



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Tecnología de Mono-digestión Anaerobia Usando Residuos
Orgánicos para la Producción de Biogás. Revisión Sistemática,
2021**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA AMBIENTAL

AUTORA:

Mac Kay Rodriguez, Astrid Fiorella (ORCID: 0000-0002-5246-1293)

ASESORA:

Mg. Cabello Torres, Rita Jaqueline (ORCID: 0000-0002-9965-9678)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2021

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación lo dedico a mis padres, Arturo y Lleny, a mi hermano, a mi abuela Amanda y en especial a mi abuelo, Lino Rodríguez. Un abrazo enorme al cielo. Gracias por mantener firme su confianza, paciencia, apoyo y amor incondicional.

Agradecimiento

Agradezco a mi asesora, Rita Cabello, por el gran apoyo y paciencia en la elaboración del presente trabajo de investigación. A mi familia y amigos, gracias por brindarme fuerza y coraje para poder cumplir con las metas que me proponga.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Índice de gráficos	vii
Índice de abreviaturas	viii
Resumen	ix
Abstract	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	5
III.MÉTODO	27
3.1 Tipo y diseño de investigación	27
3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística	28
3.3 Escenario de estudio.....	29
3.4 Participantes	29
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	29
3.6 Procedimientos	29
3.7 Rigor científico	30
3.8 Método de análisis de información.....	31
3.9 Aspectos éticos.....	32
IV.RESULTADOS	Y
DISCUSIONES.....	33
V. CONCLUSIONES	64
VI.RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS.....	68
ANEXOS	86

Índice de tablas

Tabla 1: Composición del biogás.....	6
Tabla 2: Etapas del proceso de digestión anaerobia	6
Tabla 3: Reacción química de la etapa acidogénica.....	9
Tabla 4: Reacción química de la etapa acetogénica	10
Tabla 5: Reacción química de la etapa metanogénica	11
Tabla 6: Rangos de temperatura	12
Tabla 7: Categorías y Subcategorías	28
Tabla 8: Resumen de criterios de búsqueda <i>de criterios de búsqueda</i>	30
Tabla 9: Tipos de reactores utilizados en la mono-digestión anaerobia para la producción de biogás	34
Tabla 10: Parámetros de control durante la mono-digestión anaerobia	41
Tabla 11: Parámetros fisicoquímicos de los sustratos.....	46
Tabla 12: Pretratamientos aplicados a los sustratos en la mono-digestión anaerobia para la obtención de biogás	52

Índice de figuras

Figura 1: Etapas de la digestión anaerobia	7
Figura 2: Sistema del reactor anaerobio UASB.....	17
Figura 3: Ilustración de un reactor ABR	18
Figura 4: Ilustración del reactor CSTR	19
Figura 5: Ilustración pretratamiento microondas	22
Figura 7: Ilustración del pretratamiento de ozonización	24

Índice de gráficos

Gráfico 1: Tipo de sustrato y temperaturas	43
Gráfico 2: Tipo de sustrato y pH.....	44
Gráfico 3: Tiempo de retención hidráulica.....	45
Gráfico 4: pH en sustratos.....	49
Gráfico 5: Demanda Química de Oxígeno en sustratos.....	50

Índice de abreviaturas

ABR	:	Reactor Anaerobio Discontinuo
AGV	:	Ácidos grasos volátiles
ASBR	:	Reactor Discontinuo de Secuenciación Anaerobia
CH ₄	:	Metano
CO ₂	:	Dióxido de Carbono
CSTR	:	Reactor Anaerobio de Tanque Agitado Continuo
DQO	:	Demanda Química de Oxígeno
GEI	:	Gases de efecto invernadero
H ₂	:	Hidrógeno
N ₂	:	Nitrógeno
O ₂	:	Oxígeno
pH	:	Potencial de Hidrógeno
SV	:	Sólidos Volátiles
ST	:	Sólidos Totales
TRH	:	Tiempo de retención hidráulica
UASB	:	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Resumen

La mono-digestión anaerobia es una alternativa viable y sostenible, especialmente como un tratamiento adecuado para la gestión de los residuos orgánicos, ya que estos presentan un gran potencial energético. La inadecuada gestión de estos genera un problema socioambiental y sanitario. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar la tecnología de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás. Asimismo, la metodología de la investigación es cualitativa y aplicada, ya que se basó en la síntesis y análisis de 40 artículos científicos de revistas indexadas y se consideraron estudios con antigüedad no mayor a 5 años. Los resultados demostraron que los reactores más utilizados son los de Flujo Ascendente – UASB produjo una mayor cantidad de biogás (432.3 L/d), Reactor de Tanque Agitado Continuo - CSTR, Reactor Anaerobio Discontinuo - ABR y Reactor discontinuo de Secuenciación Anaerobia - ASBR, con parámetros críticos de control comprendidos por la Temperatura (psicrófila 17-19°C, mesófila 37°C y termófila 55°C) con un rango de pH entre 6.5 y 8.9, tasa de carga orgánica promedio 9.66 g/L.d y tiempo de retención hidráulica promedio de 7.6 días, asimismo pretratamientos: físicos, químicos, biológicos y térmicos, los más resaltados fueron: molienda (143L/Kg.SV)(N) e hidrotermal (269.96 LCH₄/kgDQO).

Palabras Claves: Metano, mono-digestión anaerobia, reactores anaerobios, parámetros y pretratamientos de control.

Abstract

Anaerobic mono-digestion is a viable and sustainable alternative, especially as a suitable treatment for the management of organic waste since these have great energy potential. The inadequate management of these generates a socio-environmental and health problem. Therefore, the main objective of the present work is to evaluate the anaerobic mono-digestion technology using organic waste to produce biogas. Likewise, the research methodology is qualitative and applied, because it was based on the synthesis and analysis of 40 scientific articles from indexed journals and studies with an antiquity of no more than 5 years were considered. The results showed that the most used reactors are the Up flow Reactors - UASB produced a greater quantity of biogas (432.3 L / d), Continuous Stirred Tank Reactor - CSTR, Batch Anaerobic Reactor - ABR and Anaerobic Sequencing Batch Reactor - ASBR, with critical control parameters comprised by Temperature (psychrophilic 17-19 ° C, mesophilic 37 ° C and thermophilic 55 ° C) with a pH range between 6.5 and 8.9, average organic load rate 9.66 g/L.d and hydraulic time retention average of 7.6 days, also pretreatments: physical, chemical, biological and thermal, the most outstanding were: grinding (143L/Kg.SV) (N) and hydrothermal (269.96 LCH₄/kgDQO).

Keywords: Methane, anaerobic mono-digestion, anaerobic reactors, control parameters and pretreatments

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional relacionado con el desarrollo industrial, la migración de los seres humanos a áreas urbanas y el consumismo, han generado no sólo problemas ambientales, sino también sociales y económicos, donde la ausencia de control e inadecuada gestión de residuos sólidos se ha convertido en uno de los principales desafíos por resolver (De Souza, Montenegro, Faceli y Casadei, .2017, p.1).

Por ejemplo, se estima que para el año 2025 la generación de residuos sólidos urbanos aumente a 2.2 billones de toneladas por año a nivel mundial, donde los principales afectados serían los países en vía de desarrollo que aún presentan problemas respecto a la recolección, transporte y disposición final de los residuos; en cambio los países desarrollados no poseen esta problemática, ya que utilizan tecnologías de tratamientos que generan subproductos como: biocombustibles, compostaje, electricidad y calefacción (Moya, Aldás, López y Kaparaju, 2017, p.1).

Asimismo, Sharma, Basu, Shetti y Aminabhavi (2020), mencionan que el aumento en la generación de residuos sólidos no es el único problema, sino también el uso de combustible fósiles, ya que generan una gran problemática ambiental debido la emisión descontrolada de Dióxido de carbono - CO₂, que es considerado como un gas de efecto invernadero - GEI, ocasionando el aumento del calentamiento global y cambio climático (p.11).

Cabe recalcar, que las emisiones de gases de efecto invernadero y el calentamiento global son las principales preocupaciones ambientales que han afectado los ciclos geoquímicos normales y las condiciones climáticas de la tierra. Sin embargo, una controlada producción, conversión y utilización de estos gases para la generación de energía en las actividades diarias de los seres humanos puede resolver el problema de manera efectiva. (Kapoor et al. 2020, p.1).

Por otro lado, a partir de la década de 1970, a raíz de la crisis energética surgió una preocupación por los combustibles fósiles, ocasionando que muchos países se interesen en desarrollar nuevas tecnologías de fuentes renovables como la biomasa (Lee et al. 2019, p.1). En la actualidad, encontrar un equilibrio entre la

oferta y demanda energética se ha convertido en un problema cada vez más difícil, donde encontrar nuevas fuentes de energía renovables se ha convertido en una prioridad (Yücenur et al. 2020, p.1).

De acuerdo con ello, Ma, Guo, qin y You Li (2018), consideraron que la digestión anaerobia es una tecnología prometedora para la recuperación de energía de biomasa (p.3)

La digestión anaerobia es considerada como una tecnología limpia y sostenible por el gran potencial que posee para tratar residuos urbanos, agrícolas y provenientes del ganado con la finalidad de producir biogás (Nag et al. 2019, p.1). Asimismo, es un proceso biológico que funciona bajo condiciones anaerobias (ausencia total de oxígeno), donde grupos microbianos descomponen la materia orgánica biodegradable en gases como: metano (50% – 80%) y Dióxido de Carbono (30% - 50%) (Lora et al. 2017, p.1).

Por esa razón, el biogás ha sido reconocido como una fuente de energía renovable y limpia, disponible para mejorar considerablemente el desarrollo socioeconómico, ya que los gases generados presentan múltiples opciones de utilización. (Kapoor et al. 2020, p.1). Yücenur et al. 2020, menciona que el biogás es la fuente energía renovable más importante del mundo, porque genera un gran aporte en la prevención de la contaminación ambiental asegurando el equilibrio ecológico (p.1).

Además, se puede producir a partir de diversas materias primas, todo dependerá de la cantidad y su disponibilidad, desde residuos agrícolas, ganaderos, municipales o urbanos, residuos orgánicos depositados en rellenos sanitarios hasta residuos de queratina (Atelge et al. 2020, p.2).

Por ello, de acuerdo con Moya et al. (2017), en su investigación manifiesta que los residuos sólidos urbanos son un valioso recurso para generar energía renovable, convirtiéndose en una oportunidad mundial para recuperar energía mediante el uso de la tecnología waste to energy, que significa residuos que se convierten en energía (p.8).

Asimismo, Kumar y Samadder (2017) sostiene que el biogás producto de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos es una solución factible que

puede reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, considerándola parte de la mencionada tecnología (p.13).

Lora et al. (2017), menciona que es necesario realizar más investigaciones sobre los pretratamientos para maximizar la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia (p.9).

La evolución de nuevas técnicas de tratamiento publicada en diversas literaturas se incrementa cada día y es necesario reunirla para tener una adecuada visión de las condiciones con mayor disponibilidad, eficiencia y sostenibilidad. Este vacío disminuye las posibilidades del desarrollo en materia biotecnológica y diversidad en la energía renovable o limpia.

La mono-digestión es una solución ambientalmente viable, según Arshad et al. (2021), el biogás es una fuente de energía sostenible que brinda diversas soluciones como: reducción en la dependencia de combustibles fósiles, mitigación al cambio climático debido a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y una adecuada gestión de residuos urbanos, industriales, agrícolas y ganaderos (p.3).

Socialmente, aporta en la mejora de la calidad de vida de las personas, ya que los residuos generados y las aguas residuales se reutilizan para producir biocombustible como lo es el biogás, estas ya no son descargadas a un cuerpo de agua causando la contaminación de esta o los residuos ya no son dispuestos en botaderos causando contaminación al aire por los GEI emitidos y generando malos olores con presencia de vectores.

Asimismo, la presente investigación también se justifica teóricamente, ya que al encontrarse diversas problemáticas como: excesivo uso de combustibles fósiles, altas emisiones de GEI y deficiente gestión de residuos sólidos, permitieron que investigadores a nivel mundial realicen experimentos científicos con la finalidad de brindar soluciones, permitiendo a otros investigadores comprobar, adecuar a su realidad y analizar la información sobre el proceso de mono-digestión anaeróbica para la obtención de biogás como una alternativa sostenible.

Por ello, el presente trabajo se realizó con la finalidad de brindar una síntesis y análisis sobre la producción de biogás mediante la mono-digestión anaerobia,

utilizando sustratos orgánicos como materia prima, a fin de demostrar que es un tratamiento eficaz y una solución que no genera impactos ambientales adversos en la gestión de residuos sólidos y efluentes generados por las actividades antropogénicas.

De acuerdo a todo lo mencionado, el presente estudio planteó como problema general: ¿Cuáles son los avances en la tecnología de mono-digestión anaerobia que usa residuos orgánicos para la producción de biogás?; asimismo, se tienen como problemas específicos:

PE1: ¿Qué tipo de reactores se utilizan en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás?,

PE2: ¿Cuáles son los parámetros críticos de control en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás? Y

PE3: ¿Qué nuevos pretratamientos son aplicados a los sustratos en los procesos de monodigestión anaerobia para la producción de biogás?.

Asimismo, el objetivo general planteado es identificar los avances en la tecnología de mono-digestión anaerobia que usa residuos orgánicos para la producción de biogás, de acuerdo con ello, se tienen como objetivos específicos:

- OE1: Identificar los tipos de reactores que se utilizan en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás.
- OE2: Analizar los parámetros críticos de control en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás.
- OE3: Analizar los pretratamientos aplicados a los sustratos en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás

II. MARCO TEÓRICO

El concepto de digestión anaerobia proviene alrededor del año 1870, gracias a Jean Louis Mouras que desarrolló el sistema de un tanque séptico; sin embargo, fue Louis Pasteur entre los años 1822 y 1895 quien informó que el biogás podría usarse para otros fines tales como: iluminación y calefacción. Cabe recalcar, que el biogás alcanzó un punto de inflexión a causa de la escasez energética de la Segunda Guerra Mundial y a raíz de la crisis del petróleo en 1970. Desde ese entonces hasta la actualidad, la digestión anaerobia es utilizada como una tecnología para el tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos (Lora et al. 2017, p1).

La digestión anaeróbica como su propio nombre lo indica, se desarrolla bajo condiciones anaerobias, quiere decir bajo ausencia total de oxígeno, donde microorganismos descomponen la materia orgánica en gases como: metano, dióxido de carbono, asimismo, el biogás puede utilizarse como una fuente de energía capaz de producir de 5.5 a 7kWh/m³ de biogás (Lora et al. 2017, p.1).

En otras palabras, la digestión anaerobia es donde la materia orgánica se digiere a través de reacciones bioquímicas por medio de bacterias anaerobias (Atelge et al. 2020, p.3).

Asimismo, durante el proceso de digestión anaerobia se puede operar bajo diversas temperaturas, como por ejemplo psicrófila, que operan en un rango de 10°C a 25 °C, mesófilas, donde su rango de operación es de 25°C a 40°C y termófilas, donde la temperatura de operación oscila ente 40°C y 55 °C (FAO, 2019, p. 8).

