resaltar que, dependiendo de la comunidad o sociedad que será impactada, dependerá en gran medida las diferentes acciones a tomar para el desarrollo de este tipo de proyectos (Ferreira et al., 2022).

El criterio económico se selecciona debido a que si no es viable financieramente, no sería factible continuar con la implementación de este tipo de tecnologías, convirtiéndose de esta manera en uno de los criterios con mayor relevancia a la hora de determinar su viabilidad (Garfí et al., 2016).

El conocimiento técnico que deben tener los operarios a la hora de iniciar las diferentes operaciones necesarias para el buen funcionamiento de un biodigestor anaerobio es fundamental. Sin contar con el conocimiento necesario, se puede incurrir en fallas catastróficas que afecten de manera pertinente el proceso, como la inhibición o el completo detenimiento del proceso de digestión (MARCELO, 2021).

Descripción de Criterios y Subcriterios

CRITERIOS	Sub-Criterios
Criterio Ambiental	Producción de subproductos
	Gestión de sólidos contaminantes
	Biodegradabilidad
Criterio Social	Trabajo con la comunidad
	Generación de empleo
	Buenas prácticas
Criterio Económico	Ingresos
	Costo de adquisición de insumos
	Costo de operación
Criterio Técnico	Calidad del producto
	Aprovechamiento de los residuos
	Capacidad de transformación

Tabla 24 Criterios y subcriterios

Fuente: Elaboración propia

Criterios Ambientales:

Al utilizar la tecnología denominada biodigestor anaeróbico, se logra reducir de manera efectiva y considerable la contaminación medioambiental. Como cita Campos (2011), "los biodigestores constituyen una valiosa alternativa para el tratamiento de los desechos orgánicos generados en las empresas agropecuarias pues permiten disminuir la carga de contaminantes".

Subcriterio Producción de subproductos

Según Pérez (2010), los biodigestores son una tecnología que permite gestionar de manera adecuada la materia orgánica, ya que tienen la capacidad de degradar dicho material y convertirlo en nuevos productos como el biogás y el digestato. Además, esta tecnología también permite el tratamiento de aguas residuales domésticas, reduciendo significativamente el impacto ambiental de las aguas sin tratar que se liberan al medio ambiente (Yapu Clares, 2018). Cabe destacar que, mediante la digestión anaeróbica, es posible aprovechar diversos residuos, como los lodos resultantes de la cría de cerdos. Al implementar un biodigestor anaeróbico, se puede producir electricidad gracias a la generación de biogás (Braun, 2023).

Sub-Criterio Biodegradabilidad

La biodegradabilidad es un factor relevante a la hora de seleccionar el tipo de materia a degradar mediante la digestión anaeróbica, ya que determina la calidad del producto final (Obregón et al., 2018). Cabe resaltar que esta característica determina la velocidad de degradación y, por ende, es responsable de aumentar o reducir el tiempo necesario para completar el proceso de digestión anaeróbica satisfactoriamente (Durán Hernández, 2020). Este factor también está estrechamente relacionado con la producción de biogás, convirtiéndose en un aspecto crucial a considerar al seleccionar el tipo de material a digerir (Turcato et al., 2022).

Criterio Social

La implementación de un biodigestor anaeróbico permite aprovechar los residuos de manera más óptima, ya que este sistema genera subproductos tales como el biogás, que puede ser empleado para cocinar, y fertilizante, que sirve para mejorar el suelo y nutrir las plantas de manera orgánica (Kalaiselvan et al., 2022). Esto permite que las comunidades que implementan este tipo de tecnologías puedan beneficiarse en gran medida, como en las comunidades rurales, donde disponen de diversos tipos de materia orgánica que pueden ser aprovechados, mitigando de esta manera posibles problemas derivados de una gestión inadecuada de dichos residuos (Matheri et al., 2017). Cabe resaltar que uno de los beneficios más destacados referente al impacto que genera esta tecnología es la reducción de los malos olores y vectores generados por los desechos orgánicos. Esto se debe a que el proceso se lleva a cabo de manera hermética, lo que evita la proliferación de estos factores (Parra Huertas, 2015).

Subcriterio Trabajo con la comunidad

Para la implementación de un biodigestor, es preciso hacer partícipe a la comunidad que será beneficiaria de esta tecnología. De esta manera, se crea un sentido de pertenencia y se propicia el afianzamiento de conocimientos que facilitan la adquisición de la materia prima necesaria para el funcionamiento del biodigestor (Enriquez Lozano, 2020). Cabe resaltar que las comunidades son las principales beneficiarias de la implementación de este tipo de tecnologías que permite el aprovechamiento de material orgánico, por lo que deben estar involucradas durante todo el proceso (Gómez et al., 2017).

Uno de los puntos a destacar al desarrollar esta tecnología en comunidades rurales es que se fortalece el compromiso de cuidar el medio ambiente, mejorando así considerablemente el entorno (Ruiz et al., 2017).

Subcriterio Generación de empleo

Es relevante mencionar que el desarrollo de este tipo de proyectos tiene un impacto positivo en la sociedad donde se lleve a cabo, ya que promueve la generación de nuevos puestos de trabajo. Se necesita personal para desarrollar las diferentes actividades que requiere este sistema de gestión de residuos (Mendoza Ocaño et al., 2023). De acuerdo con la dimensión del proyecto que se desee implementar, será el impacto que generará en la comunidad en cuanto a la generación de empleo (Basurto Cusme et al., 2017).

Otro de los puntos favorables de este tipo de desarrollos es que es imprescindible contar con el apoyo de la comunidad que será impactada por estos proyectos, lo que promueve el desarrollo y la autonomía de estas regiones (Hoyos Villalba, 2018).

Subcriterio Buenas prácticas

Para el correcto funcionamiento de un sistema de digestión anaerobia, es fundamental contar con buenas prácticas de manejo de los sustratos a procesar (Bustillos Viteri, 2017). Si no se tiene un adecuado control sobre estos, pueden ocurrir fallas durante el proceso de digestión anaeróbica (Llanes Rosa et al., 2023), provocando de esta manera el retraso o el detenimiento del proceso y generando que el producto resultante no contenga las características deseadas (Álvarez et al., 2019).

Criterio Económico

Este factor juega un papel importante a la hora de implementar este tipo de tecnologías, ya que, aunque no se necesita una inversión de grandes dimensiones, sí es necesario contar con recursos financieros (Chinea et al., 2019). Durante la implementación de un sistema de digestión anaerobia, haciendo uso de un biodigestor, es importante determinar la viabilidad económica del proyecto, ya que sin una evaluación adecuada, pueden incurrirse en pérdidas (Rostagno et al., 2020).

Además, es necesario realizar una caracterización de la zona donde se desea implementar el proyecto, considerando aspectos como el clima y el tipo de terreno. Estos

factores pueden influir en la necesidad de una mayor inversión en las instalaciones (Posada Venerio, et al., 2021). Una evaluación exhaustiva de estas variables garantizará que el proyecto sea económicamente sostenible y técnicamente adecuado para las condiciones locales.

Subcriterio Ingresos

Los ingresos son un factor crucial para cualquier tipo de proyecto, ya que de ellos depende la viabilidad de su desarrollo (Posada Venerio et al., 2021). Por lo tanto, es fundamental determinar cómo se pueden generar ingresos económicos con esta actividad (Chinea et al., 2019). Cabe resaltar que los biodigestores generan una serie de productos resultantes del proceso de digestión anaerobia, que se pueden comercializar, como el biogás y el digestato (Velásquez, 2017).

Sub-Criterio Costo de adquisición de insumos

Al considerar la implementación de un biodigestor anaeróbico, uno de los aspectos críticos a tener en cuenta es el costo asociado con la adquisición del sustrato que se va a procesar (Calderón, 2023). Este factor representa uno de los mayores costos operativos en este tipo de sistemas de aprovechamiento de materia orgánica (Sánchez Luyo, 2022). Es crucial tener especial atención en la selección del sustrato, considerando su estabilidad y disponibilidad, ya que esto determina el correcto funcionamiento del biodigestor a lo largo del tiempo (Bonadeo, P, 2017).

