

Efficiency of different types of livestock manure and substrates in biogas production. A systematic review.

Melania Arroyo Romero¹  and Sheanet Canchari Roman¹ 

¹ Universidad Privada del Norte, Av. El sol 461, San Juan de Lurigancho, Lima, Perú, n00232977@upn.pe, n00229850@upn.pe

Abstract– Biogas is considered one of the most efficient methods for agricultural and industrial waste management. The main objective was to collect information to determine the effectiveness of different types of livestock manure and substrates in biogas production. Eligibility criteria for this review were based on articles from the last ten years in the WOS and SCOPUS search engines. We continued with the selection of studies following the PRISMA (Identification, Screening and Included) method and the Risk of Bias Assessment (Robvis). As a result, pig manure plus crude glycerol produced the highest

efficiency of 94.5%; likewise, the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) presented the highest values in the generation of biogas. The most commonly used methods are monodigestion, digestion and anaerobic codigestion. Likewise, parameters such as temperature, pH, HRT, C/N, NT and TAN play an important role in biogas production. It is concluded that the sum of livestock manure and the different substrates are efficient in biogas generation with different percentage ranges.

Keywords– Manure, Cattle manure, Livestock waste, Biogas production and Efficiency.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Eficiencia de diferentes tipos de estiércol ganadero y sustratos en la producción de biogás. Una revisión sistemática.

Melania Arroyo Romero¹  and Sheanet Canchari Romani¹ 

¹ Universidad Privada del Norte, Av. El sol 461, San Juan de Lurigancho, Lima, Perú, n00232977@upn.pe, n00229850@upn.pe

Resumen– El biogás es considerado como uno de los métodos más eficaces para la gestión de residuos agrícolas e industriales. El objetivo principal fue recopilar información para determinar la eficacia de diferentes tipos de estiércol ganadero y sustratos en la producción de biogás. Los criterios de elegibilidad para esta revisión se basaron en artículos de los últimos diez años, en los buscadores WOS Y SCOPUS. Se continuó con la selección de los estudios siguiendo el método PRISMA (Identification, Screening e Included) y la Evaluación de riesgo de sesgo (Robvis). Se obtiene como resultado, que el estiércol de cerdo más glicerol crudo produce la mayor eficiencia de 94,5%, de igual manera, el Reactor de tanque agitado continuo (CSTR) presentó los valores más altos en la generación de biogás. Los métodos más usados son la monodigestión, digestión y codigestión anaeróbica. Así mismo, parámetros como la temperatura, pH, TRH, C/N, NT y TAN; juegan un papel importante para la producción de biogás. Se concluye que la suma del estiércol ganadero y los diferentes sustratos son eficientes en la generación de biogás con diferentes rangos de porcentajes.

Palabras claves– Estiércol, Estiércol de ganado, Residuos Ganaderos, Producción de biogás y Eficiencia.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento en la temperatura de la superficie terrestre ha ido creciendo de manera asombrosa estos últimos años, debido al incremento de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera [1]. Factores que contribuyen a este problema son el aumento poblacional e industrialización, urbanización y modernización [2]. Así mismo, la gran demanda de alimentos incrementa los terrenos de cultivo y la producción animal [3]. Por consiguiente, el sector agroindustrial genera enormes cantidades de residuos y subproductos, que lastimosamente no son valorizados y terminan en vertederos [4]. Estos residuos consisten principalmente en estiércol de ganado (avícola, vacuno, ovino, porcino, etc.) y subproductos (huesos y grasa animal) [3]. La mala gestión y manejo del estiércol animal, termina en una contaminación del aire y el agua [5], por medio de la emisión de gases no controlados o por infiltración a las aguas subterráneas [4].

Otro problema ambiental, es el uso de combustibles fósiles, que representan más del 80% del consumo y demanda energética a nivel mundial [2].

Así mismo, la principal fuente económica de los países en desarrollo proviene de los combustibles fósiles, generando una sobreexplotación del recurso, así como la contaminación del ambiente [6], ya que, la quema de combustibles fósiles y derivados de la biomasa aumenta las

emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera [7]. Es por ello que debe optarse por una producción energética que utilice fuentes renovables, como la biomasa residual [4], la cual es una sustancia biodegradable de origen animal y/o vegetal, que puede utilizarse para la producción de electricidad o calor [8].

El biogás es uno de los métodos más eficaces en la gestión de residuos agrícolas e industriales [9], y se realiza mediante el proceso de digestión anaeróbica (DA), el cual consta de 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [5]. El producto obtenido (biogás) está compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono, amoníaco, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno [10].

La eficiencia de conversión de la DA es generalmente alta y presenta cargas orgánicas bajas, gracias a que los microorganismos acceden bien a los nutrientes [3]. Sin embargo, la DA del estiércol presenta obstáculos. Uno de ellos es el bajo contenido energético, así como un alto contenido de fibra y agua, limitando la producción de biogás [11]. Esto se debería al alto contenido de material lignocelulósico de los sustratos, esto requiere tiempos de retención hidráulica (TRH) más prolongados [5]. Otro inconveniente, serían las características y el uso de solo un tipo de materia prima, ya que esta puede contener sustratos carbonosos o nitrogenados, llegando a inhibir la DA debido a la acidificación generada por los ácidos grasos volátiles o el aumento de amoníaco [4].

Por otro lado, la codigestión anaeróbica (CA) se refiere a la digestión simultánea de dos o más sustratos con características diferentes y/o complementarias, con el objetivo de balancear los requisitos nutricionales de los microorganismos durante la biometanización [4]. En los últimos años, la CA ha demostrado que brinda más beneficios a comparación de la DA de un solo material [5] y diversas investigaciones lo respaldan, ya que se han evaluado diferentes cosustratos para la DA de varios tipos de estiércol, como son: el ensilado del maíz, desechos de alimentos, remolacha azucarera, semillas oleaginosas (*Jatrofa*), entre otros [5], [12], [4], [2], y la mayoría informan una mejor producción de metano en comparación con la digestión de únicamente del estiércol.

El propósito de esta revisión sistemática es fomentar una producción de energía renovable, sostenible, accesible y sobre todo limpia, puesto que, los residuos como el estiércol ganadero abundan, pero no son tan aprovechados de manera energética, así mismo, se realiza con la finalidad de

disminuir los GEI y la acumulación de los residuos aprovechables en rellenos sanitarios y/o botaderos, mediante la producción de biogás.