El biogás es un producto energético renovable que puede ser una solución para cubrir las demandas energéticas y al mismo tiempo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); asimismo, es considerados carbono neutro ya que el carbono del biogás proviene de materia orgánica utilizada como sustrato en el proceso de digestión anaerobia (Awe et al. 2017, p,1).

El biogás puede producirse a partir de cualquier sustrato que contenga polímeros de biomoléculas, especialmente si son carbohidratos. Los sustratos pueden ser residuos agrícolas (residuos de cultivos), residuos de animales (estiércol), residuos de industria alimentaria, biomasa acuática hasta residuos en rellenos sanitarios (Arshad et al. 2021, p.9).

Tabla 1: Composición del biogás

CH4	CO2	H2S	Otros gases	Fuente
50% - 80%	30% - 50%	-	-	Lora et al. 2017, p.1
45% - 70%	25% - 45%	5'000 50'000 ppm	-	FAO (2019, p.23)
50% - 75%	25% - 50%	-	-	Kainthola et al. 2019, p.2

Fuente: Elaboración propia

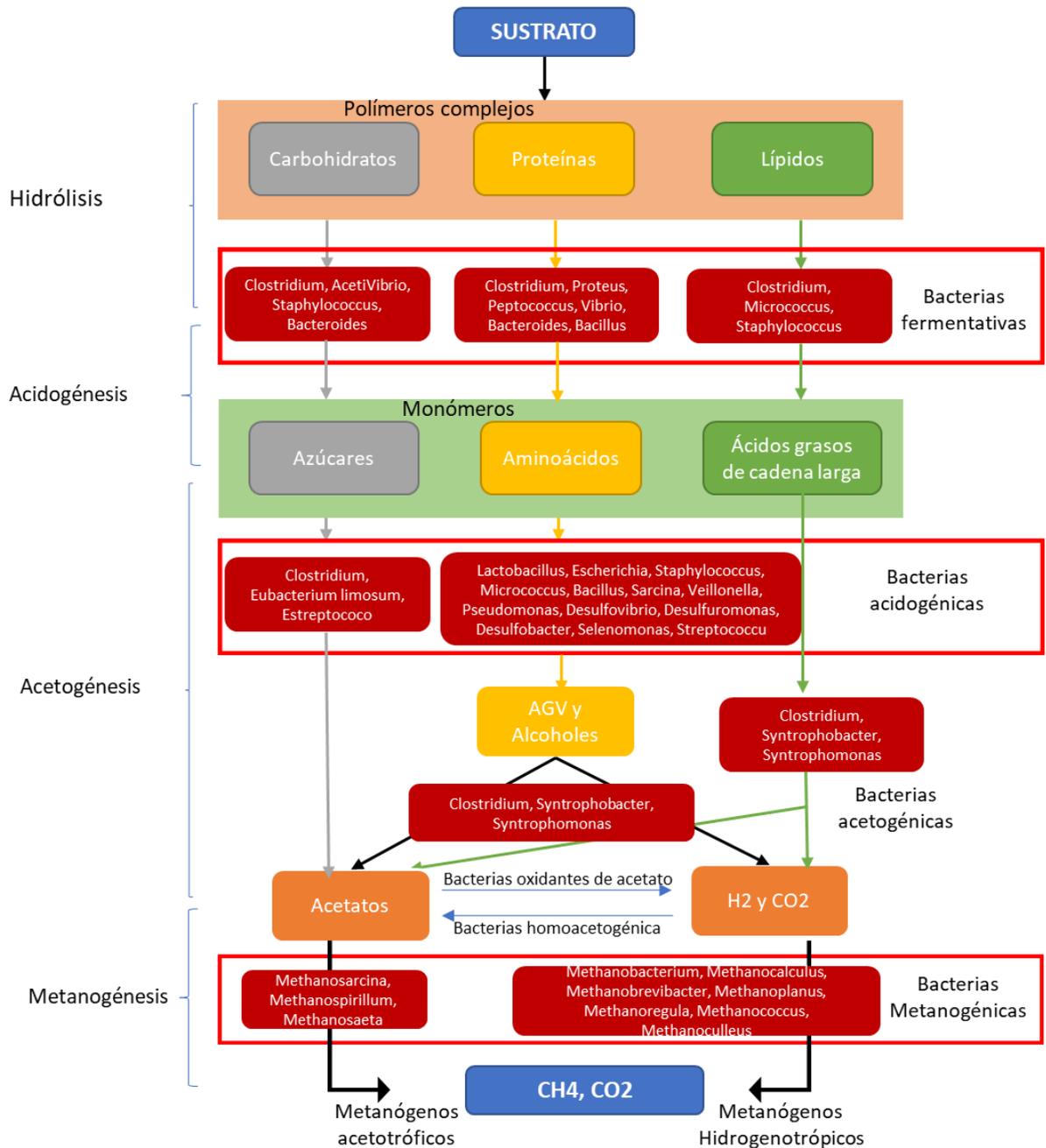
Para la generación de biogás mediante la digestión anaerobia se necesita biotransformar la materia orgánica utilizada como materia prima (sustrato), esto se desarrolla en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Chien Bong et al. 2017, p.7).

Tabla 2: Etapas del proceso de digestión anaerobia

Etapa	Descripción del proceso
Hidrólisis	Polímeros orgánicos complejos como: proteínas, lípidos y carbohidratos se convierten en monómeros disueltos como: ácidos grasos de cadena larga, azúcares y aminoácidos.
Acidogénesis	Mediante los microorganismos acidogénicos, los monómeros se convierten en ácidos grasos volátiles y alcoholes. En esta etapa también se forman hidrógeno y dióxido de carbono.
Acetogénesis	Mediante los microorganismos acetogénicos, los ácidos orgánicos se convierten en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno.
Metanogénesis	Los microorganismos metanogénicos convierten el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono.

Fuente: Elaboración propia adaptado de Rajin, 2018, p.3.

Figura 1: Etapas de la digestión anaerobia

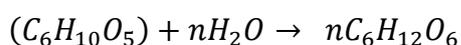


Fuente: Elaboración propia adaptado por Pramanik et al. 2019, p.4

La hidrólisis es la primera etapa de la digestión anaerobia para la obtención de biogás, aquí la materia prima se descompone gracias a las diversas bacterias hidrolíticas que producen enzimas extracelulares o también conocidos como exoenzimas (Patinvoh, Osadolor, Chandolias, Horváth y Taherzadeh, 2017, p.7)

En esta etapa se busca degradar completamente la materia orgánica de los sustratos, que se encuentran presentes como lípidos, carbohidratos y proteínas (polímeros orgánicos), como su propio nombre lo indica, se tienen que hidrolizar para reducir las macromoléculas y transformarlas en compuestos solubles como: aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga (Morales et al. 2018, p.7). En resumen, las materias orgánicas complejas se hidrolizan por los microorganismos fermentativos en monómeros solubles (Darvishi y Hiligsmann, 2018, p.30). Los parámetros más importantes en la hidrólisis son la temperatura, pH, estructura del sustrato y tamaño de la partícula (Morales et al. 2018, p.8)

La reacción química en la etapa hidrolítica es la siguiente:



Fuente: Elaboración propia adaptado por Van et al. 2020, p.2

Continuando con el proceso de digestión anaerobias, las bacterias fermentativas acidogénicas convierten los monómeros solubles de materia prima compleja (producto final de la etapa de hidrólisis) en compuestos orgánicos simples, o sea en ácidos grasos volátiles de cadena corta como: ácido acético, ácido fórmico, ácido butírico, ácido pentanoico; alcoholes como: metanol, etanol y aldehídos como Dióxido de Carbono e Hidrógeno (Gunes et al. 2019, pg.4).

La acidogénesis en la etapa más rápida del proceso de digestión anaerobia, los compuestos neutros como son las proteínas y azúcares se convierten en ácidos grasos volátiles y ácido carbónico, estos son los productos principales de esta etapa. Asimismo, la conversión acidogénica de los aminoácidos son desamonificados por oxidación anaerobia, produciendo ácidos grasos volátiles y dihidrógeno, paralelamente con la desamonificación reductiva de otros aminoácidos donde se consume el dihidrógeno producido (FAO, 2019, p.5).

Sin embargo, en esta etapa el proceso anaerobio se ve limitado si los sustratos no son fácilmente hidrolizables; por ejemplo, los que presentan un alto contenido de celulosa, pectina, proteínas complejas, lípidos y lodos previamente estabilizados (SEMARNAT, 2017, p.31).

Cuando se produce la conversión del material orgánico en ácidos orgánicos el pH disminuye en el proceso de digestión anaerobia, esta condición ácida favorece a

los microorganismos acidogénicos y acetogénicos, que se desarrollan mejor en un pH ligeramente ácido entre 4.5 – 5.5 (Neves et al. 2018, p.5).

Tabla 3: Reacción química de la etapa acidogénica

Tipo de reacción	Ecuación	Descripción
Acidogénesis de la glucosa a acetato	$nC_6H_{12}O_6 \rightarrow 3nCH_3COOH$	Las bacterias acidogénicas descomponen la glucosa en ácido acético.
Acidogénesis de la glucosa a propionato	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COO^- + 2H^+ + 2H_2O$	La glucosa al reaccionar con el hidrógeno forma propionato, hidrógeno y agua.
Acidogénesis de la glucosa a butirato	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3(CH_2)_2COO^- + H^+ + 2CO_2 + 2H_2$	Las bacterias acidogénicas descomponen la glucosa y forman butirato e hidrógeno.
Acidogénesis de la glucosa a etanol	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_2CH_2OH + 2CO_2$	Las bacterias acidogénicas descomponen la glucosa para formar etanol y dióxido de carbono.

Fuente: Elaboración propia adaptado por Van et al. 2020, p.2.

La acetogénesis se basa en la actividad de dos grupos de bacterias acetogénicas: los productores de hidrógeno y los consumidores de este. Los que producen hidrógeno se encargan de convertir los compuestos orgánicos (generados previamente) en acetato, con lo que se liberan hidrógeno y dióxido de carbono; los consumidores de hidrógeno son los encargados de producir acetato a partir del dióxido de carbono e hidrógeno (SEMARNAT, 2017, p.31).

Las bacterias acetogénicas producen ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono a partir de los ácidos grasos volátiles (Darvishi y Hiligsmann, 2018, p.37).

El pH óptimo para una adecuada acción de los microorganismos acetogénicos es alrededor de 6, ligeramente ácido (Neves et al. 2018, p.5).

Tabla 4: Reacción química de la etapa acetogénica

Tipo de reacción	Ecuación	Descripción
Acetogénesis del propionato	$CH_3CH_2COO^- + 2H_2O \rightarrow CH_3COO^- + CO_2 + 3H_2$	El propionato reacciona con las moléculas de agua y forma ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.
Acetogénesis del butirato	$CH_3CH_2CH_2COO^- + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	El butirato en reacciona con las moléculas de agua y forma ácido acético e hidrógeno.
Acetogénesis del etanol	$CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COO^- + H^+ + 2H_2$	El etanol reacciona con las moléculas de agua y forman ácido acético e hidrógeno.
Acetogénesis del dióxido de carbono e hidrógeno	$2CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_3COO^- + 2H_2O$	El dióxido de carbono al reaccionar con el hidrógeno forma ácido acético y agua.

Fuente: Elaboración propia adaptado por Van et al. 2020, p.2-3

La metanogénesis es considerada la etapa más sensible del proceso de digestión anaerobia, ya que poseen un crecimiento muy lento de los microorganismos metanogénicos en el reactor (Darvishi y Hiligsmann, 2018, p.73)

Según Kainthola, Kalamdhad y Goud (2019, p.2) En esta etapa se produce el metano (biogás), y la obtención se da mediante dos grupos metanógenos, uno son las bacterias acetoclásticas, que consumen acetato, y bacterias hidrogenotróficas (metanógenos que reducen el dióxido de carbono). Asimismo, las bacterias metanogénicas son capaces de metabolizar ácido fórmico, ácido acético, metanol, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno a metano (Bajpai, 2017, p.3). Las arqueas metanogénicas reducen el CO₂ utilizando los electrones del hidrógeno y quitan el carbono al acetato con la finalidad de formar metano. En esta etapa la demanda química de oxígeno del afluente se gasifica y abandona el reactor automáticamente (Amy, 2017, p.484)

Asimismo, son muy sensibles y de crecimiento limitado, ya que se inhiben con gran facilidad ante la presencia de oxígeno, sulfuros y ácidos orgánicos. (SEMARNAT, 2017, p.31). El pH óptimo para la presente etapa está dentro del rango de 6.8 a 8.0. (Mirmohamadsadeghi, Karimi, Tabatabaei y Aghbashlo, 2019, p.4).

Por otro lado, Panigrahi y Dubey (2019) mencionan que, si se presenta una alta reacción en esta etapa durante un proceso termófilo, esto podría generar acumulación de ácido propanoico, también conocido como ácido propiónico, lo cual alteraría a los organismos metanógenos y causaría la inhibición de la metanogénesis (p.5). Asimismo, Zhang et al. (2018) mencionan que la tasa de degradación de los ácidos grasos volátiles es lenta a causa de la energía libre de Gibbs positiva, que se considera el paso limitante del proceso de digestión anaerobia (p.5).

Tabla 5: Reacción química de la etapa metanogénica

Tipo de reacción	Ecuación	Descripción
Metanogénesis a partir del ácido acético	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$	El ácido acético se descompone para formar metano y dióxido de carbono.
Metanogénesis a partir del hidrógeno y dióxido de carbono	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	El dióxido de carbono al reaccionar con el hidrógeno forma metano y agua.

Fuente: Elaboración propia adaptado por Van et al. 2020, p.3

De acuerdo con Zhan et al. (2018), la acetogénesis y la metanogénesis deben crear juntas una relación sintrófica equilibrada que proporcione un microambiente termodinámicamente estable para la conversión de los ácidos grasos volátiles, lo cual resultaría un proceso anaerobio estable y eficaz (p.3).

Según Sarker et al. (2019), los parámetros de control influyen en el rendimiento de la digestión anaerobia para maximizar el rendimiento y calidad del biogás. Asimismo, indicó que los parámetros cruciales son: pH, temperatura, tasa de carga orgánica y tiempo de retención hidráulica (p.1).

De acuerdo con Mukumba et al. (2016), Los procesos metabólicos microbiológicos, son provocados por enzimas, y la temperatura es un factor importante, ya que cuando esta no es favorable, las enzimas pueden desnaturalizarse, lo cual dificultaría el proceso de digestión. Asimismo, indicó que la temperatura termofílica es la más eficaz para la digestión anaerobia (p. 2). Asimismo, Kainthola et al. 2019, también mencionó que la temperatura termofílica se encuentra por encima del

rango mesofílico, teniendo en cuenta una degradación más rápida y una mayor tasa de carga orgánica; sin embargo, podría presentar acumulación de ácidos grasos, causante de acidificación que inhibe la producción de biogás (p.6). Sin embargo, se debe tener en cuenta que los metanógenos termofílicos son muy sensibles a los cambios de temperatura (Mirmohamadsadeghi et al. 2019, p.4).

Por otro lado, Tian et al. 2018, en la investigación que desarrolló sostuvo que la actividad metabólica aumentó significativamente cuando la temperatura fue mesofílica, ya que se incrementó de 15°C a 35°C (p.3).