Sub-Criterio Costo de operación

En gran medida, el costo de las operaciones está vinculado a la adquisición de la materia prima (Calderón, 2023). Por lo tanto, es crucial seleccionar el sustrato con la mayor factibilidad económica y adecuadas características físico-químicas (Almazán, et al., 2019). Es importante destacar que este sistema no implica costos excesivos de operación más allá de los ya mencionados, lo que lo convierte en un sistema de fácil mantenimiento, siempre y cuando se preste la atención adecuada a los aspectos más relevantes, como el tipo de material a procesar (Escalona Iturra, 2018).

Criterio Técnico

El desarrollo de un biodigestor anaeróbico está sujeto a parámetros de carácter técnico para su correcto funcionamiento (Moreno Alipio, 2019). Por lo tanto, es preciso tener claro cuáles son los parámetros necesarios para mantener un equilibrio en el sistema (Matiauda et al., 2018). Esto se hace con el objetivo de obtener los resultados deseados, ya que, si no se presta atención a estos parámetros, se pueden cometer errores que conduzcan a la pérdida total del proceso (Monsalve Herrera et al., 2023).

Sub-Criterio Calidad del producto

Para obtener un producto de calidad que refleje el proceso llevado a cabo dentro del biodigestor, es necesario tener en cuenta las diferentes variables que intervienen en el proceso (Cabos Sánchez et al., 2019). Esto proporciona la oportunidad de intervenir en el proceso si alguna de estas variables está fuera de los parámetros permitidos para una digestión anaerobia efectiva (MARCELO, 2021). Es importante destacar que la calidad del producto está sujeta al tipo de sustrato y a las condiciones en las que se suministra al biodigestor (Zanabria, 2019).

Sub-Criterio Aprovechamiento de los residuos

El aprovechamiento adecuado de los residuos orgánicos es fundamental para evitar su pérdida y maximizar su valor potencial (Celis Celis, 2020). Por lo tanto, es crucial gestionar estos residuos de manera que se pueda generar un valor agregado (Ávila-Hernández, 2018). Una alternativa efectiva para lograr este aprovechamiento integral es someter los residuos orgánicos al proceso de digestión anaerobia. Este proceso permite obtener diversos productos, como el biogás, que puede utilizarse como fuente de calor o para la generación de energía eléctrica. Además, se obtiene un fertilizante orgánico como subproducto, que puede emplearse en cultivos tanto tradicionales como orgánicos (Sencia, 2020).

Sub-Criterio Capacidad de transformación

La capacidad de transformación de los residuos orgánicos está intrínsecamente ligada a sus características físicas y químicas (Zegarra-Paredes et al., 2021). Dado que estas características varían, a menudo es necesario aplicar algún tipo de pretratamiento antes de someter los residuos al proceso de biodigestión anaeróbica (San Millán Cossío, 2018). Uno de los tratamientos más comunes es el tratamiento mecánico, que tiene como objetivo reducir el tamaño de las partículas del material a digerir para aumentar la superficie de contacto con las bacterias. Esto mejora significativamente el proceso de transformación (Constante et al., 2020).

Comparación por pares (evaluación de expertos)

La elección de la alternativa a utilizar se decide mediante la herramienta multicriterio AHP, que permite la ponderación de los criterios y, de esta manera, tomar la decisión sobre la alternativa más adecuada.

De acuerdo con las alternativas y criterios propuestos, se establece la siguiente estructura jerárquica.

Estructura Jerárquica:

De acuerdo con las alternativas y criterios propuestos, se establece la siguiente estructura jerárquica:

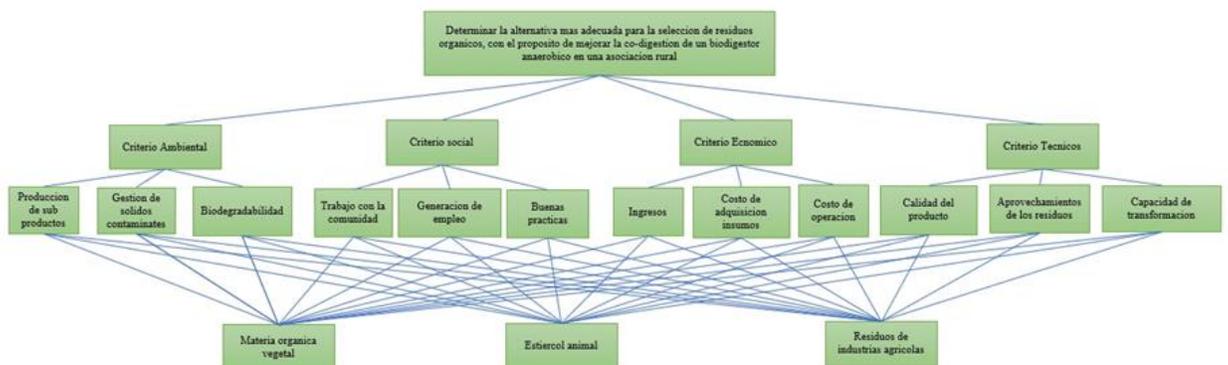


Figura 6 Estructura jerárquica de las alternativas

Fuente: Elaboración propia

Perfiles de Evaluación

Con el objetivo de seleccionar la alternativa más factible para el cumplimiento del objetivo del proyecto, se establecen los siguientes perfiles para la valoración de criterios y subcriterios según la herramienta AHP (Analytic Hierarchy Process).

Perfil Ingeniero Agroindustrial:

Ingeniero Agroindustrial especializado en Agroindustria, con una sólida formación en el diseño, gestión y optimización de procesos agroindustriales.

Perfil Ingeniero Ambiental:

Como especialista en gestión ambiental agroindustrial, poseo una sólida formación en ingeniería ambiental con un enfoque específico en el sector agroindustrial.

Perfil Ingeniero mecánico

Ingeniero Mecánico especializado en Ingeniería de Maquinaria y Procesos Industriales, con una sólida formación en el diseño, desarrollo y mantenimiento de sistemas mecánicos.

Para la implementación de la herramienta AHP, se recopiló el juicio de expertos con conocimiento y experiencia relacionados con los temas considerados. Esto se llevó a cabo mediante la matriz de comparación para generar una ponderación numérica, que representa la importancia relativa de cada uno de los criterios, subcriterios y alternativas.

La información recolectada corresponde al juicio de los expertos, lo que implica que existen diferentes respuestas para cada comparación realizada. Dado que una matriz de comparación de criterios y/o subcriterios solo admite una valoración para cada comparación pareada, los juicios deben ser tratados utilizando la media geométrica.

El resultado final para cada alternativa es un valor entre cero y uno, donde uno representa la mayor importancia posible y sin la menor. Esto permite generar una lista ordenada de forma descendente, definida por la prioridad global del conjunto de datos

analizado, facilitando así la clasificación. La ponderación de criterios y subcriterios es fundamental para la selección de la alternativa más factible.

Asignación de peso (Determinar la relevancia de cada criterio - “AHP interno”)

Para determinar qué tipo de sustrato tiene mayor relevancia, se opta por recurrir a toda la información recopilada y, en base a ello, se establecen los siguientes pesos:

Materia orgánica vegetal:

48%. Este valor se asigna debido a que es uno de los sustratos con mayor presencia y disponibilidad en el país, dado que uno de los sectores económicos más productivos de Colombia es el agrícola (Martínez et al., 2021).

Estiércol animal:

20%. Aunque Colombia cuenta con un sector pecuario bastante amplio, no todas las regiones tienen fácil acceso a este tipo de materia orgánica (Avelino, 2023).

Residuos de industria agrícola:

32%. Siendo Colombia un país donde uno de sus principales sectores económicos es el agropecuario, se determina que, después de la materia orgánica vegetal, los residuos agroindustriales son uno de los sustratos más disponibles (Romero, 2022).

Consolidación

De acuerdo con el juicio de los expertos sobre los criterios, subcriterios y alternativas consideradas, se establece una comparación entre los distintos pesos que corresponden a cada una de las variables identificadas. Los resultados se recopilan en la siguiente tabla:

CRITERIO	PESO POR CRITERIO	SUB- CRITERIO	PESO SUB - CRITERIO	ALTERNATIVAS		
				Materia organica vegetal	Estiercol animal	Residuos de industrias agricolas
Dimensión ambiental	50%	Producción de Sub-Productos	42%	40%	31%	29%
	50%	Gestión de Solidos Contaminantes	32%	35%	35%	30%
	50%	Biodegradabilidad	25%	42%	35%	23%
Dimensión social	17%	Trabajo con la comunidad	43%	43%	32%	24%
	17%	Generación de empleo	32%	31%	31%	38%
	17%	Buenas Practicas	25%	32%	34%	33%
Dimensión económica	17%	Ingresos	40%	30%	30%	40%
	17%	Costo Adquisición de insumos	35%	37%	30%	34%
	17%	Costos de Operación	24%	40%	28%	31%
Dimensión Tecnico	15%	Calidad de producto	37%	37%	35%	29%
	15%	Aprovechamiento de Residuos	35%	45%	31%	24%
	15%	Capacidad de transformación	28%	48%	29%	24%
TOTAL				38,3%	32,3%	29,4%

Tabla 25 Consolidado

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de los pesos identificados, se procede a establecer la alternativa óptima.