El objetivo de esta investigación es recopilar información para determinar la eficacia de diferentes tipos de estiércol ganadero y cosustratos en la producción de biogás.

Para llegar a responder el objetivo, se utilizan como pregunta general: ¿Cuál es la eficiencia de los diferentes tipos de estiércol ganadero y sustratos en la producción de biogás, entre los años 2012 - 2022?, y preguntas específicas, ¿Cuáles son los métodos utilizados en la producción de biogás?, ¿Qué tipo de digestores se utilizan en la elaboración de biogás?, y finalmente, ¿Cuáles son los parámetros de control en la producción de biogás?

II. METODOLOGÍA

La presente investigación ha seguido la metodología de revisión sistemática que toma en cuenta las directrices y estándares establecidos en la metodología PRISMA [13], así mismo, se utilizó el software Parsifal.

A. Criterios de elegibilidad

Para esta revisión se utilizaron estudios de los últimos diez años, que fuesen artículos publicados en revistas científicas certificadas, considerando las variables principales, así como sinónimos y términos asociados en inglés. Se consideraron artículos en idioma inglés y portugués.

El análisis excluyó cartas al editor, comentarios y otras publicaciones de opinión. Así mismo, se afinó la búsqueda mediante la revisión de los títulos, abstract y palabras claves del autor. En cuanto a los artículos, se excluyeron los duplicados, aquellos que no presentan DOI ni resumen y acceso limitado; con la finalidad de reconocer y extraer información relevante para la investigación.

B. Fuentes de Información

Para la identificación y selección de artículos científicos se utilizaron las bases de datos Scopus y Web Of Science (WOS), de las organizaciones Elsevier y Clarivate, respectivamente. Se seleccionaron ambas plataformas por ser las fuentes más confiables sobre bases de datos de resúmenes y de literatura revisada por pares que cuentan con herramientas inteligentes para el control, análisis y categorizar la investigación académica publicada en las distintas revistas, actas de congresos, libros, artículos y otros.

C. Estrategia de Búsqueda

Para el desarrollo de una búsqueda estratégica que permita encontrar artículos de calidad, se utilizaron las palabras claves extraídas del enunciado PICOC, así mismo, se consideraron los sinónimos a las palabras claves con la ayuda del Tesoro de la UNESCO y una investigación a los términos asociados de las variables en textos académicos, siendo estas: P (“estiércol de ganado”), I/E (“producción de biogás”), C (tipos de estiércol y sustratos), O (“eficiencia”), C (“a nivel mundial”).

Por otro lado, se utilizó el operador booleano “AND” para interceptar términos o grupos de cadenas elaboradas, de igual forma, se utilizaron las comillas (“”) como símbolo

reservado para unir diversas palabras que corresponden a una sola variable, resultando en los siguientes términos claves en español: (“Estiércol”) AND (“Producción de biogás”) AND (“Eficiencia”). En inglés también se hizo la búsqueda: (“Manure”) AND (“Biogas production”) AND (“Efficiency”).

D. Selección de los Estudios

En la fase Identification, se limitaron los tipos de artículos que no son acordes a los criterios de inclusión y documentos publicados anteriores al año 2012 que no fueron detectados en el primer filtrado. En total, se excluyeron 60 documentos en esta fase, quedando 92 estudios que pasaron a la siguiente fase.

En la fase Screening - Abstract, se realizó la primera evaluación de par ciego de los estudios después de un debate sobre las diferencias en las calificaciones individuales, se concluyó que 29 artículos científicos no guardaban relación con el estudio, procediendo a ser excluidos y quedando un total de 63 documentos.

Por consecuente, en la fase Screening - Not Retrieved se eliminó 3 artículos debido a que no se pudo acceder a la información, quedando solo 60.

En el Screening - Full Text, se procedió a realizar una etapa de elegibilidad a los 60 estudios, los cuales fueron evaluados a través de un segundo análisis de par ciego, mediante 8 preguntas: ¿El propósito del estudio es acorde al objetivo de la RSL?, ¿El diseño de la investigación permite llevar a cabo el objetivo de la RSL?, ¿La unidad de información o muestra se ajusta al objetivo de la RSL?, ¿Los instrumentos hacen medidas de las variables de exposición y desenlace?, ¿Los resultados muestran estadísticas que permiten alcanzar el objetivo de la RSL?, ¿En la conclusión, se observa alguna relación con el objetivo de la RSL?, ¿El estudio presenta los factores asociados a las variables?, ¿El estudio presenta el desenlace o variación en la variable asociada al problema?.

Luego de comparar las similitudes y diferencias en las calificaciones, y de debatir opiniones, se decidió excluir a 28 estudios, obteniéndose 32 artículos aptos.

E. Proceso de Extracción de Datos

El conjunto de datos se descargó en formato CSV y se exportó a Excel, en donde se ordenó la información de acuerdo con el autor, título, año de publicación, nombre de revista, resumen, palabras claves, idioma, tipo de documento, DOI y buscador.

Se verificó que cada artículo seleccionado y aprobado esté acorde al tema a sustentar, con la eficiencia en la producción de biogás, el tipo de estiércol, sustratos, método, digestores y parámetros utilizados; todas estas especificaciones brindarán un resultado favorable a la RSL.

II. RESULTADOS

Se presentan los resultados considerando 5 criterios, de los 7 que tiene el PRISMA 2020, puesto que esta revisión no incluye resultados de metaanálisis [13].

A continuación, se presentan los resultados:

A. Selección de los Estudios

La estrategia de búsqueda inicial resultó en 11,966 registros en las bases de datos Scopus y WOS. Como se

observa en la figura 1, después del primer filtro se identificaron 152 documentos. En la fase de selección se excluyen 60 artículos duplicados, 29 cuyo resumen no se relaciona con la revisión y otras 3 investigaciones no tuvieron acceso.

De 60 informes seleccionados para elegibilidad potencial, 28 fueron eliminados porque su objetivo, muestra, diseño, resultados o conclusión, no guardaban relación con la investigación; quedando 32 estudios, los cuales fueron incluidos en la presente revisión sistemática.