Tabla 6: Rangos de temperatura

Temperatura	Rango de operación
Psicrofílicos	10°C a 25°C
Mesofílicos	25°C a 40°C
Termofílicos	40°C a 55°C

Fuente: Elaboración propia adaptado por FAO, 2019, p.8

Musa et al. 2018. Estudió el desempeño de un reactor UASB a escala de laboratorio que operó bajo condiciones mesófilas (35°C), utilizó aguas residuales de matadero de ganado como sustrato principal, los volúmenes del reactor fueron 8L (total) y 6L (efectivo), se utilizaron 12 tasas de OLR y se evaluó el rendimiento. Durante el estudio se observó que la concentración de ácidos grasos volátiles era baja y que la alcalinidad de las aguas residuales era suficiente para evitar la acidificación, asimismo, se mencionó que sólo bastó 1 día de TRH para poder eliminar gran porcentaje de DQO. En el estudio también se investigaron parámetros como: pH, alcalinidad, sólidos totales suspendidos, aceites y grasas. Se demostró que el reactor UASB es una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales de matadero de ganado y para la producción de metano (párr.1).

Por otro lado, el potencial de hidrógeno (pH) mide la actividad del radical OH en medios acuosos, se trabaja en una escala de 1 a 14. Si el pH es igual a 7, la solución se considera neutra, si es mayor a 7 es considerado ácido y si es menor a 7 la solución es alcalina (Rosato, 2018, p.33). De acuerdo con Mirmohamadsadeghi et al. 2019, si los valores de pH son menores que 6 o mayores que 8.5, la producción de metano se ve afectado (p.4). Por ello, Sarker et al. (2019) afirma que la metanogénesis y la producción óptima de biogás se produce cuando el pH está

alrededor de 7 (p.25). Cabe recalcar que la disminución del pH a causa de los ácidos grasos volátiles depende del sustrato, por ejemplo, el estiércol de ganado tiene una gran capacidad amortiguadora, por ende, puede mantener un pH equilibrado. Sólo se producirá una caída de pH siempre y cuando la concentración de los ácidos grasos volátiles sea muy alta (Kougias y Angelidaki, 2018, p.4)

El tiempo de retención hidráulica, como su propio nombre lo indica, establece el tiempo en el que el sustrato permanecerá en el reactor, siendo la relación entre el volumen del reactor y el caudal de alimentación diario, el parámetro más importante es la temperatura (a mayor temperatura, menor tiempo de retención hidráulica), por ejemplo, los psicorfilicos producirán biogás a partir de 50 a 120 días, los mesofílicos entre 25 a 50 días y los termofílicos de 15 a 25 días (FAO, 2019, p.10)

$$TRH = \frac{\text{Litros del reactor}}{\text{Caudal de alimentación}}$$

Fuente: Elaboración propia adaptado por Morales, 2020, p.5

Asimismo, cabe recalcar que la FAO (2019) indica que para el diseño de un reactor es muy importante conocer el TRH y la tasa de alimentación para determinar el volumen útil de este. (p.10).

Sivaprakasam y Balaji et al. (2021) estudió el impacto de la terapia de reemplazo hormonal en el reactor de película fija de lodo anaerobio de flujo ascendente con aguas residuales de la industria láctea como sustrato, el reactor presentó un volumen de 0.013 m³, opero bajo condiciones mesófilas en diferentes TRH: 30, 24, 18, 12 y 6 horas para concentraciones de DQO de: 8500, 10000, 11500, 13000 y 14500 mg/L y se concluyó que el estudio fue un éxito respecto a los tiempos de TRH sobre el rendimiento del biogás, ya que en todos se obtuvo una buena producción de biogás (párr. 1).

Por otro lado, la tasa de carga orgánica es la cantidad de materia orgánica por unidad de volumen del reactor durante un tiempo determinado, este es el principal factor operativo que altera el equilibrio entre la etapa acigodénica y metanogénica; sin embargo, se debe tener como objetivo principal mantener la tasa orgánica lo más alto posible que pueda sostener el reactor, ya que esto permitirá una producción continua y estable de biogás (Choong, Chou y Norli, 2018, p.7).

Asimismo, Según Kainthola et al. (2019), agregar una alta concentración de sustrato diariamente podría causar una alteración en el ambiente del reactor y podría inhibir temporalmente la actividad microbiana durante las etapas iniciales de fermentación (p.6). Asimismo, Sarker et al. (2019), indicó que valores mayores de OLR produciría una acumulación de ácidos grasos volátiles que desencadenaría un desequilibrio en el crecimiento de las arqueas metanogénicas y velocidad de producción de metano (p. 22).

De acuerdo con ello, Prayitno et al. (2020), asevera que, durante su estudio, las variaciones de carga orgánica causaron diferentes rendimientos al reactor, a tal punto de llegar a afectar la producción del gas metano y composición del biogás (p. 6). Por otro lado, FAO (2019) indica que, si los valores de carga orgánica son bajos, el tiempo de retención hidráulica debería ser mayor (p.10).

Por lo tanto, Prayitno et al. (2020) examinó los efectos de la tasa de carga orgánica con la finalidad de producir metano en un reactor de flujo ascendente UASB utilizando aguas residuales de tofu como sustrato. Así que, se estudiaron diferentes cargas orgánicas: 5, 10, 15 y 20 g y diferentes tiempos de retención: 5, 10, 15, 20 y 25 días. Cabe recalcar que el reactor operó bajo condiciones mesófilas (29-32°C). Finalmente, se llegó a la conclusión de que mientras aumentaba la tasa de carga orgánica el biogás también lo hacía (párr. 1).

De la misma manera, Musa et al. (2018)

Asimismo, los ácidos grasos volátiles son un indicador muy importante para medir el desempeño del reactor, ya que se encuentran directamente relacionados con las variaciones en el pH, alcalinidad y el desarrollo de los organismos metanógenos (Yildirim, Ince, Aydin e I., 2017, p.15). Según Sarker et al. (2019) los ácidos grasos volátiles son necesarios para la producción de metano, sólo que algunos componentes como el propionato son sensibles a ellos (p.25). Asimismo, Altos niveles de ácidos grasos volátiles en el reactor pueden disminuir el pH del proceso cuando el nivel de alcalinidad no es suficiente, lo cual generaría una falla en la digestión anaerobia (Gonzáles, Sánchez y Gómez, 2018, p.2).

De la misma manera, la proporción de nutrientes entre carbono y nitrógeno es la principal fuente de alimentación para las bacterias metanogénicas, ya que el carbono es una fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de células nuevas. Los sustratos con proporciones muy bajas de C: N producen

amonio, que en grandes cantidades inhibe la actividad microbiana al ser un elemento tóxico; por otro lado, una tasa muy alta de C: N donde los niveles de nitrógeno son muy bajos, afectaría la formación de proteínas y esto ralentizaría el proceso para la obtención del biogás (4eChile et al. 2018, p.19) Asimismo, (Morales et al. 2018) Indica que la proporción entre el carbono y nitrógeno es esencial, ya que el carbono funciona como fuente de energía y el nitrógeno como fuente de regeneración y crecimiento celular de los microorganismos, teniendo en cuenta que las bacterias anaeróbicas necesitan un equilibrio entre los nutrientes para alcanzar un crecimiento adecuado (p.10).

Otro parámetro importante son los sólidos totales, ya que se define como el sustrato después de la eliminación de la humedad, quiere decir que es material seco que se obtiene después del secado, también conocido como peso seco (Mukumba et al. 2016, p.2).

Asimismo, la humedad del sustrato no sólo ayuda en el proceso microbiano, sino que también influye en el transporte de masa en un lecho con alto contenido de sólidos y en el equilibrio entre la producción de ácidos grasos volátiles y la conversión de ácidos en metano.

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(W1 - W2)}{(W3 - W2)} \times 1000000$$

Fuente: Elaboración propia adaptado de Mukumba et al. 2016, p.2

W1: Peso del residuo seco y plato.

W2: Peso del plato.

W3: Peso de la muestra húmeda y el plato.

Determinar sólidos volátiles:

$$SV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(W1 - W2)}{(W3 - W2)} \times 1000000$$

Fuente: Elaboración propia adaptado de Mukumba et al. 2016, p.2

W1: Peso del sólido + peso del plato antes de la ignición a 550°C

W2: Peso del sólido + peso del plato después de la ignición a 550°C

W3: Peso del plato vacío.

La alcalinidad mide la capacidad de la solución para neutralizar ácidos durante el proceso de digestión anaerobia (Sarker et al. 2019, p.1).

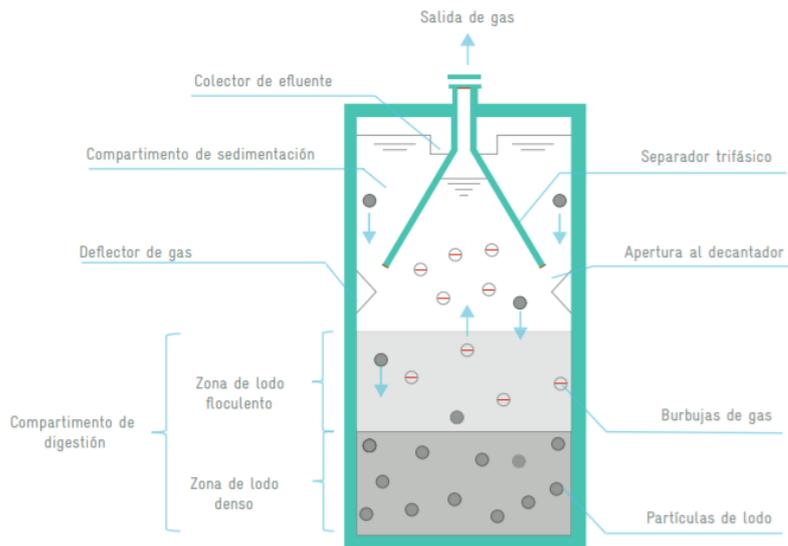
Musa et al. (2019) evaluó la eficiencia del reactor UASB a escala de laboratorio para tratar aguas residuales de matadero de ganado en condiciones mesófilas (35°C). Se trabajaron con 2 reactores, uno convencional y otro modificado, ambos reactores se aclimataron con aguas residuales sintéticas durante 30 días. Los reactores fueron sometidos a diversas tasas de carga orgánica: 1.75, 3, 5, 10, 14 y 16 g/L.d correspondientes a: 3.5, 6, 10, 20, 28 y 32 gDQO/L en un TRH de 24 horas. Así como los parámetros de control son muy importantes para la digestión anaerobia, los reactores a utilizar también lo son, porque de ellos depende la descomposición del sustrato (Sarker, Lamb, Hjelme y Lien, 2019, p.10).

Abd Nasir et al. (2019) evaluó la viabilidad de la producción de biometano termófilo a partir de aguas residuales de palma aceitera acidificada en un reactor ASBR de 5L. Se evaluaron varios TRH en rangos de 10 a 1 día. Durante el experimento se demostró que se puede alcanzar una mayor productividad del metano en un TRH de 2 días, sin embargo, la eliminación de DQO y los ácidos grasos volátiles fueron muy bajos en el TRH mencionado, por lo que fue ineficaz operar bajo esa condición, el TRH recomendado fue de 3 días ya que presentó un alto consumo de AGV y una buena productividad de metano (párr. 1).

Un reactor puede trabajar de manera continua, y como su propio nombre lo indica se puede insertar y extraer la materia prima o producto de manera continua; de otro modo, un reactor también puede trabajar también por lotes (por partes), donde la materia prima o producto se alimenta y recolecta periódicamente (Sarker et al. 2019, p.1). Se demostró que el rendimiento de reactor 1 se redujo drásticamente a un OLR de 10g/L.d y eso afectó a las etapas posteriores del proceso, lo mismo sucedió con el reactor 2 bajo la misma condición de OLR, la única diferencia fue que el porcentaje de eliminación fue elevado (párr.1).

Uno de los principales reactores anaerobios, es el reactor anaerobio de flujo ascendente - UASB es el sistema más aplicado en el tratamiento de aguas residuales, este cuenta con un separador gas/sólido/líquido (Darvishi y Hiligsmann, 2018, p.77).

Figura 2: Sistema del reactor anaerobio UASB



Fuente: SEMARNAT et al 2017, p. 50.

El reactor UASB opera sólo en un tanque, la forma de este puede variar (circular o rectangular), y la materia prima utilizada como sustrato fluye ascendentemente a través de un lecho de lodos activados anaerobios, este ocupa gran parte del volumen de trabajo del reactor, ocupando casi la mitad del reactor con gránulos o flóculos altamente sedimentables (Amy et al. 2017, p. 506).

Las principales ventajas del mencionado reactor es la buena eficiencia de eliminación a bajas temperaturas, requiere un bajo consumo de energía, produce baja cantidad de lodos y conserva en estado óptimo al inóculo a largo plazo (Gunes et al. 2019, p.8).

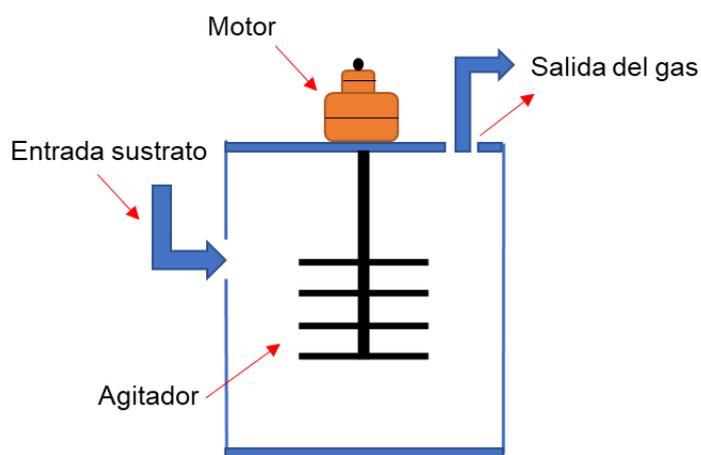
Alcaraz et al. (2020) investigó el rendimiento del reactor UASB a escala piloto operando bajo temperaturas psicrófilas (17-19°C) y utilizando aguas residuales de industria de procesamiento de chocolate con alto DQO soluble y también evaluó el desempeño de dos dispositivos de acondicionamiento térmico (DAT) para la recuperación de bioenergía mediante el uso de biogás in situ. El reactor operó durante 275 días con un tiempo de retención hidráulica de 6.2 horas y diversas tasas de carga orgánica: 10.3 y 7.9 kgDQO/m³. d. Además, el biogás producido se quemó in situ con los dos DAT, que consistió en una cámara de combustión instalada, un intercambiador de calor y un mechero bunsen. Cabe recalcar que la

quemado in situ de biogás aumentó la temperatura del afluente entre 0.5 y 5.8°C que mejoró la producción de biogás en el reactor (párr.1).

Asimismo, Ribeiro et al. (2017) evaluó el desempeño de la digestión anaerobia del hidrolizado de hemicelulosa producido después del pretratamiento hidrotermal del bagazo de caña de azúcar en un reactor UASB operado a un tiempo de retención hidráulica de 18.4 horas y tasas de carga orgánica de 1.2 a 4.8 gDQO/L.d. Se demostró que el aumento en la proporción del sustrato dio como resultado un mejor rendimiento del proceso de digestión (párr.1).