Los porcentajes obtenidos para cada una de las alternativas se presentan en la siguiente tabla, estos porcentajes indican la importancia relativa de cada alternativa, considerando su porcentaje para la selección final.

ALTERNATIVAS	PORCENTAJE
Materia organica vegetal	38,3%
Estiercol animal	32,3%
Residuos de industrias agricolas	29,4%

Tabla 26 Resultados de consolidado

Fuente: Elaboración propia

El modelo representa una parte del funcionamiento del sistema, por lo tanto, se menciona que ningún modelo es 100% preciso o valido en su respuesta. Al tratarse de datos validados por expertos, se realiza el modelo mediante la herramienta AHP, arrojándose resultados válidos, respecto a la selección de la alternativa de residuos para el aprovechamiento. Se realizó el modelo, presentando coherencia en los resultados arrojados en concordancia con los datos suministrados, siendo examinado además por referentes y los expertos solicitados en la evaluación de los criterios.

Conclusiones

Tras la evaluación de los pares revisores, se han identificado los resultados de las alternativas consideradas. La opción más prometedora es el uso de Materias Orgánicas Vegetales, que obtuvo una ponderación del 38.3%. Esta alta viabilidad se debe a la abundante disponibilidad de materiales orgánicos vegetales y la facilidad con la que se pueden obtener, lo que las convierte en una opción económicamente favorable y sostenible para diversos usos. Además, su amplio espectro de aplicaciones en procesos de compostaje y producción de biocombustibles refuerza su posición como la opción más viable.

En segundo lugar, el Estiércol Animal obtuvo una ponderación del 32.3%, lo que lo sitúa como la opción menos viable entre las alternativas evaluadas. Aunque el estiércol tiene un potencial considerable como fertilizante orgánico y fuente de biogás, su menor viabilidad en comparación con las otras opciones puede deberse a factores como la logística de recolección, manejo, y los desafíos en su procesamiento y uso eficiente. A pesar de su menor puntuación, sigue siendo una opción valiosa en contextos específicos, especialmente en áreas rurales con acceso directo a estos recursos.

Por último, con un 29.4%, se encuentran los Residuos de Industrias Agrícolas. Esta alternativa se beneficia del nivel avanzado de industrialización agrícola en Colombia, que genera una gran cantidad de residuos agrícolas disponibles para su revalorización. Los residuos como cáscaras, tallos y pajas no solo son abundantes, sino que también presentan oportunidades significativas para su aprovechamiento en la producción de energía y fertilizantes orgánicos, contribuyendo a un modelo de economía circular en el sector agrícola.

Referencias Bibliografía

- Acevedo, P. (2006) Biodigestor de doble propósito - producción e investigación - para residuos de granja porcícola. *Revista ION*. 19(1)
- Alcobendas, A. I. P. (2020). *Cultivos energéticos y residuos agro-ganaderos como sustratos para optimizar el potencial de generación de biogás en procesos de digestión anaerobia* (Doctoral dissertation, Universidad de Extremadura).
- Almazán, I. R., Legarreta-González, M. A., García, A. B., Ochoa, L. E., & Esparza, L. U. C. (2019). Beneficios económicos del uso de biodigestores en una empresa productora de quesos. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 7(2), 33-39.
- Álvarez, R. A., Reinhold, D., & Hidalgo, D. A. (2019). Prácticas sostenibles de turismo para el tratamiento de aguas y manejo de residuos sólidos en albergues turísticos de Talamanca. *Tecnología en Marcha*, 32(9), 78-88.
- Anaya, M. M. M., & Pechene, J. C. Q. (2017, August). Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia. In *Memorias de Congresos UTP* (pp. 194-201).
- Andriamanohiarisoamanana, F. J., Randrianantoandro, T. N., Ranaivoarisoa, H. F., Kono, H., Yoshida, G., Ihara, I., & Umetsu, K. (2022). Integration of biogas technology into livestock farming: Study on farmers' willingness to pay for biodigesters in Madagascar. *Biomass and Bioenergy*, 164(August), 106557. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106557>.
- Apolo, A. 2015. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo. Recuperado de: <https://repositorio.usfq.edu.ec>
- Avelino Carhuaricra, C. G. (2023). Valorización de los residuos orgánicos de origen animal mediante la generación térmica.
- Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 159-170.
- Avrella, E. D., Paim, L. P., Tedesco, M., Schafer, G., Souza, P. V. D. D., & Fior, C. S. (2021). Suelo mineral como componente de sustrato para plantas. *Revista de*

Investigación Agraria y Ambiental. Bogotá, Colombia. Vol. 12, n. 2 (jul./dic. 2021), p. 85-98.

- Barrena Gurbillón, M. A., Cubas Alarcón, F., Gosgot Angeles, W., Ordinola Ramírez, C. M., Rascón Barrios, J., & Huanes Mariños, M. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 725–734.
- Basurto Cusme, C. A., & Corrales Molina, J. G. (2017). *Diseño y construcción de un biodigestor para la generación de energía térmica y demostración de generación de energía eléctrica en el criadero porcino la bonita* (Bachelor's thesis, LATACUNGA/UTC/2017).
- Bonadeo, P. (2017). *Proyecto de inversión, Instalación de un Biodigestor en un tambo en la localidad de Huanchilla, Córdoba* (Bachelor's thesis).
- Braun, R. O. (2023). Desarrollo de energías alternativas no contaminantes en la región pampeana.
- Buettner, C., von Bergen, M., Jehmlich, N., & Noll, M. (2019). Pseudomonas spp. are key players in agricultural biogas substrate degradation. *Scientific Reports*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49313-8>
- Bustillos Viteri, Y. J. (2017). *Evaluación de la Eficiencia y Funcionamiento del Biodigestor Anaeróbico de Flujo Continuo en la “Granja Porcina Carlitos* (Bachelor's thesis, Ecuador, Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).
- Cabeza, M. D. (2010). El sistema agroalimentario globalizado: imperios alimentarios y degradación social y ecológica. *Revista de economía crítica*, (10), 32-61.
- Cabos Sánchez, J., Bardales Vásquez, C. B., León Torres, C. A., & Gil Ramírez, L. A. (2019). Evaluación de las concentraciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. *Arnaldoa*, 26(3), 1165-1176.
- Caceres Jurado, J. (2021). Evaluación de la producción de energía renovable a partir de residuos orgánicos de ganado vacuno y porcino en el centro de beneficio frigorífico Manu EIRL de Puerto Maldonado en Madre de Dios 2016.

- Calderón, G. R. L. (2023). Valoración del estiércol de cerdo para producir biogás y biol mediante un biodigestor de polietileno: Evaluation of pig manure to produce biogas and biol using a polyethylene biodigester. *KANYÚ*, 1(2-Especial), 91-99.
- Campos, B. (2011), Uso de la energía en la agricultura, Revista de Ciencias Técnicas Agropecuarias, volumen 20, número 2.
- Cantale C., Petrazzuolo F., Correnti A., Farneti A., Felici F., Latini A., Galeffi P. (2016). Triticale for Bioenergy Production, Florence “Sustainability of Well-Being International Forum”. 2015: Food for Sustainability and not just food, FlorenceSWIF2015. Agriculture and Agricultural Science Procedia 8, pp. 609-616.
- Canul, F. (2020). ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MICROAIREACIÓN EN UN REACTOR ACIDOGÉNICO DE UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA CON CARBÓN GRANULAR EN DOS FASES Y BALANCE DE MASAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE 87 CARBONO, NITRÓGENO Y FÓSFORO. Mérida Yucatán México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Canul, F. (2020). ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MICROAIREACIÓN EN UN REACTOR ACIDOGÉNICO DE UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA CON CARBÓN GRANULAR EN DOS FASES Y BALANCE DE MASAS EN LA DISTRIBUCIÓN DE 87 CARBONO, NITRÓGENO Y FÓSFORO. Mérida Yucatán México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
- Carhuaricra Espinoza, K. V. (2022). Propuesta de mitigación de impactos ambientales por prácticas agrícolas inadecuadas en el cultivo de granadilla y rocoto en la cuenca San Alberto, distrito de Oxapampa–Pasco.
- Carreras, N. (2024). Tipos de digestores, selección en función del residuo en Energía de la Biomasa.
- Carreras, N. (2024). Tipos de digestores, selección en función del residuo en Energía de la Biomasa.
- Casanovas, G. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Madrid: FAO ISBN: 978-92-5-131559-0.
- 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.
- Castro, G. D. (2018). Estudio bibliográfico del estado del arte de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y mejora del proceso mediante pretratamientos. Universidad de Cadiz, Cadiz, Cadiz, España. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10498/20924>