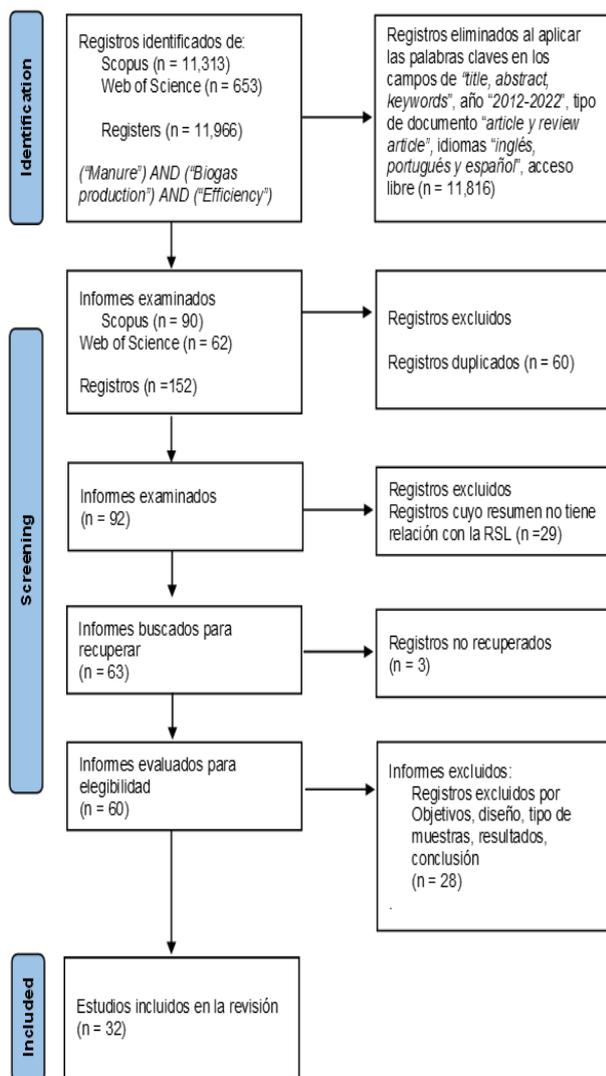


Fig. 1 Diagrama de flujo del proceso PRISMA.

B. Características de los Estudios

En la figura 2 se observa que, de los estudios seleccionados, en 14 países se han encontrado solo una publicación (representando <10%).

Por otro lado, Brasil y China son los países con mayor cantidad de publicaciones, 6 y 4 artículos respectivamente (>10%).

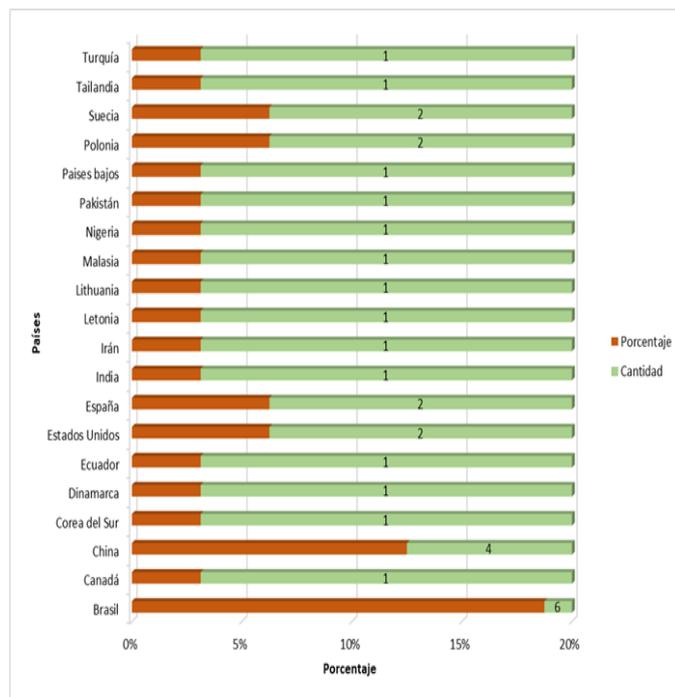


Fig. 2 Estudios publicados por países.

En figura 3 se validaron publicaciones desde el 2012 hasta el 2022, y donde la mayor cantidad de artículos encontrados fue en el 2022 con 9 publicaciones (representando >25%), seguido por el 2017 con 5 estudios (casi un 15%). Caso contrario, en el 2013 y 2016 no hubo publicaciones. El resto de los años, tienen publicaciones entre 1 y 4 artículos (5%).

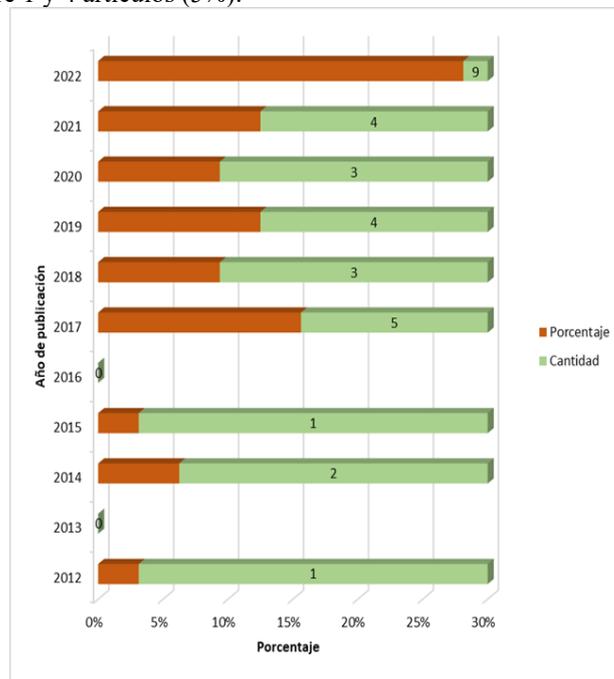


Fig. 3 Número de estudios publicados por año.

Referente al idioma, en la figura 4 se observa que los estudios seleccionados se encuentran publicados en portugués e inglés. La mayoría de ellos se encuentran en inglés (un 94%), lo restante en portugués (6%).