Por otro lado, los reactores discontinuos - ABR utilizan materia prima fresca como sustrato e inóculo, estos se sellan durante el tiempo de retención, de esta manera se asegura el desarrollo de las etapas de digestión anaerobia para la obtención del biogás (Gunes et al. 2019, p.7).

Figura 3: Ilustración de un reactor ABR



Fuente: Elaboración propia adaptado por Hassan et al. 2020, p.3

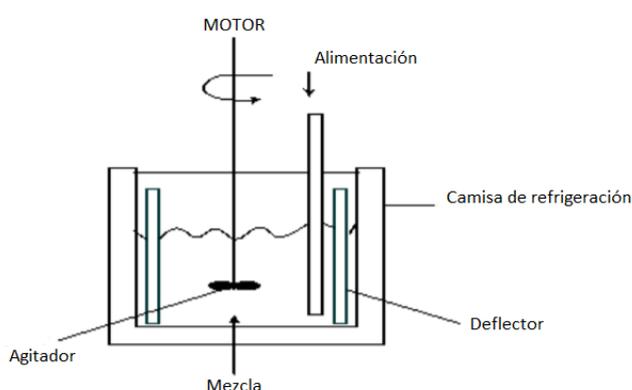
El digester continuo como su propio nombre lo indica opera de manera continua, ya que requiere alimentación del sustrato diariamente (Rosato, 2018, p.46).

De acuerdo con Hassan, Zhao y Ding (2020), la tasa de carga orgánica en este tipo de reactor es un factor muy decisivo para la producción de biogás, ya que, si no es adecuada, la estabilidad de la digestión anaerobia y la generación de metano se vería muy afectado (p.2). Por otro lado, Panigrahi et al. 2019, menciona que, utilizando este reactor en condiciones mesófilas, el pH debería mantenerse entre neutro, o en un rango de 6.5 a 7.5, ya que los microorganismos se desarrollan con

mayor facilidad; sin embargo, bajo condiciones termófilas, el pH óptimo sería ligeramente mayor que en el mesófilo (p.6).

Continuando con los tipos de reactores, según Mühlemeier, Speight y Strong (2018), el reactor anaerobio de tanque agitado continuo – CSTR, es el más común en experimentos a escala de laboratorio y se caracteriza por tener un agitador mecánico y su eje normalmente se hace girar con ayuda de un motor sobre el reactor, generando burbujas dentro del reactor (p.13).

Figura 4: Ilustración del reactor CSTR



Fuente: elaboración propia adaptado por Alshammari et al. 2018, p.5

Hassan et al. (2020) investigó los efectos del pretratamiento de sonicación térmica en la mono-digestión anaerobia del estiércol de ganso en reactores SCTR, se utilizaron diversas tasas de carga orgánica: 1.4, 2.9 y 4.4 gSV/L.d., esto se llevó a cabo en 3 fases. Asimismo, se utilizaron 3 niveles de sonicación: 25, 45, 60, 90 y 120 minutos a 28kHz que se emplearon para optimizar el proceso de digestión anaerobia para mejorar la producción de metano. Se demostró que la segunda fase brindó los resultados óptimos y fue la que presentó mayor capacidad de mejora del metano, tasa de estabilización de DQO y eliminación de sólidos volátiles (párr.1).

Mari et al. 2020, estudió el potencial energético de las aguas residuales de yuca en un Reactor Discontinuo de Secuenciación Anaerobia – ASBR, también investigaron el comportamiento metanogénico en el reactor respecto a la eliminación de materia orgánica y producción de biometano. El reactor operó durante 260 días en un rango de tasas de carga orgánica entre 3.7 y 12 gDQO/L.d, concentraciones del influente: 2.8, 4 y 6 gDQO/L.d y diversos tiempos de ciclo: 6, 8 y 12 horas. Se concluyó en que el reactor ASBR presentó una producción estable de metano durante todo el

tiempo que operó (párr.1). Se demostró que el inóculo tiene una influencia en el periodo de puesta en marcha y en la tasa de producción de biogás (párr.1).

Krishnan et al. (2017), estudió el potencial de producción de metano en un reactor CSTR utilizando estiércol de lechería como inóculo a un pH de 6.8 y Temperatura de 37°C y como sustrato las aguas residuales de palma aceitera (fuente de carbono). Se utilizaron 2 CSTR, en el primero no se añadió el inóculo y en el segundo sí, ambos reactores funcionaron durante 5 días con un TRH de 10 días.

Según Kamyab, Zilouei y Rahmanian (2019) en la mayoría de los estudios, para determinar el crecimiento bacteriano, se utiliza la ecuación de Monod, desarrollada por el microbiólogo del mismo nombre en el año 1940 (p.4).

Además, la ecuación de Monod muestra la relación específica de la tasa de crecimiento (μ) a una concentración limitante del crecimiento del sustrato (S) en solución a granel (Som y Yahya, 2021, p. 6).

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{S}{S + K_s} \right)$$

μ_{max} = Máxima tasa de crecimiento específico.

K_s = Constante de Monod

Fuente: elaboración propia adaptado de Som et al. 2021, p.6

De la misma manera, Faekah, Fatihah y Mohamed (2020) mencionaron que esta ecuación se aplica en sistemas de tratamientos biológicos, donde la tasa de aumento de la biomasa es directamente proporcional a la concentración de biomasa en el reactor anaerobio (p. 3)

$$\frac{1}{U} = \frac{\theta X}{(S_i - S_e)} = \frac{K_s}{K} \times \frac{1}{S_e} + \frac{1}{K}$$

U : Constante de tasa de crecimiento específico.

θ : Tiempo de retención hidráulica (días).

X : Concentración de la biomasa en el reactor (g.SVS/L).

S_i : Influyente de la concentración del sustrato (g/L).

S_e : Efluente de concentración del sustrato (g/L).

K_s : Constante de velocidad media (g/L).

K: Tasa máxima de utilización del sustrato (días).

Fuente: Elaboración propia adaptado por Faekah et al. 2020, p. 3

Por otro lado, las principales razones por las cuales algunas materias primas no son ideales para producir biogás son porque los microorganismos no pueden digerirla, o pueden digerirla, pero todo el proceso se vuelve muy lento y sobre todo la presencia de inhibidores, por ello se utilizan pretratamientos para facilitar el proceso de digestión anaerobia, ayudando a que el contenido orgánico del sustrato sea fácil de digerir y utilizar por la comunidad microbiana (Patinvoh et al. 2017, p.5). El uso de un pretratamiento es esencial ya que mejora la digestibilidad en la producción del biogás, pueden utilizarse juntos o en secuencia, el objetivo es hacer digerible a la materia orgánica para el proceso de digestión anaerobia (Arshad et al. 2021, p.3).

Según Morales et al. (2018), los pretratamientos pueden clasificarse en 4 categorías como: mecánicos o físicos, químicos, térmicos y biológicos. Todos apuntan presentan el mismo objetivo, que es mejorar y facilitar la solubilización del sustrato a través de distintos mecanismos (p.17)

Los Pretratamientos físicos o mecánicos no necesitan agregar otros compuestos como enzimas o soluciones químicas para mejorar el rendimiento de biogás; además, ayuda a que el sustrato aumente en volumen, densidad y porosidad, mejorando la conexión entre el sustrato y los microorganismos durante el proceso de digestión (Atelge et al. 2020, p. 5).

Al afif y Pfeifer (2021) investigó la viabilidad del pretratamiento mecánico aplicado en tallos de algodón con la finalidad de mejorar la producción de metano. Se utilizaron tamaños de partícula que oscilaban entre 0.5 y 65 mm en reactores discontinuos con eudiómetro de 1L durante 48 días a 37°C. Se demostró que el rendimiento del metano es inversamente proporcional al tamaño de las partículas, además, se observaron aumentos significativos en el rendimiento del metano (párr.1).

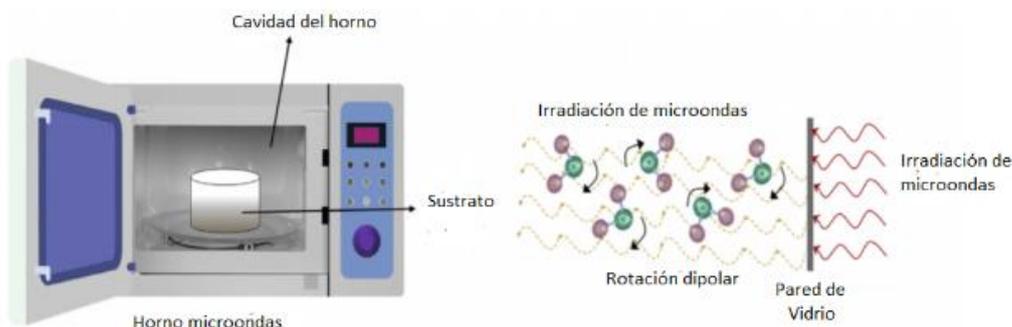
Kang et al (2019) investigó el efecto del tamaño de las partículas sobre el desempeño de la digestión anaerobia de *Pennisetum Híbrido*. El mencionado sustrato fue molido y tamizado para proporcionar diferentes tamaños de partículas entre 0.180 y 1 mm. La caracterización de los diferentes tamaños de partículas demostró que

la composición del contenido de carbohidratos alterados del sustrato molido disminuyó y el contenido de lignina aumentó con la disminución del tamaño. Finalmente se llegó a la conclusión que una reducción excesiva de tamaño no mejoraría el rendimiento del metano, pero igual muestra una eficiencia en la fermentación anaerobia (párr.1).

El ultrasonido como pretratamiento es considerado un proceso ambientalmente amigable por el hecho de mejorar la biodegradabilidad del sustrato en el proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, la energía consumida durante todo el proceso se ha convertido en un problema, ya que el objetivo es generar energía a partir del biogás (Zeynali, Khojastehpour, Ebrahimi-Nik, 2017, p.1).

Las microondas son ondas electromagnéticas que poseen una frecuencia desde 300MHz a 600 GHz que se generan durante el pretratamiento. Un horno microondas produce patrones resonantes con campos eléctricos baja y alta intensidad, generando un aumento de temperatura y esto ocurre cuando el campo eléctrico alterno de microondas tiene la capacidad de alterar la estructura del sustrato (Sharmila et al. 2020, p.4)

Figura 5: Ilustración pretratamiento microondas



Fuente: Sharmila et al. 2020, p.8

Kainthola et al. (2019) estudió el comportamiento recalcitrante de la paja de arroz utilizando la irradiación de microondas como pretratamiento a fin de demostrar que es una fuente de energía renovable. El mencionado pretratamiento se consideró uno de los más efectivos, ya que reaccionan directamente con el sustrato y destruyen su compleja matriz. Asimismo, se estudiaron diferentes tiempos de exposición (2 – 5 minutos) y diversas temperaturas (130 – 230°C). Además, se evaluó el potencial bioquímico de metano con la máxima tasa de solubilización,

gracias a ello, se concluyó que el pretratamiento rompió la estructura lignocelulósica como resultado de la ruptura de superficie cuticular (párr. 1).

El pretratamiento con ácido es la técnica más utilizada y su principal objetivo es romper la matriz lignocelulósica, la ventaja principal es que los compuestos a utilizar son muy comerciales (ácidos orgánicos e inorgánicos), puede ser utilizado a nivel industrial, presente una alta solubilización de hemicelulosa y alto rendimiento de glucosa; sin embargo, una desventaja es que existe un alto costo de recuperación del ácido (Solarte et al. 2019, p.2). De la misma manera, Atelge et al. (2020) indica que se utilizan diversas concentraciones de ácidos y bases para el pretratamiento químico en diferentes condiciones, a fin de mejorar la biodegradabilidad del sustrato, ya que los residuos lignocelulósicos presentan una resistencia en la etapa hidrolítica (p. 11).

Syaichurrozi et al. (2018), estudió el efecto del pretratamiento con ácido sulfúrico respecto al rendimiento de biogás usando *Salvinia Molesta*. Se utilizaron diversas concentraciones de ácido sulfúrico: 2, 4, 6% peso/peso. Asimismo, el pretratamiento se llevó a cabo bajo un sistema discontinuo a temperatura ambiente y una presión de 1 atm durante 2 días. Finalmente, se demostró que el pretratamiento disminuyó el contenido de lignina y aumentó el contenido de extracto libre de nitrógeno (carbohidratos sin fibra). Cabe recalcar que, mientras mayor sea la concentración de ácido sulfúrico, los cambios de los mencionados serán mayores. Se demostró que con el pretratamiento ácido se mejoró el rendimiento del biogás a comparación del sustrato no tratado (párr. 1).

El pretratamiento alcalino es un método adecuado para solubilizar la lignina, y se pueden utilizar diversas soluciones como: can, hidróxido de sodio o amoníaco (Patinvoh et al. 2017, p.22)

Cuando se aplica una solución alcalina a un pH alto, se sugiere ajustar el pH para reducir el pH del proceso de digestión anaerobia después del pretratamiento, ya que podría generar altos costos operativos y problemas ambientales debido a los agentes químicos adicionales (Atelge et al. 2020, p.12).

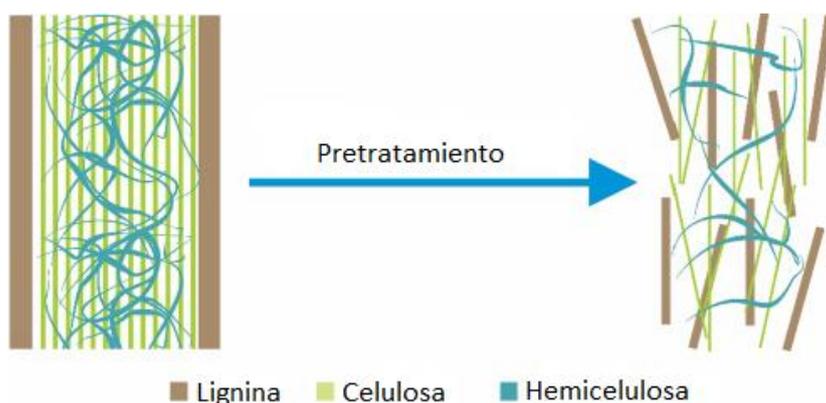
Djaafri et al. (2018), analizó el potencial bioquímico de metano de foliolos secos de palmera datilera argelina pretratado con álcali (*Phoenix Dactylifera L.*) *Hmira Cultivar*. Además, los experimentos se realizaron en 4 digestores a condiciones mesófilas (37°C) durante 50 días. Se utilizaron digestores con capacidad de 1L y

un volumen de trabajo de 60 ml con 10g de sólidos volátiles del sustrato. Se utilizaron diversas concentraciones de NaOH: 6, 12 y 18% peso/peso. Finalmente, se demostró que en base al aumento de las concentraciones de NaOH se mejoraba el rendimiento del metano y la biodegradabilidad, ya que se acortó el tiempo de digestión (párr.1).

La ozonización, como su propio nombre lo indica utiliza el ozono como un agente oxidante que tiene la propiedad de descomponer la lignina sin dañar la celulosa del sustrato (Ab Rasid, Zainol y Saidina, 2020, p.3).

El ozono es uno de los compuestos oxidantes más eficientes, solubles en agua y de fácil disposición y reacciona mejor con la lignina que con los carbohidratos, ya que ayuda en la desestructuración y deslignificación de la biomasa (Travaini et al. 2016, p.1).