- Castro, L. (2016). Estabilización de los residuos de gallinaza y vinaza mediante codigestion anaerobia (Issue November).
- Celis Celis, M. D. P. (2020). Biodigestores como alternativa para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en zonas rurales.
- Chacha, J. A. (2020). Diseño De Una Planta De Tratamiento De Agua Residual Mediante Procesos Microbiológicos Combinados En La Tenería Díaz Cia. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, Chimborazo, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14890/1/96T00608.pdf>
- Chacón Inostroza, M. A. (2023). Evaluación de sustratos libres de turba para la producción de microgreens de Brassica rapa var. nipposinica en ambiente controlado.
- Chakravarthy. (2019). Critical Considerations in Two Stage Anaerobic Digestion of Food Waste. Energy Rev.
- Chakravarthy. (2019). Critical Considerations in Two Stage Anaerobic Digestion of Food Waste. Energy Rev.
- Chávez, Á. & Rodríguez, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. Academia y Virtualidad 9 (2), 90-107
- China, J. G., & Marrero, E. G. (2019). *Evaluación económica de inversiones*. Page Publishing Inc.
- Constante, A. M. G., Guevara, J. D. E., & Mercado, J. I. B. (2020). Propuesta de aprovechamiento energético a partir de biogás: Caso del Establecimiento Penitenciario y Carcelario "Las Mercedes" de Montería, Colombia. *Revista Environment & Technology*, 1(1), 79-95.
- Corrales Roa, E. (2014). Sostenibilidad agropecuaria y sistemas de producción campesinos.
- Cruz, E. J. (01 de Enero de 2023). Characterization and modeling of microbial growth in the development of a non-dairy probiotic drink made from tarwi plant extract (*Lupinus mutabilis* S.). pág. 8. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572023000100041
- Cuní, B. C. (2011). Use Of The Energy In Agriculture: Methodology to determine the design and construction parameters of design of biogas installations for little farms. En Cuba los biodigestores constituyen una valiosa alternativa, 20(2), 37-41.
- Curilla, E. (2022). Efecto del lactosuero en la producción del biogás y las características del bioabono y biol utilizando estiércol de vacuno en un biodigestor Batch en Sicaya. Huancayo: Universidad Continental.

- DANE, “Tercer Censo Nacional Agropecuario: Uso, cobertura y tenencia del suelo”, 2016.
- Daniela, L., Rodríguez, M., Alberto, C., Trujillo, A., & Felipe, A. (2021). *En Un Biodigestor Anaeróbico Continuo a Partir De Una Solución Numérica*.
- Dareioti M.A., Kornaros M. (2015). Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: Effect of hydraulic retention time, *Bioresource Technology* 175, pp. 553-562.
- de Jesus, M. A. S., Aguiar Dutra, A. R. de, Cirani, C. B. S., Jesus, K. R. E., Neto, R. C. S., & Guerra, J. B. A. (2022). Eco-innovation assessment of biodigesters technology: an application in cassava processing industries in the south of Brazil, Parana state. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(3), 931–948. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02232-7>
- Demeu, F. A., Lopes, M. A., Brandão Reis, E. M., Ribeiro Lima, A. L., de Melo Carvalho, F., Pascale Palhares, J. C., & Otenio, M. H. (2020). Economic viability of a canadian biodigester for power generation in dairy farming. *Semina: Ciências Agrarias*, 42(1), 375–395. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n1p375>
- Departamento Administrativo de Planeación, Bolívar, Colombia (2012). Plan de Desarrollo Departamento de Bolívar 2012-2015: Bolívar Ganador. Cartagena, Bolívar: Colombia. Recuperado de http://www.bolivar.gov.co/index.php?option=com_rokdownloads&view=file&task=download&id=1925%3Adocumento-tecnico-plan-de_desarrollo-bolivar-ganador-2012-2015&Itemid=316.
- DPN. (2016). pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia. estudio de la dirección de seguimiento y evaluación de políticas públicas. departamento nacional de planeación.
- Durán Hernández, D. M. (2020). Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás.
- Durazno Coronel, A. D. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas* (Bachelor's thesis).

- E. K. Yiridoe, R. Gordon, y B. B. Brown, "Non Market cobenefits and economic feasibility of on-farm biogas energy production," *Energy Policy*, vol. 37, no. 3, pp. 1170-1179, 2009. doi: 10.1016/j.enpol.2008.11.018
- Edgar Palomino Arango, Jimmy Quispe Pizarro, N. O. S. (2022). Producción de biogás, biol y biomasa a partir de residuo orgánico, (*Azolla pinnata*) e inóculos de cuy y vacuno mediante biodigestor anaerobio en el barrio Santa Ana en el departamento de Ayacucho. *UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental*.
- Elvin, C. A. H. A. E. B. G. (2019). *Advanced Studies in Energy Efficiency and Built Environment for Developing Countries*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10856-4_17.
- Enriquez Lozano, J. Y. (2020). Estudio comparativo de opciones tecnológicas de los sistemas de saneamiento en arrastre hidráulico con biodigestores y sin arrastre hidráulico con compostera de doble cámara en el ámbito rural de Perú: una revisión sistemática entre 2009-2019.
- Escalona Iturra, C. E. (2018). Biodigestor para comunidades en situación de aislamiento y/o seco.
- Escobar, J. W. (2015). Metodología para la toma de decisiones de inversión en portafolio de acciones utilizando la técnica multicriterio AHP. *Contaduría y administración*, 60(2), 346-366.
- Escobar, R. M. (2021). Acondicionamiento del sensor de pH y temperatura para realizar titulaciones potenciométricas.
- Escobar, R. M. (2021). Acondicionamiento del sensor de pH y temperatura para realizar titulaciones potenciométricas.
- Espinosa Mantilla, K. G. (2021). Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable: análisis del potencial de la ciudad de Quito (Master's thesis, Quito, EC: Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador).
- Esteban-Gutierrez, M. (2014). Co-digestión anaerobia de lodo de EDAR con residuos orgánicos de diferente naturaleza: combinación de técnicas experimentales y herramientas matemáticas.

- Estenssoro Saavedra, F. (2010). Crisis ambiental y cambio climático en la política global: un tema crecientemente complejo para América Latina. *Universum* (Talca), 25(2), 57-77.
- F. Monlau, P. Kaparaju, E. Trably, J. P. Steyer, y H. Carrere, "Alkaline pretreatment to enhance one-stage CH₄ and two-stage H₂/CH₄ production from sunflower stalks: Mass, energy and economical balances," *Chem. Eng. J.*, vol. 260, pp. 377-385, 2015. doi: 10.1016/j.cej.2014.08.108
- F. Granzotto, A. A. (2021). *Uso de biodigestor anaerobio en el tratamiento de residuos orgánicos de un restaurante universitario*.
- FAO, 2011. Manual de biogás. Recuperado de: www.fao.org
- FAO. (2011). Manual de Biogas. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, Santiago de Chile, Chile. Obtenido de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- FAO. (2012). *Perdidas y desperdicios de alimentos en el mundo alcance, causa y prevención*. organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. roma.
- FAO. (2020). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020. In *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020*. <https://doi.org/10.4060/ca9692es>.
- FAO. (2021). Eliminación de excrementos. Retrieved January 13, 2023, from <http://www.fao.org/3/t0690s/t0690s0g.htm>.
- Ferreira-da Silva, O. A. P., Vargas-Rodríguez, P., Dorta-Armaignac, A., Fernández-Hung, K., Hernández-Ramírez, I., & Méndez-Jocik, A. (2022). Uso de energías renovables en procesos agropecuarios para producir alimentos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(1).
- Flórez Mora, J. J., & Rojas Cepeda, J. A. (2023). *Comparación de las metodologías AHP y TOPSIS como enfoque de solución al problema de selección de componentes de un portafolio* (Master's thesis, Maestría en Gerencia de Proyectos).
- Gao, M., Guo, B., Zhang, L., Zhang, Y., & Liu, Y. (2019). Microbial community dynamics in anaerobic digesters treating conventional and vacuum toilet flushed blackwater. *Water Research*, 160, 249-258.