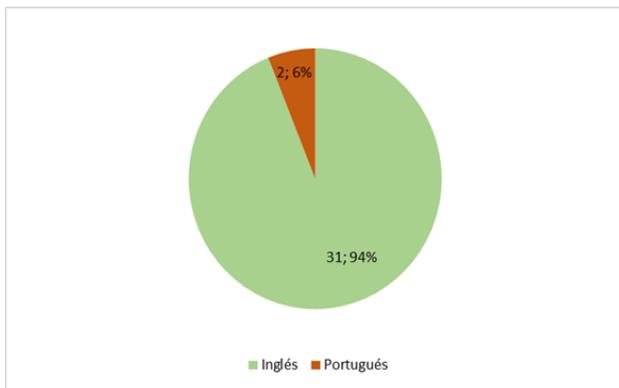


Fig. 4 Estudios aprobados por idioma.
Nota: No se encontraron artículos publicados en español

C. Riesgo de Sesgo de los Estudios

Respecto a los resultados de la evaluación del riesgo de sesgo, se considera que más del 75% de los estudios presenta riesgos bajos. Así mismo, menos del 75% cuentan con métodos estadísticos (ANOVA, T Student, Fisher, etc). Todos los artículos poseen la variable “Tipo de estiércol”. Finalmente, 2 estudios representaban riesgos altos en la RSL y fueron descartados.

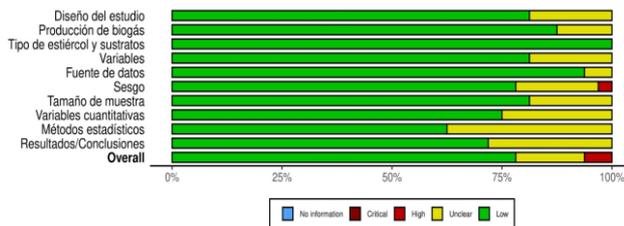


Fig. 5 Representación gráfica del riesgo de sesgo en estudios individuales.

D. Resultados de los Estudios Individuales Estiércol

La mala gestión del estiércol impacta negativamente en el ambiente y las soluciones más frecuentes, son: aportar nutrición al suelo y compostaje. Sin embargo, su uso excesivo puede ocasionar eutrofización (suelo), malos olores, aumento en gases contaminantes, lixiviación y escorrentía (agua). El estiércol puede convertirse en un recurso muy valioso y beneficioso puesto que genera biogás, es una fuente de energía renovable, recicla nutrientes y reduce los GEI [14], [15].

Sabiendo que el ganado vacuno y porcino, son los mayores productores de estiércol, con casi 1100 y 175 millones de toneladas anuales, respectivamente; se estima que un kilogramo de estiércol vacuno produciría 40 L de biogás [16], [17].

Sustratos

La cama de aves de corral (paja), el bagazo de cerveza y la vinaza de la caña de azúcar, son sustratos orgánicos que pueden ser utilizados como materia prima en la DA ya que tienen gran potencial de biometano [14], [18], [19]. Para mejorar la degradación de la materia orgánica y conseguir un alto rendimiento de biogás, se pueden inyectar varios inóculos como restos intestinales de rumiantes, frutas y verduras, biocarbón, madera, melazas, lodos de depuradora y aguas residuales lácteas [17], [8].

Digestión anaeróbica

Tiene un enfoque sostenible y es una tecnología con bajos costos de implementación, operación y mantenimiento. El biogás generado puede utilizarse como fuente energética, y los efluentes como biofertilizantes [14], [20].

La agitación en los digestores es un factor clave en la DA, ya que genera una mezcla dinámica del material para una mejor digestión y producción de biogás. En digestores sin agitación se presentan dificultades en la transferencia de calor y masa generada por una digestión estática [12], [21].

Codigestión anaeróbica

La codigestión de estiércol animal, residuos de cultivos y alimentarios incrementa potencialmente la producción de metano [22]. Teniendo en cuenta las cantidades y tipos de materias primas con diversas composiciones químicas, se estabiliza la relación C/N, gracias a la composición lignocelulósica del estiércol, y previene el riesgo de inhibición por NH_3 , aumentando la tasa de carga orgánica y mejorando el contenido de metano en el biogás. Este método reduce la mano de obra en la segregación de residuos a procesar; evita el almacenamiento, tratamiento y manipulación por separado de residuos mixtos [23], [14].

Digestores

Constan de una cámara cerrada, donde se coloca la biomasa (efluente rico en materia orgánica) y el inóculo (el estiércol que contiene bacterias anaerobias metanogénicas). El sustrato es proporcionado por la biomasa y el digestor brinda las condiciones anaerobias necesarias para la proliferación bacteriana, obteniéndose como resultado el metabolismo del biogás y, lo que queda del sustrato, en un fertilizante con nutrientes esenciales para las plantas [19].

Algunos digestores mencionados en la literatura son: Para usos industriales: los digestores anaerobios de flujo ascendente (UASB) presentan muchas ventajas como lo simple de su implementación, mantenimiento y operación [20]. El digestor de flujo multifásico con un sistema de DA dinámica, soluciona problemas de fluidez y cuenta con tasas de transferencia de calor y masa significativamente altas [21].

Para usos rurales: los biodigestores domésticos (cúpula china, el tambor flotante indio, el flujo de tapón y el digestor Puxin) son opciones adecuadas para las personas y agricultores, ya que son relativamente económicos, no requieren calefacción y utilizan sistemas mixtos no forzados [10].

Parámetros de control

En la elaboración del biogás, los sólidos volátiles (SV) y la demanda química de oxígeno (DQO) evalúan el desempeño de los digestores, puesto que los cambios en la carga orgánica pueden modificar la degradación, volumen y calidad del biogás generado por el digestor. Si los TRH se ven afectados, se interfiere en el periodo de disponibilidad entre los sustratos y los microorganismos anaerobios, es decir, es un factor crucial en la actividad metanogénica [20]. En base al contenido de sólidos totales (ST) se puede clasificar la DA en: DA húmeda ($\text{ST} < 10\%$), semiseca ($10\% < \text{ST} < 20\%$) y seca ($\text{ST} \geq 20\%$) [3]. Una temperatura constante y adecuada garantiza el mantenimiento de la digestión con una alta tasa de producción de biogás [21].

E. Resultados de la síntesis

En la tabla 1 se encuentran los artículos seleccionados y revisados del proceso PRISMA, De igual manera, se detallan tipos de estiércol, sustratos, métodos de elaboración,

digestores y parámetros utilizados en la producción de biogás. Esta tabla presenta, identifica y ayuda a responder la pregunta general y específicas, mediante el análisis y comparación de 30 estudios.