Figura 6: Ilustración del pretratamiento de ozonización



Fuente: Atelgue et al. 2020, p.6

La efectividad de la ozonización depende de cómo interactúa el ozono con el sustrato, teniendo en cuenta el diseño del reactor, condiciones del proceso de digestión, flujo de alimentación de ozono (tasa de flujo/consumo de ozono), humedad y tamaño del sustrato (Ab et al. 2020, p.3).

Según Travaini et al. 2016, este pretratamiento ha demostrado gran eficacia en biomasa lignocelulósicas, obteniendo hasta un 80% de deslignificación y una liberación total de azúcares de hasta 75% con un porcentaje bajo de pérdida de carbohidratos. Grandes resultados se obtuvieron utilizando este pretratamiento con reactores de lecho fijo (p.10).

Tanikkul, Boonyawanicj y Pisutpaisal (2019) se evaluó la producción de metano a partir de efluentes de palma aceitera pretratados con ozono bajo condiciones mesófilas (37°C) en concentraciones de 3000 – 15000 mgDQO/L . Se demostró que el rendimiento del metano aumentó cuando la concentración del sustrato también lo hizo. Asimismo, se mencionó que existió una acumulación de ácidos grasos volátiles en el reactor que provocó una caída de la producción de metano. Finalmente, se concluyó que el pretratamiento de ozonización mejoró la biodegradabilidad de la materia orgánica compleja y el rendimiento del metano (párr.1).

Por otro lado, Koupaie et al. (2018), mencionó que el pretratamiento enzimático podría mejorar el rendimiento del metano en más del 100%, sin embargo, manifiesta que la eficacia del pretratamiento depende de muchos factores, el principal es la temperatura (p.5). Sin embargo, Panigrahi et al. 2019, menciona que la inversión para pretratar con enzimas es muy alta y por eso el uso en residuos sólidos orgánicos es muy limitado (p.10).

Por ello, Kucuker, Demirel y Onay (2020) investigaron el proceso de digestión anaerobia en un reactor discontinuo a escala de laboratorio utilizando estiércol de pollo, que pasó por un tratamiento biológico. El objetivo principal fue mejorar la degradabilidad biológica del mono sustrato con la finalidad de obtener mayores rendimientos de biogás y metano mediante la aplicación del pretratamiento enzimático. Los resultados indicaron que la aplicación del mencionado pretratamiento aumentó significativamente la producción del biogás (párr. 1).

Finalmente, Banu et al. (2017), manifiesta que unir diversos pretratamientos, resaltando que todos tienen la capacidad de aumentar la producción de metano y mejorando su calidad (p.18).

Tulun y Bilgin (2018) evaluaron la digestión anaerobia utilizando diversos pretratamientos en residuos de orujo de manzana con la finalidad de producir metano. Se utilizaron los siguientes tratamientos: ultrasonido (34 y 53 kHz) y termoquímico (pH 5 y 10). Para cada pretratamiento se utilizaron diferentes temperaturas: 24, 40, 50 y 60°C), con distintos tiempos de operación: 5, 15, 30 y 45 minutos. Además, se investigaron los cambios en las concentraciones de proteínas solubles de los sustratos pretratados (párr.1).

Por otro lado, Solé-Bundó estudió el efecto del pretratamiento termoquímico con cal (CaO) sobre la mono-digestión anaerobia de microalgas. El pretratamiento se realizó mediante la adición de diferentes dosis de CaO al 4 y 10% a diferentes temperaturas: 25, 55 y 72°C, el tiempo de exposición fue de 4 días para pretratamientos a 25°C y para tratamientos a 55 y 72°C fue de 24 horas. La prueba de potencial bioquímico de metano se realizó con el sustrato pretratado y el que no lo fue. Finalmente, se demostró que el pretratamiento mejoró la solubilización de proteínas y carbohidratos con la mayor dosis de CaO y cumple con mejorar la digestión anaerobia para la obtención de metano (párr.1).

III. MÉTODO

3.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación es aplicada, Según Hernández, Fernández y Baptista (2014) tiene como propósito fundamental generar conocimiento, teorías y sobre todo la capacidad de resolver problemas (p.25).

Esta investigación se caracteriza por haber realizado una revisión y síntesis sobre la mono-digestión anaerobia, ya que se analizó información sobre nuevas tecnologías aplicadas durante todo el mencionado proceso, desde los pretratamientos aplicados a diversos tipos de sustratos hasta la eficiencia de cada tipo de reactor y el control de los parámetros más críticos durante la metanización, a fin de obtener una buena calidad de biogás, esto ayuda como base para el desarrollo de estudios sobre producción de biogás mediante la digestión anaerobia. Por otro lado, la Resolución de Presidencia N°215-2018-CONCYTEC-P, mediante el “Reglamento de Calificación, Clasificación y Registro de los Investigadores del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnologías e Innovación Tecnológica – SINACYT”, definió que la investigación aplicada tiene como objetivo determinar por medio del conocimiento científico, los medios (tecnologías, metodologías y conocimientos) donde se pueda cubrir una necesidad determinada y específica.

El diseño de la investigación es cualitativo, debido a que es un método que se utiliza para recopilar detalles a profundidad sobre un tema en específico o un tema en particular (Rahi, 2020, p.2).

Por lo tanto, una investigación cualitativa tiene como objetivo recolectar datos, analizarlos y comprenderlos; y de esta manera poder responder las preguntas de investigación planteadas (Hernández et al. 2014, p.430).

Teniendo en cuenta lo mencionado, en el presente estudio se utilizaron tablas de Excel para la recolección y extracción de información de los artículos científicos sobre los tipos de sustratos, parámetros fisicoquímicos adecuados y pretratamientos utilizados en la mono-digestión anaerobia para la obtención de biogás a partir de residuos orgánicos.

Asimismo, es de enfoque cualitativo narrativo de tópicos, ya que como herramienta principal se utiliza la recolección de datos, permitiéndole al investigador realizar un

análisis y síntesis de lo compilado, con la finalidad de darle soporte verás a los planteamientos de la investigación (Hernández et al. 2014, p.520).

Por lo tanto, se realizó la recolección y síntesis de información recopilada de artículos científicos en una matriz Excel, que fue separada por subcategorías como: características del reactor, sustrato, tipo de pretratamiento y producción de biogás.

3.2 Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística

El objetivo general es conocer los avances en la tecnología de mono-digestión anaerobia que usa residuos orgánicos para la producción de biogás.

Tabla 7: Categorías y Subcategorías

Objetivos Específicos	Problemas Específicos	Categoría	Subcategoría	Fuente
Identificar los tipos de reactores en los procesos de mono-digestión anaeróbica utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás	¿Qué tipo de reactores se utilizan en los procesos de mono-digestión anaeróbica utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás?	Tipos de reactores	1. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente - UASB 2. Reactor de tanque agitado continuo - CSTR 3. Reactor anaerobio de lotes secuenciales o continuo - ASBR 4. Reactor Anaerobio Discontinuo o Secuencial - ABR	Gunes et al., 2019 Valijanian et al., 2018 Mari, A., et al. 2020 Abd Nasir, M., et al. 2019 Mahdy, A., et al. 2020 Hassan, M., et al. 2020 Alcaraz, S., et al. 2020 Tanikkul, P., et al. 2019 Ghimire, N., et al. 2021
Analizar los parámetros críticos de control en los procesos de monodigestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás	¿Cuáles son los parámetros críticos de control en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás?	Parámetros de control	Temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica (TRH), tasa de carga orgánica, Demanda química de oxígeno.	Mari, A., et al. 2020 Musa, M., et al. 2019 Krishnan, S., et al. 2017 Prayitno, P., et al. 2020 Musa, M., et al. 2018 Abd Nasir, M., et al. 2019 Ribeiro, F., et al. 2017 Mahdy, A., et al. 2020
Analizar los pretratamientos aplicados a los sustratos en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás	¿Qué nuevos pretratamientos son aplicados a los sustratos en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás?	Tipos de Pretratamientos	1. Químicos 2. Mecánicos 3. Biológicos 4. Térmicos	Gunes et al., 2019 Atelge et al., 2020 Morales et al. 2018 Kang et al. 2019 Al et al. 2021 Zhao et al. 2017 Kainthola et al. 2020 Djaafri, et al. 2020 Syaichurrozi, et al. 2019 Kucuker, et al. 2020 Tulun, et al. 2018

Fuente: Elaboración propia

3.3 Escenario de estudio

Al ser una revisión sistemática, donde se realizó recolección, análisis y síntesis de datos, la presente investigación no cuenta con un escenario físico que delimite la zona de estudio; sin embargo, se consideró como escenario de estudio la biblioteca virtual de la Universidad Cesar Vallejo y páginas de revistas indexadas.

3.4 Participantes

La presente investigación al ser una revisión sistemática tuvo como fuentes de información artículos de revistas indexadas, capítulos de libros, informes técnicos de gobierno a nivel nacional y páginas web institucionales; los datos extraídos provienen de las siguientes fuentes: Science Direct, El Sevier, Springer, Google Scholar y Sage Journals.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica aplicada en la presente investigación fue el análisis documental, ya que permite realizar una síntesis y análisis crítico de la información recopilada, permitiéndote estructurar y fundamentar tu investigación, plasmándola desde otro punto de vista (diferente a la original), relacionándose en un contexto específico (Gamboa, 2016, p.21).

Asimismo, la recolección de datos se realizó mediante tablas de Excel plasmando los datos más relevantes de cada artículo científico analizado.

3.6 Procedimientos

El presente trabajo de investigación se divide en tres etapas. La primera etapa consistió en la búsqueda de literatura; la indagación de los artículos científicos se realizó con palabras claves en el idioma inglés tales como: “anaerobic digestion”, “biogas production”, “biogas reactors”, “waste to energy”, methane gas generation”, Biomass conversion technologies”, “biogas potential” “Methanation”, “Biomass gasification”.

Los criterios de búsqueda de la información incluyeron solamente artículos científicos de los años 2016 al 2021, donde no se consideró literatura mayor a 5 años.

Las plataformas de búsqueda utilizadas fueron: Science Direct, Springer, Google Scholar y Scopus.

La tercera etapa consistió en ordenar, estructurar, analizar y seleccionar la información relevante y de esa manera poder plasmar en la presente investigación de acuerdo con nuestros objetivos planteados. A continuación, se una tabla con los criterios de búsqueda utilizados en la presente investigación

Tabla 8: Resumen de criterios de búsqueda

Tipo de documento	Documentos referidos a	Cantidad	Palabras clave de búsqueda	Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículo científico	Digestión anaerobia, producción de biogás, reactores anaerobios y pretratamientos en digestión anaerobia	100	“Anaerobic digestion”, “Anaerobic monodigestion”, “Biogas production”, “AD technologies”, “AD pretreatments”, “UASB reactor”, “CSTR reactor”, “ASBR reactor”, “ABR reactor”,	Últimos 5 años. Información relevante - Metodología de investigación	Mayor a 5 años de antigüedad Falta de información Resultados distintos
Libros y manuales	Obtención de biogás, parámetros de control en DA y reactores en DA.	3	“Biogas” “Guía de biogás”	-Información relevante -Últimos 5 años	Mayor a 5 años de antigüedad

Fuente: Elaboración propia

3.7 Rigor científico

Según Treharne y Riggs (2015), mencionó que la calidad de una investigación cualitativa se basa en los siguientes criterios: credibilidad, confiabilidad, autenticidad, confirmabilidad y transferibilidad (p.2).

Asimismo, Nicholls (2017) mencionó que una investigación cualitativa debe ser creíble, quiere decir que, la evidencia debe estar basada en un buen argumento, demostrar que los resultados no fueron inventados y las ideas que surgen se deben ser transferibles para otros investigadores o interesados en el tema (p.6). Cabe recalcar que la presente investigación cumple con este criterio, ya que la información analizada se ha obtenido de fuentes confiables como: Scienedirect, Springer, Google Scholar, Scopus y MDPI.

Además, Rojas y Osorio (2019) mencionaron que la transferibilidad busca que la investigación realizada se utilice para ampliar los resultados del estudio de otros investigadores. Bajo esta premisa, al investigar sobre la mono-digestión anaerobia en residuos orgánicos para la producción de biogás se buscó analizar el planteamiento del problema y hallazgos de cada autor, con la finalidad de recolectar y analizar esos datos para aplicarse en esta investigación.

Finalmente, Nichols et al. (2017) indicó que, para cumplir con la confirmabilidad se debe evidenciar que los resultados obtenidos provengan de información confiable y verídica (se encuentre en los textos) mas no de una recopilación selectiva del investigador, lo cual debe existir un rastro y evidencia transparente (p.7). Y en el presente trabajo se han respetado las investigaciones de todos los autores seleccionados para el análisis de información, todos se encuentran debidamente citados.

3.8 Método de análisis de información

Los datos sintetizados y analizados se realizaron a través de una matriz de categorización apriorística que consta de tres (03) categorías.

La primera categoría se basa en identificar los tipos de reactores en los procesos de mono-digestión anaerobia, los cuales son: Reactor discontinuo de Secuenciación Anaerobia – ASBR, Reactor Anaerobio de Tanque Agitado Continuo – CSTR, Reactor Anaerobio Discontinuo (ABR) y Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente – UASB.

La segunda categoría consideró los principales parámetros críticos de control durante el proceso de mono-digestión, se identificaron los siguientes: temperatura,

potencial de hidrógeno, tasa de carga orgánica y tiempo de retención hidráulica, todos estos considerando residuos sólidos orgánicos como sustrato.

La tercera categoría analizó los pretratamientos a los sustratos previo al proceso de mono-digestión anaerobia, los cuales fueron: molienda, microondas, alcalino, ácido, ozonización, enzimático, hidrotermal, ultrasonido y termoquímico. cabe recalcar que, las búsquedas para la recolección de información se realizaron con palabras claves en inglés.

3.9 Aspectos éticos

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado referenciando a todos los autores de los artículos científicos y libros, respetando los derechos de autor, siguiendo los lineamientos de la Norma Internacional de Estandarización ISO 690:2010.

Asimismo, de acuerdo con la Resolución del Consejo Universitario N° 0126-2017/UCV, "Código de Ética en Investigación de la Universidad Cesar Vallejo", se cumplió con los principios generales establecidos en la mencionada, tales como: honestidad, rigor científico y responsabilidad.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados obtenidos se desarrollaron de acuerdo con los objetivos planteados en la presente investigación.

De acuerdo con lo mencionado, se describieron las siguientes categorías: tipo de reactores utilizados durante el proceso de digestión anaerobia, parámetros críticos de control para alcanzar una eficiencia en la producción de biogás y pretratamientos aplicados a los sustratos (residuos orgánicos) para mejorar la calidad de este y obtener una buena calidad de biogás.