- García Rodríguez, A. M., & Gómez Franco, J. D. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaeróbica.
- García Salazar, M. S., & Intriago Zambrano, S. P. (2019). *Evaluación de la producción de metano mediante digestor anaerobio tipo batch en aguas residuales agroindustriales de destilería (vinaza)* (Bachelor's thesis, Calcuta: ESPAM MFL).
- Garfí, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599–614. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.01.071>.
- Glivin, G., Mariappan, V., Premalatha, M., Hareesh Krishnan, H., & Joseph Sekhar, S. (2021). Estudio comparativo de producción de biogás con estiércol de vaca y residuos de cocina en biodigestores de Plástico Reforzado con Fibra (FRP). *Materials Today: Proceedings*, 52, 2264–2267. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.098>.
- Gómez, Y. P. B., Rodríguez, Y. E. D., & Barranco, M. B. (2017). Aprovechamiento del estiércol caprino como recurso biomásico para la producción de biogás tomando como referencia a la comunidad Yutaho ubicado en Cuatro Vías, La Guajira: Revisión. *Revista Agunkuyâa*, 7(2), 5-24.
- González, E. T., & Jurado, P. C. (2017). Sustratos y producción de biogás en biodigestores. Una revisión sistemática. *Ingeciencia*, 2(1), 44-64.
- Gonzalez, L. V. P., Gómez, S. P. M., & Abad, P. A. G. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *RIAA*, 8(2), 141-150.
- Guerrero Vargas, A., Carvajal Castañeda, L. D., & Dávila Pertuz, J. E. (2021). *Estudio de viabilidad en la aplicación de un biodigestor anaerobio para la producción de energía en las instituciones educativas ubicadas en las zonas no interconectadas de Colombia* (Bachelor's thesis, Ingeniería Química).
- Guerrero, L. (2012). ¿Que es el biogas?. <http://www.aboutespanol.com/que-es-el-biogas3417682>
- Gutiérrez Cruz, I., Rivera Carrión, E., & Roldán Reascos, G. (2016). Análisis de la calidad de los efluentes de los biodigestores en los lodges ubicados en la zona alta de la Reserva de Producción de Fauna Cuyabeno. *Enfoque UTE*, 7(3), 57–69. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.105>

- H. Katuwal y A. K. Bohara, "Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2668-2674, 2009.
- H. Wang y H.-T. Wang, "Digestibility improvement of aspen leaf with alkaline hydrothermal pretreatment," *Zhongguo Huanjing Kexue/China Environ. Sci.*, vol. 29, no. 2, 2009.
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C. y Lu, X. (2017). Proceso de codigestión anaeróbica para la producción de biogás: avances, desafíos y perspectivas. *Revisiones de energías renovables y sostenibles* , 76 , 1485-1496.
- Hoyos Villalba, C. J. (2018). *Implementación de un digestor anaerobio tipo manga en la población rural del municipio de santa rosa de lima-bolívar* (Bachelor's thesis, Escuela de Ingenierías).
- Huaccha Castillo, A. E., Fernandez Zarate, F. H., & Núñez Figueroa, M. (2023). Manual de Ejercicios de Residuos Sólidos. -.
- Huaraya Huahualuque, M. Y., & Sancho Moya, T. C. (2020). Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la digestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria.
- Irreño, C. A. B. (2018). Aplicación práctica del proceso de análisis jerárquico (AHP), para la toma de decisiones. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 5(9), 91-100.
- J. A. Albuquerque et al., "Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues," *Biomass and Bioenergy*, vol. 40, pp. 181-189, 2012.
- J. Martí-Herrero et al., "Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 156-165, 2014. doi: 10.1016/j.renene.2014.05.036
- J. Ward, P. J. Hobbs, P. J. Holliman, y D. L. Jones, "Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 17, pp. 7928-7940, 2008.
- Jaramillo, J. A. Q. (2022). Producción de biogás a partir de procesos de digestión y codigestión anaerobia usando estiércol de cerdo y residuos vegetales. *Revista RedBioLAC*, 6(1), 34-39.
- Jelínek, M., Mazancová, J., Van Dung, D., Phung, L. D., Banout, J., & Roubík, H. (2021). Quantification of the impact of partial replacement of traditional cooking fuels

by biogas on global warming: Evidence from Vietnam. *Journal of Cleaner Production*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126007>

- Jiménez, J. (2002). El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 1(1 extra).
- K. C. Surendra, D. Takara, A. G. Hashimoto, y S. K. Khanal, "Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 846-859, 2014.
- Kalaiselvan, N., Glivin, G., Bakthavatsalam, A. K., Mariappan, V., Premalatha, M., Raveendran, P. S., Jayaraj, S., & Sekhar, S. J. (2022). Una tecnología de conversión de residuos en energía para el enriquecimiento de la generación de biometano: una revisión de los parámetros operativos, tipos de biodigestores, sistemas de calefacción asistidos por energía solar, beneficios y desafíos socioeconómicos. *Chemosphere*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133486>.
- Kalaiselvan, N., Glivin, G., Bakthavatsalam, AK, Mariappan, V., Premalatha, M., Raveendran, PS, ... y Sekhar, SJ (2022). Una tecnología de conversión de residuos en energía para el enriquecimiento de la generación de biometano: una revisión de los parámetros operativos, tipos de biodigestores, sistemas de calefacción asistidos por energía solar, beneficios y desafíos socioeconómicos. *Quimiosfera* , 293 , 133486.
- Kelebe, H. E., Ayimut, K. M., Berhe, G. H., & Hintsu, K. (2017). Determinants for adoption decision of small scale biogas technology by rural households in Tigray, Ethiopia. *Energy Economics*, 66, 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.06.022>.
- Khan, I., & Kabir, Z. (2020). Waste-to-energy generation technologies and the developing economies: A multi-criteria analysis for sustainability assessment. *Renewable Energy*, 150, 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.132>
- Kougiaris P.G., Boe K., Einarsdottir E.S., Angelidaki I. (2015). Counteracting foaming caused by lipids or proteins in biogas reactors using rapeseed oil or oleic acid as antifoaming agents. *Water research* 79, pp. 119-127

- Lansing, S., Martin, J. F., Botero, R. B., Nogueira da Silva, T., & Dias da Silva, E. (2010). Wastewater transformations and fertilizer value when co-digesting differing ratios of swine manure and used cooking grease in low-cost digesters. *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1711–1720. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.005>
- Leiva Trujillo, B. F. (2018). Elaboración de biofertilizante a partir de estiércol de ganado vacuno y efluente del proceso de fermentación cervecera mediante fermentación homoláctica.
- León Torres, C. A., Nomberto Rodríguez, C., Mendoza Avalos, G. A., Bardales Vásquez, C. B., Cabos Sánchez, J., & Barrena Gurbillón, M. A. (2019). Diseño e implementación de una planta piloto de producción de Biogás, Biol y Biosol. *Arnaldoa*, 26(3), 1017–1032. <https://orcid.org/0000-0002-4200-4101>
- Li, R., Duan, N., Zhang, Y., Liu, Z., Li, B., Zhang, D., ... & Dong, T. (2017). Co-digestion of chicken manure and microalgae *Chlorella* 1067 grown in the recycled digestate: Nutrients reuse and biogas enhancement. *Waste Management*, 70, 247-254.
- Llanes Rosa, T. M., Alonso Castillo, M., & Fernández García, D. (2023). BUENAS PRÁCTICAS DE EQUIDAD SOCIAL VINCULADAS A SISTEMAS AGROENERGÉTICOS EN EL ÁMBITO RURAL CALIMETENSE.
- Lopez. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales. ISBN. doi:9781780409139
- Lyu, Z., Shao, N., Akinyemi, T., & Whitman, W. B. (2018). Methanogenesis. *Current Biology*, 28(13), R727–R732. <https://doi.org/10.1016/J.CUB.2018.05.021>.
- M. Garfí, J. Martí-Herrero, A. Garwood, y I. Ferrer, “Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 599-614, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.071
- M. Garfí, L. Ferrer-Martí, E. Velo, y I. Ferrer, “Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 575-581, 2012.
- M. Peters et al., “Challenges and opportunities for improving eco-efficiency of tropical forage-based systems to mitigate greenhouse gas emissions,” *Trop. Grasslands-Forrajes Trop.*, vol. 1, no. 2, pp. 156-167, 2013.