TABLA 1
BASE DE DATOS ACERCA DE LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Referencia	Tipo de estiércol	Sustrato	Método de elaboración	Tipo de digestor	Parámetros de control	Eficiencia (%)
[15]	Vaca y aves de corral	Aguas residuales de yuca	Codigestión Anaerobia	Reactor de digestión anaerobia	SV, ST, pH, DQO, TP, TKN	70%
[26]	Vaca y aves de corral	Material de cama (paja)	Digestión Anaerobia	Reactor de tanque agitado continuo (CSTR)	T, OLR, HRT	40-50%
[6]	Vaca	Torta de Semillas de Jatrofa	Codigestión Anaerobia	Biodigestores discontinuos	SV, TN, TP y COT	60%%
[18]	Puerco y vaca	Bagazos de cervecería y destilería	Digestión anaeróbica y aeróbica	Digestor anaeróbico	pH	70%
[3]	Pollo	Grasa de cerdo	Codigestión Anaerobia	Biorreactor anaeróbico de alimentación continua	SV, ST, pH, TAN, FAN, COT, Azufre total	Aprox. 60%
[30]	Aves de corral	Residuos de aves de corral	Digestión Anaerobia	Digestores discontinuos	SV, ST, NMP de coliformes	<37.2%
[12]	Puerco	Residuos alimentarios.	Codigestión Anaerobia	Reactor con agitación; Reactor sin agitación.	SV, ST, SF, pH, AV, DQO, AT	70 y 80%
[20]	Puerco	-	Monodigestión Anaerobia	Reactor de flujo ascendente (UASB)	SV y DQO	80%
[11]	Vaca	Albúmina de huevo; Aceite de colza; Almidón de patata	Monodigestión anaerobia; Codigestión anaerobia	Reactor continuo de tanque agitado (CSTR)	Producción total de gas, pH, composición del gas, AGV y TRH	85%
[4]	Vaca	Remolacha azucarera.	Codigestión termófila anaeróbica	Reactor semicontinuo	SV, ST, pH, DQO, DBO, TKN, AT	56%
[21]	Puerco	Desechos de alimentos y paja	Digestión anaerobia; Digestión dinámica; Digestión estática	Digestor anaeróbico de flujo multifásico (MFD)	SV, ST, T, DBO, DQO,	60%
[10]	Vaca	-	Monodigestión anaerobia	Digestores mixtos con impulsor (STR); Digestor de domo chinos (CDD); Digestores no mezclados (UMD)	Concentraciones volumétricas medias, CH ₄ , AGV, SV, OLR, HRT	67%
[31]	Puerco	-	Monodigestión anaerobia	-	SV, ST, DQO, TP, TN	72%
[24]	Puerco	Glicerol crudo	Digestión anaerobia; Codigestión anaerobia	Reactor de tanque agitado continuo (CSTR)	SV, ST, pH, T, DQO, HRT, AGV	94,9%
[14]	Pollo y vaca	-	Monodigestión anaerobia	Biorreactor: Líquido-Sólido a baja temperatura.	SV, ST, pH, DQO, TKN, TAN, FAN AGV,	60-80%
[7]	Vaca	Glicerina cruda	Codigestión anaerobia	Biodigestores discontinuos de pequeña escala.	SV, ST, DQO, NMP coliformes	62.5% con 4% de glicerina
[32]	Puerco	Ensilaje de maíz; Purín de cerdo	Digestión anaeróbica y digestión autogenerativa a alta presión.	Conceptos TPAD y AHPD.	Presión, T y pH	Modelo temático

[29]	Puerco	Paja de Arroz.	Digestión anaeróbica	Sistema piloto de fermentación de biogás modificado.	SV, ST, DQO, TN, CT	52,8%
[33]	Puerco	Aceite usado; Enzimas lipolíticas	Codigestión anaerobia	Biodigestor discontinuo de sobremesa.	SV, ST, pH, DQO, NMP coliformes	Análisis estadístico
[27]	Vaca	Almazara subproducto de aceituna	Digestión anaerobia; Codigestión anaerobia	Reactores de tanque agitado.	SV, ST, pH, DQO, AGV	53- 58%
[2]	Vaca	Torta desaceitada de Jatrofa	Codigestión anaerobia	Digestor de biogás flotante	SV, ST, pH, T, AGV	60-70%
[19]	Vaca	Viñaza de azúcar	Monodigestión anaerobia	Modo discontinuo.	ST, pH, DQO, TO, TN	70%
[9]	Puerco	Residuos de alimentos (Arroz, verdura, carne, almidón y grasas)	Codigestión anaerobia	Digestor anaeróbico de dos etapas, con intercambiador de calor.	ST, SS, TDS, pH, DQO, DBO,	57.50%
[25]	Vaca	Paja de maíz	Codigestión anaerobia	Reactor de tanque agitado semicontinua.	SV, ST, pH, TN	61.17%
[17]	Vaca	Desechos intestinales	Inoculación de desechos y digestión anaerobia	-	pH, MC, VS y TN	-
[16]	Puerco y vaca	Glicerina	Digestión anaerobia	Monodigestor	SV, ST, pH, DQO, TN, AGV	68 ± 4%.
[5]	Vaca	Ensilado de maíz	Digestión anaerobia; Codigestión anaerobia	Reactor de tanque de agitación continua de una etapa (CSTR); digestor anaerobio híbrido	SV, ST y HRT	75%
[23]	Aves de corral	-	Digestión anaerobia	Reactor de tanque agitado (CSTR)	SV, ST, pH y DQO	65%
[28]	Vaca	Paja de maíz	Digestión anaerobia; Codigestión anaerobia	Reactor Semicontinua de dos fases	T, SV, ST y pH	Más del 50% con T > 25°C.
[1]	Vaca	-	Digestión anaerobia seca semicontinua	Digestión anaerobia seca semicontinua	SV, ST, pH y AGV	65%

Nota: No se encontraron artículos publicados en español SV: Solidos Volátiles, ST: Solidos Totales, SS: Solidos en suspensión, SF: Solidos fijos, TDS: Solidos disueltos totales, ORL: Tasas de carga orgánica, pH: Indicador de acidez, AV: Acides total, T: Temperatura, DCO: Carbono orgánico disuelto, DQO: Demanda química de oxígeno, DBO: Demanda bioquímica de oxígeno, TP: Fosforo total, TKN: Nitrógeno Kjeldahl total, HRT: Tiempo de retención hidráulica, TN: Nitrógeno Total, AGV: Ácidos grasos volátiles, AT: Alcalinidad total, COT: Carbono orgánico total, CT: Carbono total, TAN: Nitrógeno amoniacal total, FAN: Nitrógeno amoniacal libre. (-): No presenta datos