Resultados objetivo 1: Tipos de reactores

Tabla 9: Tipos de reactores utilizados en la mono-digestión anaerobia para la producción de biogás

INVESTIGACIÓN	TIPO DE REACTOR	SUSTRATO E INÓCULO	METODOLOGÍA	RESULTADOS	REFERENCIA
Producción de biohidrógeno y biometano a partir de Aguas residuales de yuca en un reactor de biopelículas discontinuas de secuenciación anaeróbica de dos etapas	Reactor Discontinuo de Secuenciación Anaerobia - ASBR	S: Aguas residuales de yuca. I: Lodo anaerobio.	Tiempo de operación: 260 días. Volumen total: 3.6 L. Volumen de trabajo: 3.2 L. Temperatura operativa: Mesófila (30 °C ± 1 °C). Temperatura TRH: 6 hrs. OLR: 12 g/L.d.	CH4: >78 % Rendimiento Máx. Biogás: 2.71 LCH4/L.d	MARI, A., et al. 2020
El uso de efluente de palma aceitera acidificados para la producción de biometano termófilo mediante el cambio del tiempo de retención hidráulica en el reactor discontinuo de secuenciación anaeróbica.	Reactor Discontinuo de Secuenciación Anaerobia - ASBR	S: Aguas residuales de palma aceitera. I: Lodos de aguas residuales de palma aceitera.	Tiempo de operación: 24 días. Volumen total: 5 L. Volumen de trabajo: 4 L. Temperatura operativa: Termófila (55°C). TRH: 3 días. OLR: 21.41 gDQO/L.d. AGV: 7.8 ± 1.32 g/L. DQO: 63.6 ± 6.5 g/L pH: 5.23 ± 0.18.	CH4: 79.30 ± 2.33 % Tasa Máx. de Producción CH4: 3.96 LCH4/L.d Rendimiento del CH4: 260.3 LCH4/KgDQOremovido DQOremovido: 71.17 ± 4.01 % STSremovido: 52.02 ± 6.87 % pH: 7.78 ± 0.50 AGV: 80.88 ± 6.32 %	ABD NASIR, M., et al. 2019

Supere la inhibición de la digestión anaeróbica del estiércol de pollo en condiciones de estrés por amoníaco al reducir la tasa de carga orgánica	Reactor Anaerobio de Tanque Agitado Continuo - CSTR	S: Estiércol de pollo I: Estiércol de pollo tratado en un reactor CSTR	Volumen total: 16 L. Volumen de trabajo: 12 L. Temperatura operativa: Mesófila (37°C) TRH: 40 días. OLR: 2.5 gST/L.d Velocidad de agitación: 100 rpm. Tiempo de alimentación: 1 vez al día.	CH4: 63 ± 2% CO2: 37 ± 2% Rendimiento CH4: 354.6 ± 26 mL/gSV Producción de biogás: 1.1 ± 0.1 L/L.d DQOs: 5 ± 1.2 g/L	MAHDY, A., et al. 2020
Eficiencia mejorada en la generación de metano y biodegradación del estiércol de ganso mediante el pretratamiento de sonicación térmica y la gestión de carga orgánica en CSTR	Reactor Anaerobio de Tanque Agitado Continuo - CSTR	S: Estiércol de ganso I: Lodos activados	Tiempo de operación: 60 días. Volumen de trabajo: 10 L. Temperatura operativa: Mesófila. TRH: 10 días. OLR: 2.9 gSV/L.d. Velocidad de agitación: 150 rpm	Producción promedio de CH4: 282. ml/gSV DQOsremovido: 44-47% Svremovido: 60-66%	HASSAN, M., et al. 2020
Tratamiento de aguas residuales de la industria de procesamiento tardío de chocolate en un UASB a escala piloto de baja temperatura: Rendimiento del reactor y uso de biogás in situ para la recuperación de bioenergía	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente - UASB	S: Aguas residuales chocolate	Tiempo de operación: 275 días. Volumen total: 244 L. Material: Fibra de vidrio. Temperatura operativa: psicrófilas (18.5 ± 2.9 °C). TRH: 6.2 ± 0.3 horas. OLR: 7.9 ± 2.2 mg/L pH afluente: 6.7 ± 0.2 AGV: 220.9 ± 125.5 mg/L ac. Acético. Velocidad de flujo ascendente: 0.4 ± 0.1 m/h.	Producción de biogás: 432.3 ± 137.6 L/d Contenido de CH4: 83 - 85%	ALCARAZ, S., et al. 2020
Efecto de la carga orgánica en la producción de metano biogás a partir del tratamiento de aguas residuales de tofu por el reactor UASB	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente - UASB	S: Aguas residuales de tofu.	Tiempo de operación: 25 días. Volumen total: 20 L. Material: PVC. Temperatura operativa: mesófilas (29 - 32°C). TRH: 10 días. OLR: 25 g.	CH4: 85 % CO2: 14.5 % CO: 0.5 % Rendimiento Máx. Biogás: 0.494 L	PRAYITNO, P., et al. 2020

Digestión anaeróbica del hidrolizado de hemicelulosa producido después del pretratamiento hidrotermal del bagazo de caña de azúcar en el reactor UASB	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente - UASB	S: Bagazo de caña de azúcar. I: Lodo granular	El experimento se inició con una DQO de 88.16 ±3.88 g/L Tiempo de operación: 168 días. Volumen de trabajo: 2.3 L. Temperatura operativa: 20°C-30°C. TRH: 18.4 horas. OLR: 2.4g DQO/L.d. DQO: 88.16 ±3.88 g/L pH: Neutro (se neutralizó con 1.5 mol/L NaHCO ₃ o 1.5mol/L de HCl).	Rendimiento del CH₄: 269.96 LCH ₄ /kgDQO DQO removido: 85.7 % ± 3.1% DQO final: 0.26 ± 0.05 g/L pH: 7.2 ± 0.3	RIBEIRO, F., et al. 2017
Producción de metano a partir de efluentes de palma aceitera ozonizados	Reactor Anaerobio Discontinuo - ABR	S: Aguas residuales de palma aceitera. I: Lodos de reactor anaerobio UASB (procesaba jugo).	Tiempo de operación: 120 horas Volumen total: 500 ml Temperatura operativa: mesófila (37°C). pH: Neutro (neutralizado con 6M de NaOH o H ₃ PO ₄). OLR: 15000 mdDQO/l Pretratamiento: ozonización	Tasa Máx. de Producción CH₄: 273.8ml/gDQOremovido	TANIKKUL, P., et al. 2019
Digestión anaeróbica mesofílica de biomasa lignocelulósica pretratada hidrotermalmente (abeto de Noruega (Picea abies))	ABR - Reactor Anaerobio Discontinuo	S: Astilla de abeto. I: Lodo granular.	Tiempo de operación: 103 días Volumen de trabajo: 100 ml. Temperatura operativa: mesófilo. TRH: OLR: 20 gDQOt/L. Pretratamiento: hidrotermal pH 140°C: 6.1 pH 170°C: 5.9 DQOs: 20000 mg/L.	Producción Máx de CH₄: H140°C: 210 mL/gDQO (N) H170°C: 148 mL/gDQO (N)	GHIMIRE, N., et al. 2021

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la información analizada en el presente estudio, los resultados obtenidos sobre los tipos de reactores fueron los siguientes:

Mari et al. (2020) investigó el potencial energético de las aguas residuales de la yuca en un reactor anaerobio discontinuo secuencial – ASBR, con una capacidad de 3.6L y un volumen efectivo de 3.2L. Asimismo, la agitación se realizó mediante la recirculación del sustrato, por lo cual se utilizó un tanque con las mismas características del reactor y una bomba peristáltica con un caudal de 25 L/h. Por otro lado, para la alimentación del reactor se utilizaron bombas dosificadoras peristálticas con un caudal de 10L/h y el proceso se llevó a cabo durante 260 días bajo condiciones mesófilas (30°C), con una tasa de carga orgánica en aumento de 3.7 a 12 gDQO/L.d y diversos tiempos de ciclo: 6, 8 y 12 horas. Bajo esta premisa, la mejor producción de metano se obtuvo con una tasa de carga orgánica de 12 gDQO/L.d y un TRH de 6 horas, produciendo valores mayores al 78% y 2.71 LCH₄/L.d de metano(p.7). Por otro lado, Abd Nasir et al. (2019) también estudió el mismo reactor para producir metano y utilizó aguas residuales de palma aceitera como sustrato; con la diferencia de que el reactor operó bajo condiciones termófilas (55°C) con un volumen total de 5L y volumen de trabajo de 4L. Además, se utilizaron 6 tasas de carga orgánica entre 5.17 a 67.43 gDQO/L.d y 6 valores distintos de TRH entre 1 a 10 días. En este escenario, el mejor valor de metano fue obtenido con una tasa de carga orgánica de 21.41 gDQO/L.d y un TRH de 3 días, produciendo 3.96 LCH₄/L.d a una concentración de 79% de CH₄ (p.8). De manera que, al comparar ambos resultados se puede determinar que el incremento de la temperatura a 55°C mejoró las condiciones del proceso con un menor valor de tiempo de retención hidráulica, lo cual mejoró significativamente el rendimiento del reactor ASBR durante la mono-digestión anaerobia para la producción de metano. Por lo tanto, contrastando con el marco teórico, se puede afirmar que los microorganismos se desarrollan mejor en temperaturas termófilas.

Mahdy et al. (2020), para producir biogás, utilizó el reactor anaerobio de tanque agitado continuo - CSTR con un volumen total de 16 L (volumen efectivo de 12 L) y utilizó estiércol de pollo como sustrato. Asimismo, el estudio se llevó a cabo bajo condiciones mesófilas (37°C) y se utilizaron 3 reactores CSTR para tratar el sustrato en paralelo. Además, se usaron distintos tiempos de retención hidráulica: 20, 40 y

60 días, y diferentes cargas orgánicas: 5, 2.5 y 1.5 gST/L.d respectivamente. Por otro lado, la alimentación al reactor se realizaba una vez al día y la continuidad de la mezcla se aseguró con ayuda de un agitador mecánico a 100 rpm. De acuerdo a lo mencionado, el mejor resultado que se obtuvo fue con el reactor que utilizó una tasa de carga orgánica de 2.5 gST/L.d y un TRH de 40 días y produjo 354.6 ml/gSV de metano, con una composición de 63% de CH₄ y 37% de CO₂ (p.18). De la misma manera, Hassan et al. (2020), estudió la producción de metano utilizando estiércol de ganso como sustrato en un reactor anaerobio de tanque agitado continuo, el CSTR operó durante 60 días con un volumen de 10L bajo condiciones mesófilas, además en la cabeza del reactor se instaló un motor eléctrico y a la vez se colocó una caja de engranajes con motor para generar diversas velocidades de agitación a una velocidad de 150 rpm y con una frecuencia de 5 min cada hora. Además, se utilizaron 3 tasas de carga orgánica: 1.4, 2.9 y 4.4 gSV/L.d a un TRH de 10 días. Bajo estas condiciones, el resultado más óptimo se obtuvo con una tasa de carga orgánica de 2.9 gSV/L.d y produjo en promedio 282 ml/gSV de metano (p.9). De la misma manera, teniendo en cuenta que las tasas de carga orgánica son muy similares en ambos estudios (diferencia de 0.4 g/L.d) se puede aseverar que con un menor tiempo de retención hidráulica se optimiza el funcionamiento del reactor CSTR y la producción de metano, entre ambos estudios, la diferencia en la producción del CH₄ fue 72.6 ml/gSV (21.4%).

Alcaraz et al. (2020) investigó el rendimiento del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) en condiciones psicrófilas (17 – 19°C) utilizando aguas residuales de una industria de procesamiento de chocolate como sustrato. Asimismo, el reactor tenía un volumen de 244 L y operó durante 275 días con un TRH de 6.2 horas, una carga orgánica total de 10.3 kgDQOT/m³ y se utilizó una bomba de diafragma para mantener un caudal constante de alimentación de 0.66 L/min. De acuerdo con lo mencionado, se obtuvo una producción de biogás de 432.3 L/d y una concentración de metano entre 83 y 85% (p.4). Por otro lado, Prayitno et al. (2020) estudió el efecto de diversas cargas orgánicas durante el proceso de mono-digestión anaerobia para la producción de metano utilizando aguas residuales de tofu como sustrato en un reactor UASB. Dicho reactor tenía una capacidad líquida operativa de 20L y operó bajo condiciones mesófilas (29 a 32°C) con una velocidad de agitación de 3 rpm. Asimismo, se utilizaron diferentes

cargas orgánicas: 5, 20, 15 y 20 g. Finalmente, el mejor valor durante producción de biogás se obtuvo con una carga orgánica de 25g y un TRH de 10 días, ya que produjo 0.494 L de biogás con una concentración de 85% de CH₄, 14.5% de CO₂ y 0.5% de CO (p.6). Por otra parte, Ribeiro et al. (2017) evaluó la mono-digestión anaerobia y el desempeño del reactor UASB utilizando bagazo de caña de azúcar (hidrolizado de hemicelulosa) como sustrato. Dicho reactor fue construido en escala de laboratorio con 2.3 L de volumen útil, un TRH de 18.4 horas y diferentes cargas orgánicas entre 1.2 a 2.4 g.DQO/L.d, y operó ed condiciones psicrófilas y mesófilas (20 a 30°C). Cabe resaltar que, el reactor era alimentado de manera continua a 0.125 L/h con un pH neutro, ya que se utilizó 1.5 mol/L de NaHCO₃ o 1.5 mol/L de HCL. De acuerdo a lo descrito, el valor óptimo se obtuvo con una tasa de carga orgánica de 2.4 g.DQO/L.d, ya que produjo 269.96 LCH₄/kg.DQO de metano (p.5).

Guimire, Bakke y Bergland (2020), trabajaron con un reactor discontinuo - ABR para la obtención de biogás a partir de astillas de madera de abeto como sustrato y lodo granular como inóculo. Cabe recalcar que el sustrato fue pretratado hidrotermalmente a dos temperaturas (140 y 170°C) y se redujeron los tamaños a 13 y 5 mm. Asimismo, el proceso de mono-digestión anaerobia se realizó durante 103 días bajo condiciones mesófilas a escala de laboratorio, se utilizaron jeringas médicas de 100 ml como reactores discontinuos y una carga orgánica de 20 gDQO/L. Finalmente, se obtuvieron 2 resultados respecto a la producción de metano, ya que el sustrato fue previamente tratado antes del proceso de mono-digestión. Por ello, con el sustrato pretratado a 140°C se obtuvo 210 ml/gDQO (bajo condiciones normales-N: Temperatura 0°C, Presión atmosférica cota 0 de 760 mm Hg y humedad relativa del aire del 0%), un valor mayor que con el sustrato pretratado a 170°C, que produjo 148 ml/gDQO (N). (p.10). Se puede observar que existe una diferencia de 29.5% entre la producción de metano de ambos sustratos pretratados a dos distintas temperaturas.

Por otro lado, Tanikkul et al. (2019) trabajó con un reactor anaerobio discontinuo a escala de laboratorio y utilizó aguas residuales de una industria de palma aceitera como sustrato. Además, el experimento se llevó a cabo en botellas de 500 ml que contenía 125 ml de inóculo y 375 ml de sustrato; el pH se mantuvo neutro ya que

se utilizaron concentraciones de NaOH (hidróxido de sodio) o H₃PO₄ (ácido tetraoxofosfórico). Dicho reactor, operó bajo condiciones mesófilas (37°C) en una incubadora y se agregó nitrógeno gaseoso para mantener las condiciones anaerobias. Como resultado óptimo se obtuvo 273.8 ml/g.DQOremovido de metano (p.4). Asimismo, la producción de metano mejoró en un 54% en comparación del sustrato no tratado.