- M. Poeschl, S. Ward, y P. Owende, "Environmental impacts of biogas deployment - Part I: Life Cycle Inventory for evaluation of production process emissions to air," J. Clean. Prod., vol. 24, pp. 168-183, 2012.
- M. Solé-Bundó et al., "Assessing the agricultural reuse of the digestate from microalgae anaerobic digestion and co-digestion with sewage sludge," Sci. Total Environ., vol. 586, pp. 1-9, 2017
- Ma, G., Ndegwa, P., Harrison, JH y Chen, Y. (2020). Rendimientos de metano durante la codigestión anaeróbica del estiércol animal con otras materias primas: un metanálisis. *Ciencia del Medio Ambiente Total* , 728 , 138224.
- MARCELO, P. S. L. (2021). *PRODUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE BIOGAS EN UN BIODIGESTOR USANDO ESTIERCOL DE VACA EN EL CANTÓN MILAGRO* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR).
- MARCELO, P. S. L. (2021). *PRODUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE BIOGAS EN UN BIODIGESTOR USANDO ESTIERCOL DE VACA EN EL CANTÓN MILAGRO* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR).
- Marin-Batista, J., Salazar, L., Castro, L., & Escalante, H. (2016). Co-digestión anaerobia de vinaza y gallinaza de jaula: alternativa para el manejo de residuos agrícolas colombianos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(2), 6-12.
- Martha, M. (septiembre de 2019). Determinación de la curva de crecimiento microbiano. pág. 8. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2019000200011
- Marti H. J. (2008). Guía de diseño y manual de instalación de Biodigestores. Bolivia: Creative Commons. <http://pigtrop.cirad.fr/sp/content/pdf/5821>
- Marti, J. (2019). Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. Ecuador: Redbiolac ISBN: 978-9942-36-276-6.
- Marti, J. (2019). Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación. Ecuador: Redbiolac ISBN: 978-9942-36-276-6.
- Martín Hernández, L. A., & Guerrero Hernández, O. E. (2022). Diseño de un biodigestor para la granja Athualpa zona rural Usme.
- Martínez, A. F. V., Cifuentes, J. A. L., & Gaona, Á. E. A. (2021). Sostenibilidad ambiental y manejo de residuos en sistemas de producción de cacao en el suroccidente de Boyacá-Colombia. *Revista Ciencia y Agricultura*, 18(3), 47-62.

- Matheri, A. N., Ndiweni, S. N., Belaid, M., Muzenda, E., & Hubert, R. (2017). Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80*, 756-764.
- Matheri, A. N., Ndiweni, S. N., Belaid, M., Muzenda, E., & Hubert, R. (2017). Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80*, 756-764.
- Matiauda, M. E., & Deschutter, E. J. (2018). Rendimiento biogas de biodigestor de establecimiento porcícola de Posadas.
- McPhail, S. J. (2012). Fuel cells in the Waste-to-energy chain: Distributed Generation Through Non-conventional Fuels and Fuel Cells. .Springer Science & Business Media.
- Meegoda, j., & Li. (2018). "Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion,".
- Meegoda, j., & Li. (2018). "Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion,".
- Mellado M., Matus I., Madariaga R. (2008). Antecedentes sobre el triticale en Chile y otros países, Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.
- Mendoza Ocaño, R., & Vila Orellana, R. A. (2023). Análisis de la influencia del proyecto de instalación del sistema de agua potable y letrinas con biodigestores en la comunidad nativa Alto San Pascual, provincia de Satipo–Junín, durante el año 2017-2021.
- Mendoza Rodríguez, J. E., & Villa Mejía, S. (2023). Prefactibilidad de una línea de negocio de biodigestores para beneficiar el sector agrícola colombiano.
- Merino, O. (2018). Hidrólisis y fermentación de materiales lignocelulósicos con hansenula polymorpha. Obtenido de <https://ruja.ujaen.es/jspui/bitstream/10953/1112/1/TESISDOCTORALCONANEXOS.pdf>
- Merino, O. (2018). Hidrólisis y fermentación de materiales lignocelulósicos con hansenula polymorpha. Obtenido de

<https://ruja.uaen.es/jspui/bitstream/10953/1112/1/TESISDOCTORALCONANEXOS.pdf>

- Monsalve Herrera, L. L., & Quiñonez Bolívar, O. F. (2023). Estudio de Viabilidad Técnico-Financiera de la Implementación de un Biodigestor Tubular en la Finca El Líbano, Cepitá–Santander.
- Montoro, S. B., Lucas Jr, J., Santos, D. F. L., & Costa, M. S. S. M. (2019). Anaerobic co-digestion of sweet potato and dairy cattle manure: A technical and economic evaluation for energy and biofertilizer production. *Journal of cleaner production*, 226, 1082-1091.
- Moreno Alipio, J. F. (2019). Estudio comparativo de las unidades básicas de saneamiento de arrastre hidráulico con biodigestor y sanitario ecológico seco en el caserío de retambo, distrito de Quiruvilca, Santiago de Chuco.
- Morken, J., Gjetmundsen, M. y Fjørtoft, K. (2018). Determinación de constantes cinéticas de la codigestión de purines de vacas lecheras y residuos alimentarios municipales a tasas de carga orgánica crecientes. *Energías Renovables* , 117 , 46-51.
- Mukeshimana, M. C., Zhao, Z. Y., Ahmad, M., & Irfan, M. (2021). Analysis on barriers to biogas dissemination in Rwanda: AHP approach. *Renewable Energy*, 163, 1127-1137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.051>.
- Murgueytio, M., & Pacheco, A. (2021). Desarrollo de un modelo basado en el individuo para la producción de metano e hidrógeno a partir de los lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Quito: UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
- Murgueytio, M., & Pacheco, A. (2021). Desarrollo de un modelo basado en el individuo para la producción de metano e hidrógeno a partir de los lodos residuales provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Quito: UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
- Muscolo, G. Settineri, T. Papalia, E. Attinà, C. Basile, y M. R. Panuccio, “Anaerobic co-digestion of recalcitrant agricultural wastes: Characterizing of biochemical parameters of digestate and its impacts on soil ecosystem,” *Sci. Total Environ.*, vol. 586, pp. 746- 752, 2017. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.051

- N. Bruce, R. Perez-Padilla, y R. Albalak, "Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge," *Environ. Heal.*, vol. 78, no. 9, pp. 15, 2000.
- N. Sharma, B. Bohra, N. Pragya, R. Ciannella, P. Dobie, y S. Lehmann, "Bioenergy from agroforestry can lead to improved food security, climate change, soil quality, and rural development," *Food Energy Secur.*, vol. 5, no. 3, pp. 165-183, 2016. doi: 10.1002/fes3.87
- Nantes, E. A. (2019). Método analytic hierarchy process para la toma de decisiones: repaso de la metodología y aplicaciones.
- Navarro, N. (2017). *Potencial técnico para la producción de biogás, generado a partir de residuos orgánicos producidos en la comuna de Independencia* (Doctoral dissertation, tesis de Maestría, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza]. <https://bit.ly/3cLGHcR>.
- Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 308-322.
- Obregón, J. M. R., Gutiérrez, R. B., González, L. L., Hernández, J. J., & Pérez, L. M. (2018). Análisis cinético de la biodegradabilidad anaerobia de la cachaza con pretratamiento termoalcalino en la producción de metano. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 7(1), 12-18.
- Orejuela Correa, V. (2021). Propuesta de un sistema de co-digestión anaerobia para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos del Zoológico de Cali.
- Orozco Yarasqui, Y. C., & Salazar Pillpe, T. A. (2022). Aprovechamiento de los residuos sólidos de la construcción y demolición en América del Sur: Revisión sistemática.
- Osorio, J., & Ciro, H. (2007). *EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BIODIGESTIÓN EN SERIE PARA CLIMA FRÍO Jairo*.
- Pabuena, M. A., & Pasqualino, J. C. (2014). Potencial de uso de biogás en Colombia. *Teknos revista científica*, 14(2), 27-33.