IV. DISCUSIONES

La eficiencia obtenida por los estudios de Lymperatou *et al.* [24] y Pazuch *et al.* [7] fue 94.9 y 68%, mientras que Timmerman *et al.* [16] presentó una eficiencia del 62.5% en la generación de biogás. Los tres estudios tuvieron el mismo sustrato, la glicerina, sin embargo, Lymperatou *et al.* [24] y Pazuch *et al.* [7] trabajaron con estiércol de vaca, contrario a Timmerman *et al.* [16], quién usó estiércol porcino. El método de elaboración fue diferente, Pazuch *et al.* [7] utiliza la codigestión anaerobia, Timmerman *et al.* [16] la digestión anaeróbica y Lymperatou *et al.* [24] utiliza ambos métodos.

Los métodos frecuentemente empleados fueron la codigestión, digestión y monodigestión anaeróbica, e incluso una mezcla de métodos. Casos como el de Taghinazhad *et al.* [25], utiliza solo la codigestión anaeróbica, mientras que Wang *et al.* [28], la codigestión junto a la digestión anaerobia. Ambos trabajan con estiércol de vaca y paja de maíz, sin embargo, sus eficiencias son 61.17% y 50% respectivamente. Obteniéndose mejores

resultados con la codigestión únicamente. Esto lo confirman, Álvarez *et al.* [6] y Sharma *et al.* [2], quienes emplean la codigestión anaeróbica y tienen una eficiencia entre 60 - 70%, ambos utilizando estiércol de vaca y torta desaceitada de Jatropha. La diferencia entre sus eficacias se debería a la elección del digestor, ya que ambos trabajan con los mismos insumos, no obstante, Álvarez *et al.* [6] utiliza el digestor discontinuo mientras que Sharma *et al.* [2], el digestor de biogás flotante.

do. Amaral *et al.* [20] y Mahato *et al.* [14] aplican la monodigestión anaeróbica descomponiendo la materia en partículas menores. do. Amaral *et al.* [20] usa el digestor de flujo ascendente, mediante un solo tanque, produciendo una rápida reducción de DBO, soportando altas tasas de retención hidráulica, presentando una alta capacidad máxima de generación de biogás obteniendo una eficiencia del 80% trabajando únicamente con estiércol porcino. A diferencia de Mahato *et al.* [14], que utilizó un biorreactor: líquido - sólido a baja temperatura, donde la presencia de microorganismos anaeróbicos forman nódulos bacterianos

densos, facilitando la separación y descarga del biogás con una máxima retención hidráulica durante el proceso, así mismo, facilita la degradación del estiércol de pollo que tiene alta presencia de amoníaco y agiliza la sedimentación del estiércol de vaca lechera utilizada, obteniendo así eficiencias entre 60% a 80% dependiendo de la temperatura del reactor.

Mantovan *et al.* [12] aplica como método la codigestión anaeróbica y emplea reactores con y sin agitación, obteniendo una disminución de pH y aumento en la acidez de los contenidos, así como una eficiencia mayor de 80% con el reactor con agitación. Eliasson *et al.* [11] utiliza el mismo método que Mantovan *et al.* [12], pero el reactor es continuo de tanque agitado (CSTR), el cual es similar al tanque con agitación, sin embargo, el CSTR genera un proceso químico continuo con una mezcla eficiente (estiércol de vacas con albumina de huevo, aceite de colza y almidón de patata) para el proceso generador de biogás con una eficiencia de 85%. Si bien Rubio *et al.* [27] usó el mismo reactor que Eliasson *et al.* [11], el grado de eficiencia obtenido fue 58%. Este resultado puede deberse a la temperatura mesófila del proceso, además del uso del estiércol vacuno y almazara de aceituna, provocando la no eliminación de materia orgánica al transcurrir los días (desestabilización de retención hidráulica) y haciendo que la producción de metano sea deplorable.

Debido a que el estiércol presenta gran contenido de fibra y agua, hace que se requiera TRH más prolongados y de menor eficiencia en la generación de biogás. Eliasson *et al.* [26] confirma esto, ya que genera las eficiencias más bajas de todos los estudios, con valores entre 40-50% utilizando solo estiércol de vaca y de aves de corral. De igual manera, Jegede *et al.* [10] trabaja con la monodigestión del estiércol de vaca y cama de lecho de paja, obteniendo una eficiencia del 67%. Este pequeño aumento se debería a la cama del lecho de paja como sustrato, ya que, contrarrestan el contenido amoniacal del estiércol avícola.

Para que se garantice una tasa alta de producción de biogás, debe considerarse la temperatura. Esto lo comprueba Wang *et al.* [28], el cual genera una eficiencia de más del 50%, con una temperatura mayor al 25°C. Sin embargo, Mahato *et al.* [14] señala que una temperatura mayor a 50°C es inestable y genera un alto contenido de FAN.

La proporción de C/N, entre 25-30 son las más adecuadas en la generación de metano. Los estudios de Achi *et al.* [15] y Álvarez *et al.* [6] presentan proporciones dentro de este rango. El primero tiene una relación de 27.8, mientras que el segundo, obtuvo su mayor producción de CH₄ con una relación de 25 y la más baja con 20.

El estiércol ganadero proporciona la alcalinidad necesaria para estabilizar el proceso de digestión anaeróbica, esto queda evidenciado en el estudio de Mahato *et al.* [14], en donde el pH del estiércol de vaca, los primeros 6 y 8 días, fue menor a 7, pero luego se fue estabilizando la relación acidez/alcalinidad. Igualmente, con Buivydas *et al.* [3], el pH del estiércol de pollo fue 7.8, indicando un ligero cambio hacia sustancias alcalinas similar a Berry *et al.* [18], con un pH de 7.8 en el estiércol de cerdo y 6.5 en estiércol de vaca. Así mismo, el amoníaco es de suma importancia en el suministro de nutrientes necesarios para el crecimiento microbiano y está relacionado con el pH y la temperatura,

no obstante, Page *et al.* [14] y Buivydas *et al.* [3] coinciden en que el aumento del TAN puede reducir la generación de metano e inhibir la producción de biogás.

V. CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo fue recopilar información para determinar la eficacia de diferentes tipos de estiércol ganadero y cosustratos en la producción de biogás a través de una revisión sistemática, por ello se tuvo en cuenta puntos esenciales como: tipos de estiércol y sustratos, métodos y digestores, así como parámetros en la producción del biogás. Siguiendo la metodología PRISMA y la evaluación del Riesgo de Sesgo se obtuvieron 30 estudios.

La mayor eficiencia en la producción de biogás encontrada fue de 94,9% utilizando estiércol porcino y glicerol crudo, seguido del estiércol de vaca con albúmina de huevo, el aceite de colza y almidón de patata con un 85%. Por otro lado, las eficiencias más bajas se obtuvieron con estiércol de vaca y de aves de corral, con valores entre 40 y 50%, seguido por el estiércol porcino con paja de arroz con 52,8%. Los métodos más usados en la generación de biogás son la codigestión, digestión y monodigestión anaeróbica, en algunos casos fueron usados hasta dos métodos en un solo proceso. En la gran mayoría de estudios se hizo visible el uso de un sustrato o más, con diferentes grados de eficiencia. El digestor utilizado por los autores puede ser el mismo, sin embargo, los resultados pueden ser diferentes debido al tipo de materia orgánica utilizado. En algunos digestores, el proceso de reducción es más rápido; pero sin el sustrato correcto, la producción de biogás no sobrepasa el 60%. En la literatura, el Reactor continuo de tanque agitado tuvo la mayor eficiencia con un 85%. Para obtener una óptima generación de biogás, se consideran los parámetros de T, pH, TRH, C/N, NT y TAN. Así mismo, el tipo de estiércol y sustratos utilizados deben presentar contenidos de fibra y agua moderados con el fin de controlar los TRH y tener buena etapa de metanización. De igual forma, una temperatura >25°C, pero <50°C garantiza una buena producción del biogás, con un pH de neutro a alcalino, una proporción entre 25-30 de C/N, así como evitar el incremento del contenido amoniacal o nitrogenado en la mezcla.

Finalmente, se recomienda mayor análisis sobre la codigestión anaeróbica de otros tipos de estiércol (cuy, alpaca, caballos, etc.), adición de la glicerina y otros sustratos para potenciar la eficiencia del biogás.

AGRADECIMIENTO

A nuestros docentes y a la Universidad Privada del Norte, por brindar apoyo e incentivar la investigación académica. A nuestros padres por el apoyo incondicional.

REFERENCIAS

- [1] Z. Zulkifli, N. Rasit, M.N.I., Siddique. & P. Kongjan, "Dry mesophilic and thermophilic semi-continuous anaerobic digestion of cow manure: effects of solid loading rate on the process performance" *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 10(4), 5972 – 5977, abr., 2020. Consultado: 26 nov. 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.33263/BRIAC104.972977>
- [2] A. K. Sharma, P. K. Sahoo, M. Mukherjee, & A. Patel, "Assessment of Sustainable Biogas Production from Co-Digestion of Jatropha De-Oiled Cake and Cattle Dung Using Floating Drum Type Digester under Psychrophilic and Mesophilic Conditions", *Clean Technologies*, 4(2),