Resultados objetivo 2: Parámetros de control

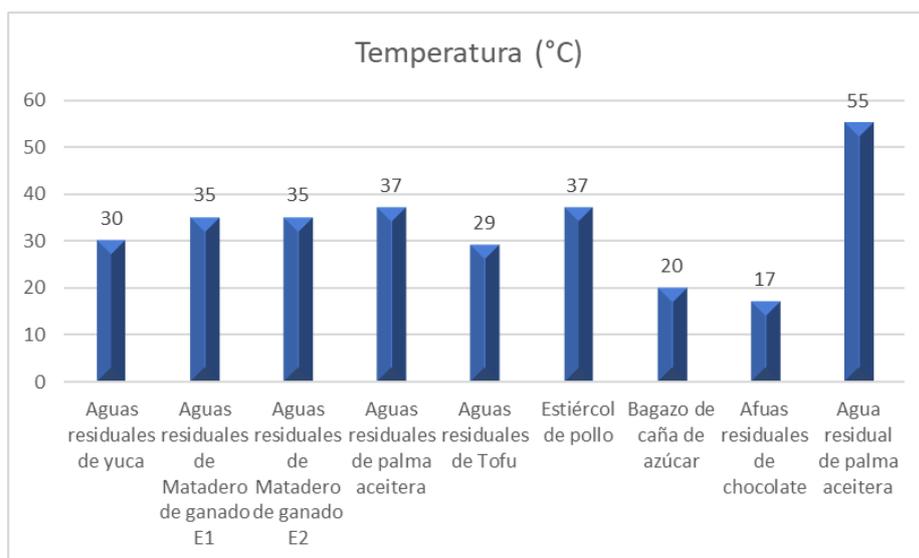
Tabla 10: Parámetros de control durante la mono-digestión anaerobia

Artículo	Condición	Sustrato	T°	pH	TRH	OLR	Producción Max. Biogás	Producción de Metano	Producción de Metano	Referencia
Producción de biohidrógeno y biometano a partir de aguas residuales de yuca en un reactor de biopelícula discontinuo de secuenciación anaeróbica de dos etapas	Mesofílica	Aguas residuales de yuca	30 ± 1 °C	8 - 8.9	6 horas	12 g/L.d	2.71 LCH ₄ /L.d	>78 %	-	MARI, A., et al. 2020
Un estudio comparativo de la producción de biogás a partir de aguas residuales de mataderos de ganado utilizando reactores de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente convencional y modificado (UASB)		Aguas residuales de Matadero de ganado	35 ± 1 °C	7.3	24 horas	10 g/L.d	27 L/d	89%	0.21 LCH ₄ /gDQOañadido	MUSA, M., et al. 2019
Comparación de la estabilidad del proceso en la generación de metano a partir de efluentes de molinos de aceite de palma utilizando estiércol lácteo como inóculo		Aguas residuales de palma aceitera	37°C	6.8	10 días	-	0.85 L/d	59%	-	KRISHNAN, S., et al. 2017
Efecto de la carga orgánica en la producción de biogás a partir del tratamiento de aguas residuales de tofu por el reactor UASB		Aguas residuales de Tofu	29° C - 32°C	-	10 días	25 g	0.494 L	85%	-	PRAYITNO, P., et al. 2020
Efecto la carga orgánica en el rendimiento de la digestión anaeróbica del reactor mesófilo (UASB)		Aguas residuales de Matadero de ganado	35 ± 1 °C	6.5	24 horas	10 g/L.d	5.5 L	89%	0.38 LCH ₄ /gDQOañadido	MUSA, M., et al. 2018

que utiliza aguas residuales de matadero de ganado como sustrato										
Eficiencia mejorada de generación de metano y biodegradación del estiércol de ganso mediante el pretratamiento de sonicación térmica y la gestión de carga orgánica en CSTR		Estiércol de ganso	-	7.45	10 días	2.9gSV/L.d	-	-	282. ml/gSV	HASSAN, M., et al. 2020
Superar la inhibición de la digestión anaeróbica del estiércol de pollo en condiciones de estrés por amoníaco al reducir la tasa de carga orgánica		Estiércol de pollo	37 °C	7.8 ± 0.2	40 días	2.5 gST/L.d	1.1 ± 0.1 L/L.d	63 ± 2%	354.6 ± 26 mL/gSV	MAHDY, A., et al. 2020
Digestión anaeróbica del hidrolizado de hemicelulosa producido después del pretratamiento hidrotérmico del bagazo de caña de azúcar en reactor UASB	Mesofílico y psicrófilo	Bagazo de caña de azúcar	20-30°C	7.2 ± 0.3	18.4 horas	2.4g DQO/L.d	-	-	269.96 LCH4/kgDQO	RIBEIRO, F., et al. 2017
Tratamiento de aguas residuales de industria de procesamiento de chocolate en una escala piloto de baja temperatura UASB: rendimiento del reactor y uso de biogás in situ para la recuperación de bioenergía	Psicrófilo	Aguas residuales de chocolate	17-19°C	6.7 ± 0.2	6.2 ± 0.3 horas	7.9 ± 2.2 mg/L	432.3 ± 137.6 L/d	83 - 85%	-	ALCARAZ, S., et al. 2020
Uso de efluente palma aceitera acidificada para la producción de biometano termofílico al cambiar el tiempo de retención hidráulica en el reactor discontinuo de secuenciación anaeróbica.	Termofílico	Agua residual de palma aceitera	55 °C	7.0 ± 0.5	3 días	21.41 gDQO/L.d	-	79.30 ± 2.33 %	260.3 LCH4/kgDQOeliminado	ABD NASIR, M., et al. 2019

De acuerdo con los resultados analizados, se puede determinar que la mono-digestión anaerobia puede realizarse en diversos rangos de temperatura, quiere decir que el proceso puede ser psicrófilo (20 a 25°C), mesófilo (25 a 40°C) o termófilo (40 a 55°C). Respecto a los experimentos mesofílicos, se identificó que la mayor temperatura fue de 37°C (Krishnan et al. 2017) y (Mahdy et al. 2020), que utilizaron como sustrato aguas residuales de industria de palma aceitera y estiércol de pollo, respectivamente. Por otro lado, la menor temperatura fue de 30°C (Mari et al. 2020) que utilizó aguas residuales de yuca como materia prima para la producción de metano. El promedio de las temperaturas mesófilas durante el proceso de mono-digestión anaerobia fue de 33.8°C. Respecto a los estudios psicrófilos, se obtuvo un rango de temperaturas entre 17 y 19°C, mientras que en el termófilo fue de 55°C.

Gráfico 1: Tipo de sustrato y temperaturas



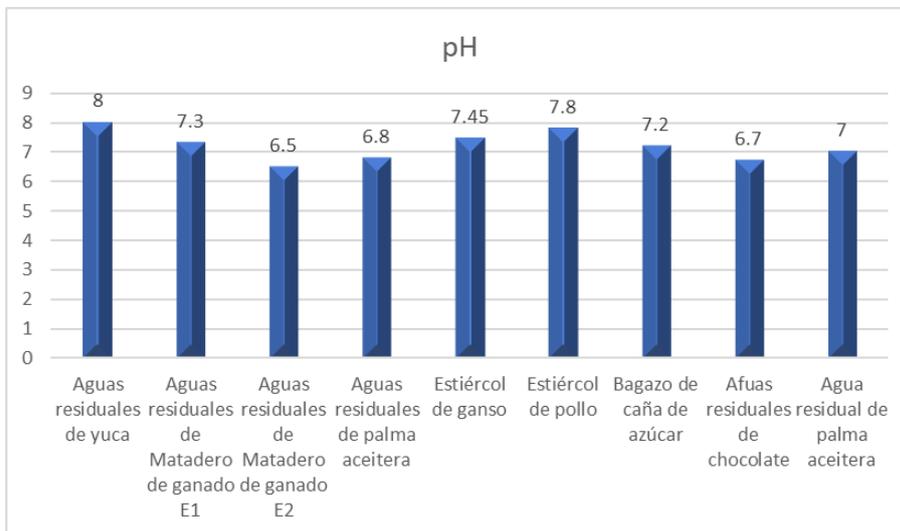
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el gráfico se puede determinar que la mayoría de los estudios analizados se realizaron bajo condiciones mesófilas, lo cual representa el 66.6%. Asimismo, a pesar de que, de acuerdo con la literatura, se manifestó que los microorganismos se desempeñan mejor bajo condiciones termófilas.

Como se mencionó en el marco teórico, el pH también es un parámetro muy importante ya que variaciones extremas de estas pueden ocasionar la inhibición en la producción del metano, por ello, dentro de los estudios analizados el promedio

del potencial de hidrógeno fue de 7.1 (neutro), el máximo pH fue entre un rango de 8 – 8.9 (Mari et al. 2020), teniendo en cuenta que procesos de monodigestión anaerobia con pH mayor a 9 inhibiría completamente la etapa metanogénica; sin embargo se obtuvo una producción de biogás a 2.71 LCH₄/L.d con una concentración de metano mayor al 78%. El menor valor de pH registrado fue de 6.5 (Musa et al. 2018), cabe recalcar que, si el pH es menor a 6.5 existiría una acumulación de ácidos grasos en la etapa acidogénica que podría afectar la producción del metano, sin embargo, la producción de biogás fue de 5.5 L con una concentración de metano al 89%.

Gráfico 2: Tipo de sustrato y pH

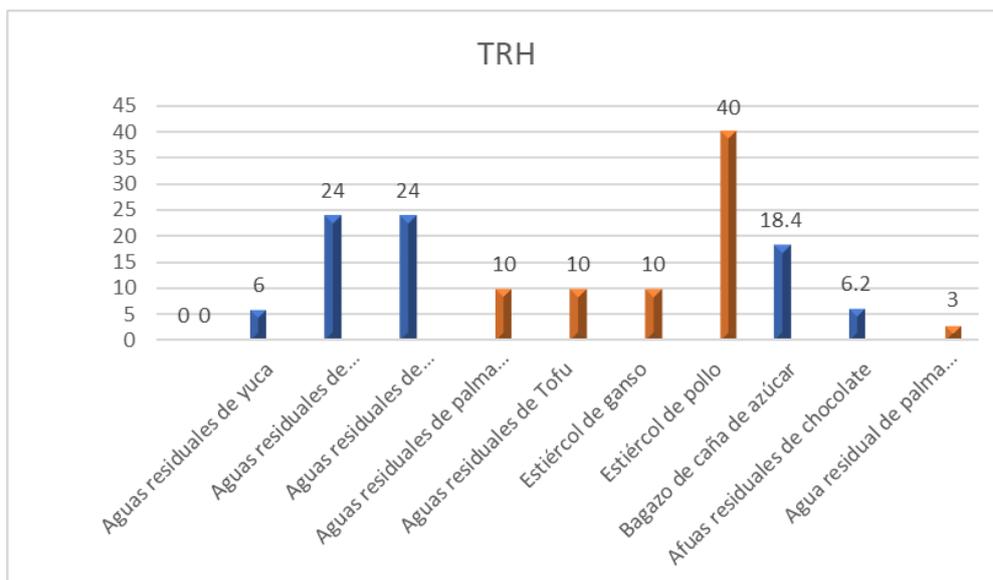


De acuerdo con el gráfico, se puede determinar que el 88.9% de los reactores anaerobios operaron dentro del pH establecido según los rangos óptimos del mismo según literatura.

Asimismo, el tiempo de retención hidráulica también fue considerado como un parámetro de control muy importante durante la mono-digestión anaerobia, ya que indica el tiempo que permanecerá el sustrato en el reactor durante el proceso de digestión para la obtención de biogás y también es un factor importante para la construcción del reactor, ya que permitirá conocer el volumen útil de este. El mayor TRH fue de 40 días (Mahdy et al. 2020), produciendo 1.1 L/L.d de biogás a un concentración de metano del 63%, el menor TRH fue de 3 días (Abd Nasir et al. 2019). Respecto a horas, el mayor TRH fue de 24 horas (Musa et al. 2018) y (Musa

et al. 2019), que al tratar aguas residuales de matadero obtuvieron una producción máxima de 5.5 L y 27 L/d, respectivamente, ambos con una concentración de metano al 89% y los valores mínimos obtenidos de TRH fueron de 6 ± 0.2 horas (Mari et al. 2020), (Alcaraz et al. 2020), que alcanzaron una producción máxima de biogás de 2.71 LCH₄/L.d y 423 L/d, respectivamente.

Gráfico 3: Tiempo de retención hidráulica



Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de retención hidráulica en los estudios analizados presentaban dos unidades (horas y días). De acuerdo con lo mencionado, se puede observar en el gráfico barras de dos colores, las de color azul representan a los estudios con TRH en horas y los de color anaranjado en días, con la finalidad de obtener un promedio, los modificaron las unidades de medida, por ende, el promedio de los tiempos de retención hidráulica es de 7.6 días.

Finalmente, la tasa de carga orgánica es un parámetro que permite conocer la cantidad del sustrato (volumen) y el tiempo con el que el reactor será alimentado. El mayor OLR fue de 24.41 gDQO/L.d (Abd Nasir et al. 2019), produciendo 260.3 LCH₄/KgDQO eliminado con una concentración de 79.30% de metano. El menor OLR fue de 2.4 gDQO/L.d (Ribeiro et al. 2017), con una producción de metano de 269.96 LCH₄/KgDQO.