- Palavecino, A. C., Herrera, A. C., de Pinto, M. I. S., & Sogari, N. (2019). Rendimiento en la producción de biogás a partir de la co-digestión anaeróbica de estiércol vacuno y maíz. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 5, 331-337.
- Parra Huertas, R. (2015). Anaerobic digestion: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry. *Producción + Limpia*, 10(2), 142–159. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014
- Parra Huertas, R. A. (2015). Anaerobic digestion: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry. *Producción+ Limpia*, 10(2), 142-159.
- Peláez Merchán, J. M. (2020). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO DISCONTINUO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN ZONAS DE BAJOS RECURSOS ECONÓMICOS DE JIPIJAPA* (Bachelor's thesis, Jipijapa-UNESUM).
- Pérez, J.A. (2010) Memoria: Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Santiago de Chile, Marzo 2010. p. 18.
- Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González González, C., & Tristán-Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. Retrieved January 13, 2023, from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000400004.
- Posada Venerio, A. A. (2021). Prefactibilidad técnica, económica y social para la producción de biogás a partir de residuos agropecuarios y macroalgas para la Comunidad Mapuche José Painecura.
- R. Nkoa, "Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review," *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 34, no. 2, pp. 473- 492, 2014. doi: 10.1007/s13593-013-0196-z
- Ramirez, S. L., & Quijano, S. D. (2020). Determinación de la factibilidad de los residuos orgánicos producidos por los cultivos de plátano en el uso como co-sustrato con excretas porcinas para la generación de biogás. Universidad Santo Tomás

Villavicencio, Villavicencio. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/jspui/bitstream/11634/27908/9/2020dianaquijano.pdf>

- Recabarren, P. E., Villagrán, M. M., de Estudios, O., & Agrarias, P. EVOLUCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE VERDURAS Y FRUTAS A NIVEL INTERNACIONAL Y NACIONAL. *REALIDAD Y PERSPECTIVAS DE LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE VERDURAS Y FRUTAS EN CHILE*, 38(48), 59.
- REN21, Renewables 2017 Global Status Report. Paris: REN21Secretariat, 2017.
- Reynoso Patiño, M. A., & Perales García, M. V. (2022). Cuartos verdes sustentables. *Revista CoPaLa, Construyendo Paz Latinoamericana*, Número 14(14), 88–97. <https://doi.org/10.35600/25008870.2022.14.0212>.
- Ritchie, H. (2020). Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? - Our World in Data. Retrieved January 13, 2023, from <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.
- Rodríguez, F. J. (2010). Puesta en marcha de un Laboratorio para la producción de biogás en Nicaragua. Universidad Carlos III de Madrid. Retrieved from <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/9951#preview>.
- Rodríguez, L. D. M., Guerrero, A. F. G., & Trujillo, C. A. A. (2021). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS CON LA APLICACIÓN DE DIFERENTES SUSTRATOS EN UN BIODIGESTOR ANAERÓBICO CONTINUO A PARTIR DE UNA SOLUCIÓN NUMÉRICA. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*.
- Rojas Avendaño, M. C. (2022). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos para la generación de energía en Bogotá.
- Rojas, R. C., & Contreras, L. H. (2018). Determinación del potencial de biogás de diferentes sustratos para la codigestión anaerobia con excretas animales. Universidad Santo Toma de Villavicencio, Villavicencio. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/22656/Documento%20de%20Trabajo%20N%C2%B0S01.%20Determinacio%CC%81n%20del%20potencial%20de%20Obioga%CC%81s%20de%20diferentes%20sustratos%20para%20la%20codigestion%20anaerobia%20con%20excretas%20animal>

- Romero, Hl, Vega, C., Feijoó, V., Villacreses, D., & Sarmiento, C. (2020). Producción de metano mediante codigestión anaeróbica de biomasa de frutas tropicales y residuos sólidos urbanos. *Informes de energía*, 6, 351-357.
- Romero, J. W. (2022). *Evaluación de la producción del hongo ostra (Pleurotus ostreatus), con diferentes sustratos en un ambiente controlado en el Centro Experimental Cota Cota* (Doctoral dissertation).
- Romero-Sáez, M. (2022). Los residuos agroindustriales, una oportunidad para la economía circular. *TecnoLógicas*, 25(54).
- Rostagno, M. N., Castignani, M. I., Mansilla, M., Rossler, N., & Osan, O. (2020). Evaluación económica y financiera de la implementación de un biodigestor en un tambo de la cuenca lechera Santafesina. *Fave. Sección ciencias agrarias*, 19(1), 67-79.
- Ruiz, L. A. T., Gurbillón, M. A. B., Torres, O. A. G., Wong, M. C., & Ponce, Y. R. (2017). Rendimiento de biogás y sus beneficios socio económico en el desarrollo rural sostenible de las comunidades altoandinas. Ancash-Perú. *Revista de Investigaciones de la Universidad Le Cordon Bleu*, 4(2), 49-57.
- S. Fang, L. Ping, Z. Yang, y J. Mao, "A review of different pretreatment techniques for enhancing biogas production," 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment, Shanghai, 2011, pp. 263-266. doi: 10.1109/ICMREE.2011.5930810
- S. Ruile, S. Schmitz, M. Mönch-Tegeder, y H. Oechsner, "Degradation efficiency of agricultural biogas plants - A full-scale study," *Bioresour. Technol.*, vol. 178, pp. 341-349, doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.053
- San Millán Cossío, A. (2018). Estudio técnico sobre biodigestores anaeróbicos, aplicado al tratamiento de la fracción orgánica de los residuos municipales.
- Sánchez Luyo, R. E. (2022). Estudio comparativo técnico-económico de unidad básica de saneamiento de arrastre hidráulico con tanque séptico biodigestor autolimpiable y compostera continua en el CP Betania–San Martín 2020.
- Sánchez, I. (2022). Estado del arte de los biopreparados por digestión anaerobia como biofertilizantes y bioestimulantes. *Ingeniería Agrícola*, vol. 12, núm. 4, e07.
- Sánchez, I. (2022). Estado del arte de los biopreparados por digestión anaerobia como biofertilizantes y bioestimulantes. *Ingeniería Agrícola*, vol. 12, núm. 4, e07.

- SOBERATS, J., González, I., Gonzáles, S., & Velázquez, R. (2019). Valoración de la eficiencia ambiental en biodigestores a nivel territorial. *Ciencias Holguín*, 25(3), 84–99.
- Sun, H., Kovalovszki, A., Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., Rudatis, A., Wu, S., ... & Angelidaki, I. (2019). Co-digestion of *Laminaria digitata* with cattle manure: a unimodel simulation study of both batch and continuous experiments. *Bioresource technology*, 276, 361-368.
- T. Abbasi, S. M. Tauseef, y S. A. Abbasi, Biogas Energy. 2012.
- T.A. Seadi, D. Rutz, H. Prassl, et al., Biogas Handbook. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- T.A. Seadi, D. Rutz, H. Prassl, et al., Biogas Handbook. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- Tavizón, E. Diseño de un biodigestor para desechos orgánicos de origen vegetal. Tesis de post Grado. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Juárez, Chih
- Teglia, A. Tremier, y J. L. Martel, "Characterization of solid digestates: Part 2, assessment of the quality and suitability for composting of six digested products," Waste and Biomass Valorization, vol. 2, no. 2, pp. 113-126, 2011.
- Tobón Abello, A. H. (2018). Análisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cúpula flotante en las zonas rurales y urbanas de la región Norte de Colombia (Master's thesis, Universidad Del Norte).
- Tobon. (2018). Analisis de los poibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cupula flotante en las zonas rurales y urbanas de la región norte de Colombia. Obtenido de New England Journal of Medicine, 372(2): <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7556065><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC394507><http://dx.doi.org/10.1016/j.humpath.2017.05.005>[Ahttps://doi.org/10.1007/s00401-018-1825-z](https://doi.org/10.1007/s00401-018-1825-z)<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27157931>.
- Tomal, V. (2019). Estudio del funcionamiento de un biodigestor para la Disminución de residuales contaminantes en la granja Porcicola "san Luis" ubicada en la comuna el tambo, canton Santa Elena, provincia de santa Elena. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6313/1/UPSE-TIA-2021-0045.pdf>