- 529–541, jun., 2022. Consultado: 26 nov 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4020032>
- [3] E. Buivydas, K. Navickas, K. Venslauskas, B. Žalys, V. Župerka, & M. Rubežius, “Biogas Production Enhancement through Chicken Manure Co-Digestion with Pig Fat” *Applied Sciences*, 12(9), 4652, may., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/app12094652>
- [4] X. Gómez, K. Aboudi, C. Álvarez, & L. Romero, “Successful and stable operation of anaerobic thermophilic co-digestion of sun-dried sugar beet pulp and cow manure under short hydraulic retention time” *Chemosphere*, 293, abr., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133484>
- [5] A. Varol, & A. Ugurlu, “Comparative evaluation of biogas production from dairy manure and co-digestion with maize silage by CSTR and new anaerobic hybrid reactor” *Eng. Life Sci.*, 17, 402–412, sept., 2017. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/elsc.201500187>
- [6] X. Álvarez, I. Mercado, D. Valdez, E. Santos, E. Delgado, & J. Peralta, “Effect of temperature and the Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on methane production through anaerobic co-digestion of cattle manure and *Jatropha* seed cake” *Renewable Energies and Power Quality*, 20, 364–368, sept., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.24084/repqj20.312>
- [7] F. A. Pazuch, J. Siqueira, L. Friedrich, A. M. Lenz, C. E. C. Nogueira, & S. N. M. Souza, “Co-digestion of crude glycerin associated with cattle manure in biogas production in the State of Paraná, Brazil” *Acta Scientiarum. Technology*, 39(2), 149–159, may., 2017. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i2.29167>
- [8] J. Wiater, & M. Horysz, “ORGANIC WASTE AS A SUBSTRAT IN BIOGAS PRODUCTION. Journal of Ecological Engineering”, 18(5), 226–234, sept., 2017. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.12911/22998993/74629>
- [9] P. Somsila, U. Teeboonma, & S. Khabuanchalad, “A Two-Stage Anaerobic Digester of Pig Manure and Food Waste for Biogas Production with Heat Exchanger” *Engineering Journal*, 25(10), 123–132, oct., 2021. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.10.123>
- [10] A. O. Jegede, G. Zeeman, & H. Bruning, “Effect of Mixing Regimes on Cow Manure Digestion in Impeller Mixed, Unmixed and Chinese Dome Digesters” *Energies*, 12(13), 2540, jul., 2019. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/en12132540>
- [11] K.A. Eliasson, A. Singh, S. Isaksson, & A. Schnürer, “Co-substrate composition is critical for enrichment of functional key species and for process efficiency during biogas production from cattle manure”. *Microbial Biotechnology*, 16, 350–371, dic., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14194>
- [12] F. de M. Mantovan, D. C. Zenatti, & E. L. K. Burin, “Effect of Agitation on Anaerobic Co-Digestion of Swine Manure and Food Waste”. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 64, jul., 2021. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021200102>
- [13] M. J. Page, J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, Mayo-Wilson, E., McDonald, Moher, D. S. “The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews”. *PLoS Medicine*, 18(3), 1–15, mar., 2021. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PMED.1003583>
- [14] P. Mahato, B. Goyette, Md. S. Rahman, & R. Rajagopal, “Processing High-Solid and High-Ammonia Rich Manures in a Two-Stage (Liquid-Solid) Low-Temperature Anaerobic Digestion Process: Start-Up and Operating Strategies”. *Bioengineering*, 7(3), 80, jul., 2020. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/bioengineering7030080>
- [15] C. G. Achi, A. Hassanein, & S. Lansing, “Enhanced Biogas Production of Cassava Wastewater Using Zeolite and Biochar Additives and Manure Co-Digestion”. *Energies*, 13(2), 491, ene., 2020. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/en13020491>
- [16] M. Timmerman, E. Schuman, M. van Eekert, & J. van Riel, “Optimizing the performance of a reactor by reducing the retention time and addition of glycerin for anaerobically digesting manure”. *Environmental technology*, 36(9–12), 1223–1236, jun., 2015. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.983989>
- [17] M. Tariq, A. Mehmood, Y. Abbas, M. Ali, Z. Ahmad, U. Saeed, S. Rukh, K. Shahzad, M. Rafique, A. Raza, A. Khan, & S. Yun, “Enhancement of Anaerobic Digestion of Cow Manure Through Inoculation Under Mesophilic Conditions”. *BioEnergy Research*, 16, dic., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s2155-022-10547-6>
- [18] Z. Berry, J. Loughrin, S. Burris, E. Conte, N. Lovanh, & K. Sistani, “Improving Anaerobic Digestion of Brewery and Distillery Spent Grains through Aeration across a Silicone Membrane”. *Sustainability*, 14(5), 2755, febr., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/su14052755>
- [19] C. E. de F. Silva, & A. K. de S. Abud, “Influence of manure concentration as inoculum in anaerobic digestion of vinasse. *Acta Scientiarum*”. *Biological Sciences*, 39(2), 173–180, jun., 2017. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.4025/actasciobiolsci.v39i2.34007>
- [20] A. C. do. Amaral, A. Kunz, R. L. R. Steinmetz, F. Cantelli, L. A. Scussiato, & K. C. Justi, “Swine effluent treatment using anaerobic digestion at different loading rates”. *Engenharia Agrícola*, 34(3), 567–576, jun., 2014. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000300019>
- [21] P. Guo, J. Zhou, R. Ma, N. Yu, & Y. Yuan, “Biogas Production and Heat Transfer Performance of a Multiphase Flow Digester”. *Energies*, 12(10), 1960, may., 2019. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/en12101960>
- [22] A. Lagzdins, “Present and Future Availability of Livestock Manure for Biogas Production in Latvia”. *Rural Sustainability Research*, 47(342) 1–7, oct., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.2478/plua-2022-0001>
- [23] F. Wang, M. Pei, L. Qiu, Y. Yao, C. Zhang, & H. Qiang, “Performance of Anaerobic Digestion of Chicken Manure Under Gradually Elevated Organic Loading Rates”. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12), 2239, jun., 2019. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/ijerph16122239>
- [24] A. Lymperatou, I. Skiadas, & H. Gavala, “Anaerobic co-digestion of swine manure and crude glycerol derived from animal fat—Effect of hydraulic retention time”. *AIMS Environmental Science*, 5(2), 105–116, abr., 2018. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3934/envirosci.2018.2.105>
- [25] J. Taghizad, R. Abdi, & M. Adl, “Kinetic and Enhancement of Biogas Production For The Purpose of Renewable Fuel Generation by Co-digestion of Cow Manure and Corn Straw in A Pilot Scale CSTR System”. *International Journal of Renewable Energy Development*, 6(1), 37–44, mar., 2017. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.14710/ijred.6.1.37-44>
- [26] K. A. Eliasson, M. Westerholm, S. Isaksson, & A. Schnürer, “Anaerobic Digestion of Animal Manure and Influence of Organic Loading Rate and Temperature on Process Performance, Microbiology, and Methane Emission From Digestates”. *Frontiers in Energy Research*, 9, dic., 2021. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14194>
- [27] J. Rubio, L. Fdez, L. Romero, A. Wilkie, & J. García, “Mesophilic anaerobic co-digestion of two-phase olive-mill waste and cattle manure: Optimization of semi-continuous process”. *Fuel*, 328, nov., 2022. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125354>
- [28] S. Wang, F. Ma, W. Ma, P. Wang, G. Zhao, & X. Lu, “Influence of Temperature on Biogas Production Efficiency and Microbial Community in a Two-Phase Anaerobic Digestion System”. *Water*, 11(1), 133, ene., 2019. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/w11010133>
- [29] H. Qu, J. Cao, Y. Chen, R. Li, P. Wang, M. Chen, Q. Li, J. Du, and He, J. “Enhancement of biogas production from bundled rice straw solid-state fermentation by adding microbial agents,” *BioRes.* 13(4), 8723–8737, oct., 2018. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: [Doi:10.15376/BIORES.13.4.8723-8737](https://doi.org/10.15376/BIORES.13.4.8723-8737)
- [30] R. M. de F. Farias, M. A. P. Orrico Junior, A. C. A. Orrico, R. G. Garcia, S. R. Centurion, & A. R. M. Fernandes, “Biodigestão anaeróbia de dejetos de poedeiras coletados após diferentes períodos de acúmulo”. *Ciência Rural*, 42(6), 1089–1094, jun., 2012. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000031>
- [31] D.J. Lee, J.S. & Seo, D.C. Bae, “Potential of biogas production from swine manure in South Korea”. *Appl Biol Chem* 61, 557–565, ago., 2018. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s13765-018-0390-4>

- [32]K. Postawa, J. Szczygieł, & M. Kułazyński, “Innovations in anaerobic digestion: a model-based study”. *Biotechnol Biofuels*, 14 (19), ene., 2021. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01864-z>
- [33]J. P. Rodrigues, A. C. A. Orrico, M. A. P. Orrico Junior, L. de O. Seno, L. C. de . Araújo, & N. da S. Sunada, “Adição de óleo e lipase sobre a biodigestão anaeróbia de dejetos suínos”. *Ciência Rural*, 44(3), 544–547, mar., 2014. Consultado: 26 nov. 2023 [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300025>