- Tomal, V. (2019). Estudio del funcionamiento de un biodigestor para la Disminución de residuales contaminantes en la granja Porcicola "san Luis" ubicada en la comuna el tambo, canton Santa Elena, provincia de santa Elena. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6313/1/UPSE-TIA-2021-0045.pdf>
- Toro, J. C. S., Moreno, J. P. M., & Zuluaga, B. H. A. Evaluación de la digestión y co-digestión anaerobia de residuos de comida y de poda en bioreactores a escala laboratorio Evaluation of anaerobic digestion and co-digestion of food waste and grass cuttings in laboratory scale bioreactors Avaliação de digestão e co-digestão anaeróbica de resíduos de.
- Torres Pérez, A. G. (2020). Diseño de un biodigestor anaeróbico para la obtención de metano a partir de residuos lignocelulósicos de la industria maderera y aserrerías.
- Trapé, D. V. (2023). Obtención de poli (hidroxialcanoato) s empleando vinazas como sustrato.
- Trejo Lizama, W., Vázquez González, L. B., Uicab, A. J., Castillo Caamal, J., Caamal Maldonado, A., Belmar Casso, R., & Santos Ricalde, R. (2014). Eficiencia de remocion de materia orgánica de aguas residuales porcinas con biodigestores en el estado de Yucatán, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17(2), 321–323.
- Turcato, S., & Carolina, M. (2022). *Uso de compuestos bioactivos de origen vegetal para disminuir la metanogénesis ruminal* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados).
- Uhumamure, S. E., Nethengwe, N. S., & Tinarwo, D. (2019). Correlating the factors influencing household decisions on adoption and utilisation of biogas technology in South Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 264–273. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.006>.
- United Nations Human Settlements Programme (UN_HABITAT) 2010b. Solid Waste Management in the World Cities. State of Water and Sanitation in the World Cities. Malta. Gutenberg Press. ISBN 978-1-84971-169-2. Recuperado de mirror.unhabitat.org/pmss/getElectronicVersion.aspx?nr=2918&alt=.ideam.gov.co/op/enbiblio/Bvirtual/022166/022166.htm.
- Valderrama, A. (2013). Biodegradación de residuos sólidos agropecuarios y uso de bioabono como acondicionador del suelo.

- Vallati A. (2001). Sorgo. Estación experimental Agropecuaria Bordenave, INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria): http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/maiz_sorgo/12-descripcion_sorgo.pdf (accedido 24 Febrero 2017).
- Vargas, A. (2020). Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. Revista Facultad de Ciencias Básicas. Obtenido de <http://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb>
- Varnero, M. T. (2011). Manual de biogás. <http://www.fao.org/3/as400s/as400.pdf>
- VEGA ARQUIÑO, Jhon Alexis. Diseño, construcción y evaluación de un biodigestor semicontinuo para la generación de biogás con la fermentación anaeróbica del estiércol de cuy y de conejo para la institución educativa privada Cristiana Bereshi. [En línea] (Trabajo de titulación) Universidad Nacional del Santa, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería en Energía, Chimbote, Perú. 2015. pp. 25-77. [Consulta: 5 Noviembre 2018]. Recuperado de: <http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2000/30744.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vega Daza, M. A. (2024). Propuesta de aprovechamiento de residuos agroindustriales para la generación de biofertilizantes en el departamento de Cundinamarca.
- Velásquez Tapia, M. S. (2017). Evaluación del rendimiento de producción de biogás comparando el estiércol de vacuno, de cuy y residuos de leguminosas en un biodigestor anaerobio en la UAP-Arequipa 2016.
- Veroneze, M, Schwantes, D, Affonso, C, Gonçalves A (2019). Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses *Journal of cleaner production*. 2(13). P114-126.
- Veroneze, M, Schwantes, D, Affonso, C, Gonçalves A (2019). Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses *Journal of cleaner production*. 2(13). P114-126
- Villacreses, D., & Feijoo, V. (2020). GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE LA CIUDAD DE MACHALA. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Villacreses, D., & Feijoo, V. (2020). GENERACIÓN DE GAS METANO MEDIANTE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA DE LA CIUDAD DE MACHALA. Machala: Universidad Técnica de Machala.

- Vinnerås C. Schönning (2011) Microbial Risks Associated with Biogas and Biodigestor Sludge. *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*. Pages 377-384.
- Vinnerås C. Schönning (2011) Microbial Risks Associated with Biogas and Biodigestor Sludge. *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*. Pages 377-384
- Visser y H. R. Khan, "When smoke gets in your eyes: kitchen air quality in rural Bangladeshi homes," *Energy for Sustainable Development*, vol. 3, no. 4, pp. 52-57, 1996.
- W. Uddin et al., "Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 25-33, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.083
- Wang, S., Hou, X., & Su, H. (2017). Exploration of the relationship between biogas production and microbial community under high salinity conditions. *Scientific Reports*, 7(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01298-y>
- Wang, X., Lu, X., Li, F. y Yang, G. (2014). Efectos de la temperatura y la relación carbono-nitrógeno (C/N) sobre el rendimiento de la codigestión anaeróbica de estiércol de leche, estiércol de pollo y paja de arroz: centrándose en la inhibición del amoníaco. *Más uno* , 9 (5), e97265.
- Wassie, Y. T., & Adaramola, M. S. (2020). Analysing household biogas utilization and impact in rural Ethiopia: Lessons and policy implications for sub Saharan Africa. *Scientific African*, 9, e00474. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00474>.
- Wellinger, J. Murphy, D. Baxter, A. Welliger, J. Murphy, y D. Baxter, *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*, 1 ra. Cambridge, UK.: Woodhead Publishing Limited, 2013.
- Wellinger, J. Murphy, y D. Baxter, *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. 2013.
- Wong Arguelles, C., Acosta Pintor, D. C., Mojica Mesinas, C., Márquez, H. L., & Vidal Becerra, E. (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.

- Wug, F., & Rafael, F. (2022). Simulación de biodigestión anaerobia para obtener biogás empleando la fracción orgánica de residuos sólidos para propuesta técnico/económica de planta piloto.
- Y. Liu et al., "Effects of different biofilm carriers on biogas production during anaerobic digestion of corn straw," *Bioresour. Technol.*, vol. 244, no. 30, pp. 445- 451, 2017. doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.171
- Yangin-Gomec, C., & Ozturk, I. (2013). Effect of maize silage addition on biomethane recovery from mesophilic co-digestion of chicken and cattle manure to suppress ammonia inhibition. *Energy Conversion and Management*, 71, 92-100.
- Yapu Clares, C. (2018). *Tratamiento de aguas residuales domesticas a través de un biodigestor anaerobio en la comunidad de Altamarani del Municipio de San Buenaventura* (Doctoral dissertation).
- YuQian L., ChunMei L., Akiber C. W., HaiRong Y., DeXun Z., YanPing L. XiuJin, L. (2017). Serial completely stirred tank reactors for improving biogas production and substance degradation during anaerobic digestion of corn stover, *Bioresource Technology* 235, pp. 380-388.
- Zahan, Z., Georgiou, S., Muster, T. H., & Othman, M. Z. (2018). Semi-continuous anaerobic co-digestion of chicken litter with agricultural and food wastes: a case study on the effect of carbon/nitrogen ratio, substrates mixing ratio and organic loading. *Bioresource technology*, 270, 245-254.
- Zanabria Aycho, J. I. (2019). Evaluación de la calidad de biol de segunda y tercera generación de estiércol de cuy producido en un biodigestor instalado en el instituto regional de la costa de la UNALM.
- Zegarra-Paredes, J., Salazar-Churata, I., & Torres-Vela, F. (2021). EFECTO DE LA TEMPERATURA Y PRESIÓN DE TERMOHIDRÓLISIS SOBRE LA DESFIBRILACIÓN DE RASTROJO DE PODA DE VID (VITIS VINÍFERA) PARA SU EMPLEO EN DIGESTIÓN ANAERÓBICA SECA. *Veritas*, 22(1), 39-47.
- Zeledón H.S., Hernández M.A., Ayala Morán J.E., Guzmán de Serrano R.F., Borja C.A., Alvarado de Torres M., Calderón V.R. (2007). Guía Técnica del Sorgo, 1ª Edición, Ed.: Digitales Diversas, La Libertad, El Salvador