Resultados objetivo 2: Parámetros de control

Tabla 11: Parámetros fisicoquímicos de los sustratos

Sustrato	T°	pH	DQO	DBO5	Alcalinidad	Sólidos Totales	Sólidos Volátiles	AGV	NH4-N	NH3-N	Referencia
agua residual de industria de papel reciclado	19.5	6.8	5240.9 mg/L	3581 mg/L	1750 mgCaCO3/L	7436 mg/L	4500.5 mg/L	2700 mg/L	1.75 mgNH4+/L		BAKRAOUI, M., et al. 2020
Aguas residuales de industria de chocolate	21.8 ± 1.5	4.3 ± 0.6	7372.5 ± 3160.8 mg/L		821.8 ± 582.5 mgCaCO3/L			381.4 ± 275.4 mg/L ácido acético		4.2 mg/L	ALCARAZ, S., et al. 2020
Estiércol de pollo	-	7.5	19600 ± 2500 mgO2/L		22291.7 ± 589.26 mgCaCO3/L	31.25 ± 0.81%	74.72%		8.4 ± 2.29 mg/L		KUCUKER, M., et al. 2020
aguas residuales municipales	-	7.11 ± 0.17	460.9 ± 27.1 mg/L	245.6 ± 42.8 mg/L	180.9 ± 11.4 mgCaCO3/L	-	221.8 ± 44.6 mg/L	-	23.9 ± 6.4 mg/L		KONG, Z., et al. 2021.
aguas residuales industria láctea	-	5.1	8250 mg/L	-	-	26 mg/L	-	-			SIVAPRA-KASAM, S., et al. 2021
Agua residual matadero de ganado	27.6 ± 0.5	6.9 ± 0.8	32000 ± 112 mg/L	17158 ± 95 mg/L	582 ± 14 mg/L CaCO3		-	-	-	38 ± 1 mg/L	MUSA, M., et al. 2019

Agua residual de industria de palma aceitera		5.1 ± 0.2	56500 ± 300 mg/L			32000 ± 300 mg/L	26000 ± 400 mg/L	-	810 ± 100 mg/L	-	KRISHNAN, S. et al. 2017
Agua residual madero de ganado	27.2 ± 2°C	6.66 ± 1	14720 ± 312 mg/L	6345 ± 86 mg/L	485 ± 14 mgCaCO3/L	7800 ± 86 mg/L		-	-	69 ± 2 mg/L	MUSA, M., et al. 2018
Agua residual de industria de palma aceitera	36-37°C	5.23 ± 0.18	63.6 ± 6.5 g/L		-	-		7.8 ± 1.32 g/L	-	-	NASIR, M., et al. 2018
Estiércol de pollo		7.4 ± 0.2	99 ± 5 g/L		-	103 ± 2 %	71 ± 2 %	-	-		MAHDY, A., et al. 2020
Residuos de madero de aves de corral		6.5 ± 0.2	26.8 ± 3.04 g/L	-	-	20.4 ± 0.96 %	18.2 ± 0.11 %	-	2.6 ± 0.15 g/kg	-	PARK, S., et al. 2017
Paja de arroz		8.2			2750 ± 50.0 mgCaCO3/L	94.60%	80.50%	28.3mg/L			SIDDHU, M. et al. 2019
Lixiviados de compost		5.3 ± 0.2	66.5 ± 3.5 g/L		12.6 ± 0.77 gCaCO3/L	61.9 ± 2.01 g/L	38.2 ± 2.11 g/L	15.2 ± 0.78 gCH3COOH/L	0.66 ± 0.05 g/L		SICILIANO, A., et al. 2019

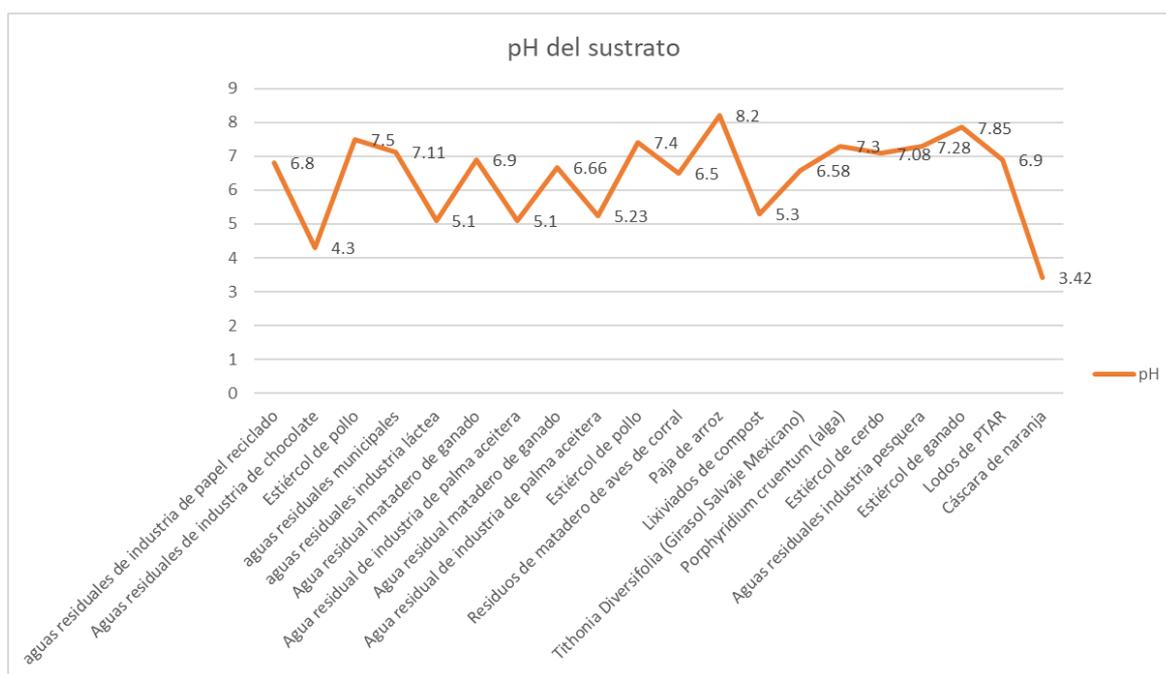
Tithonia Diversifolia (Girasol Salvaje Mexicano)		6.58 ± 0.10	193.21 ± 1.01 mg/Kg ST			88.31 ± 0.01 g/Kg	76.08 g/kg	0.04 gDQO/gSV			DAHUNSI, O., et al. 2017
Porphyridium cruentum (alga)		7.3	3414 mg/L			5 g/L	3.1 g/L				CAKMAK, E., et al. 2020
Estiércol de cerdo		7.08				26.89%	21.95%	19307 mg/kg		3974 mg/kg	MENG, C. et al. 2018
Aguas residuales industria pesquera		7.28	176.5 g/L			22.91 g/L	26.68 g/L				PICOS, A., et al. 2019
Estiércol de ganado	37°C	7.85	78900 mg/L			7.93%	6.71%	763.30 mg/L			DONG, L., et al. 2019
Lodos de PTAR		6.9	169 g/L		2.2 g/LCaCO3		19.3 g/L	0.8 g/L			CHOI, J., et al. 2018
Cáscara de naranja		3.42	1085 mgO2/g		1950 mgCACO3/L	20.17%	19.31%			1.68 mg/g	MARTÍN, M., et al. 2018

Fuente: Elaboración propia

Conocer las características fisicoquímicas del residuo es muy importante, ya que al utilizarse como materia prima para el proceso de obtención de biogás es necesario saber cuáles son sus componentes, con la finalidad de evaluar si el sustrato es adecuado para el proceso de mono-digestión anaerobia o evaluar si necesita un pretratamiento.

Según los estudios analizados, el parámetro fisicoquímico más importante de un sustrato antes del proceso de mono-digestión fue el potencial de hidrógeno (pH), ya que el 100% de los autores consideraron la medición de este. El sustrato con pH más alto fue la paja de arroz con 8.2 (Siddu et al. 2019) y el menor fue la cáscara de naranja con 3.42 (Martín et al. 2018). El promedio de pH de los sustratos fue de 6.4.

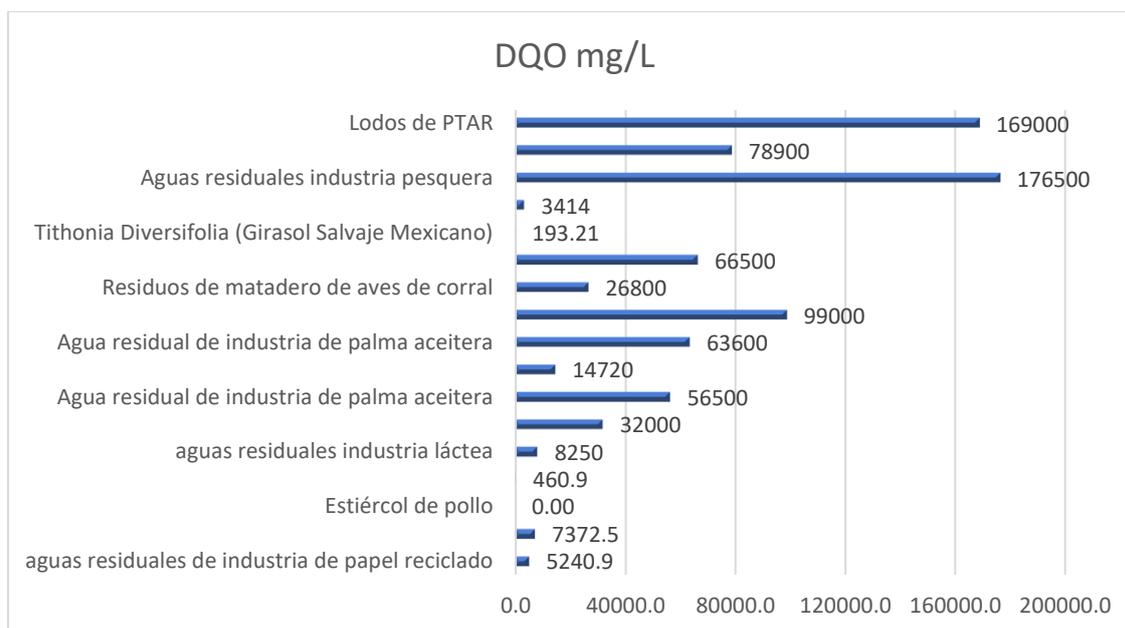
Gráfico 4: pH en sustratos



Fuente: Elaboración propia.

El segundo parámetro fisicoquímico más medido por los autores fue la Demanda Química de Oxígeno (DQO), según los datos, representa el 85%. La DQO con mayor valor fue de las aguas residuales de industria pesquera 176.5 g/L o 176500 (Picos et al. 2019) y el de menor valor fue de las aguas residuales municipales con 460.9 mg/L (Kong et al. 2021).

Gráfico 5: Demanda Química de Oxígeno en sustratos



El tercer parámetro más considerado fueron los sólidos totales (69.2%), las unidades de medida se representaron el mg/L y en porcentaje. Los mayores valores fueron: *Tithonia Diversifolia* (Girasol Salvaje Mexicano) con 88.31 g/kg u 88310 mg/L (Dahunsi et al. 2017) y estiércol de pollo con 103% (Mahdy et al. 2020) y los menores valores fueron de aguas residuales de industria láctea con 26 mg/L (Sivaprakasam et al. 2021) y 7.93% con estiércol de ganado (Dong et al. 2019).

El cuarto parámetro mayormente medido en los estudios fue la alcalinidad, representando el 50%. El mayor valor fue de 22291.7 mgCaCO₃/L con el estiércol de pollo (Kucuker et al. 2020) y el menor fue 180.9 mgCaCO₃/L por aguas residuales municipales (Kong et al. 2021).

De la misma manera que los sólidos totales, los sólidos volátiles también se representaron en dos unidades de medida, mg/L y porcentaje. Los mayores valores obtenidos fueron: *Tithonia Diversifolia* (Girasol Salvaje Mexicano) con 76.08 kg/L o 76080 (Dahunsi et al. 2017) y paja de arroz con 80.50% (Siddhu et al. 2019), los valores más bajos fueron: lixiviados de compost con 38.2 mg/L (Siciliano et al. 2019) y estiércol de ganado 6.71% (Dong et al. 2019).

Por otro lado, otro parámetro importante para conocer las propiedades fisicoquímicas de un sustrato son los ácidos grasos volátiles, el 46.2% de los autores lo tuvieron en cuenta, los mayores valores de AGV se presentan en el

estiércol de cerdo con 19307 mg/L (Meng et al. 2018) y los menores se presentan en la paja de arroz con 28.3 mg/L (Siddhu et al. 2019).

Además, el 38.5% de los autores consideraron a la temperatura como un parámetro de control para los sustratos, la temperatura más alta fue del estiércol de ganado con 37°C (Dong et al. 2019) y la más baja fue de las aguas residuales de industria de papel reciclado con 19.5°C (Bakraoui et al. 2020), el promedio de las temperaturas de los sustratos estudiados fue 28.2 °C.

Respecto al DBO5, sólo el 20% de los estudios investigados midieron este parámetro, cabe recalcar que, los sustratos fueron aguas residuales como: aguas residuales de industria de papel reciclado (Bakraoui et al. 2020), aguas residuales municipales (Kong et al. 2021) y aguas residuales de matadero de ganado (Musa et al. 2018) y (Musa et al. 2019). El mayor valor fue de 17158 mg/L (Musa et al. 2019) y el menor valor fue 245.6 (Kong et al. 2021).

La relación amonio-nitrógeno es otro parámetro considerado para conocer las características de un sustrato, el 46.20% de los autores estudiados lo consideraron dentro de sus investigaciones. El mayor valor fue 2.6 g/Kg en residuos de matadero de aves de corral (Park et al. 2017) y el menor valor fue de 1.75 mgNH₄/L en aguas residuales de industria de papel (Bakraoui et al. 2020).

Por último, tenemos la relación amoníaco-nitrógeno, sólo el 23.10% de los autores lo consideraron dentro de sus investigaciones, el menor valor corresponde a las aguas residuales de industria de chocolate con 4.2 mg/L (Alcaraz et al. 2020) y el mayor a las aguas residuales de matadero de ganado con 3974 mg/kg (Meng et al. 2018).

Objetivo 3: Pretratamientos

Tabla 12: Pretratamientos aplicados a los sustratos en la mono-digestión anaerobia para la obtención de biogás

INVESTIGACIÓN	TIPO DE PRE-TRATAMIENTO	PRETRATAMIENTO	SUSTRATO	EQUIPO	METODOLOGÍA	RESULTADOS	REFERENCIA
Efecto del pretratamiento mecánico sobre la digestión anaerobia del híbrido Pennisetum	Físico - Mecánico	Molienda	Pennisetum híbrido	Molinillo XB-HP	Tamaño de partículas molidas: 2-3cm. Tiempos de prueba: 30, 60 y 90 segundos. Secado en horno: Tiempo de secado: 3 días Temperatura de secado: 60°C. Tamaño de tamizado: 0.15 - 1mm.	Tamaño óptimo: 0.25-0.38 mm. PBM: 291.9 ± 4.7 ml CH ₄ /gSV.	KANG, X., et al. 2019
Mejora del rendimiento de metano de los tallos de algodón mediante pretratamiento mecánico	Físico - Mecánico	Molienda	Tallo de algodón	Molino de martillo MC-22 y Licuadora de laboratorio (Büchi B400)	Molinillo de martillo: Tamaño de partículas molidas: 100 mm a 65 mm. Licuadora de laboratorio: Tamaño de partículas molidas: 0.5 mm, 3 mm, 10 mm, 30 mm y 65mm.	Tamaño óptimo: 0.5 mm CH₄: 55.2% de CH ₄ Rendimiento de Metano: 143.5 ± 9.4 LN/KgSV	AL AFIF, R., et al. 2021
Optimización del pretratamiento por microondas de residuos lignocelulósicos para mejorar la producción de metano: Hya-cinth como ejemplo	Físico - Mecánico	Microondas	Jacinto de agua	Horno microondas de 2.5GHz	Tiempos de prueba: 7.9 min, 10 min, 15 min, 20 min y 22.1 min. Potencia del microondas: 500 W y a 100°C. Concentraciones de sustrato pretratado: 7.8, 12, 22, 32 y 36.1 g/L.	SV removido: 13.6± 2.7 % de SV, Hemicelulosa: 29.5 ± 1.8%. Celulosa: 5.0 ± 1.7% Lignina: 5.9 ± 2.3 Proteína del sustrato: 15.1 ± 0.9% Producción de Metano: 221 ± 7.75 ml/g de Sustrato.	ZHAO, B., et al. 2017
Potencial de metano mejorado de la paja de arroz con pretratamiento asistido por microondas y su análisis cinético	Físico - Mecánico	Microondas	Paja de arroz	Horno microondas Samsung CE 118KF, 1200W	Relación Sustrato/Líquido (S/L): 100 g/L. Temperaturas de pruebas: 130, 150, 170, 190, 210°C y 230°C Tiempo de prueba: 3 minutos Tiempos de prueba: 2, 3, 4 y 5 min.	Producción de CH₄: 325.76 mL/gSV.	KAINTHOLA, J., et al. 2019

					<p>Pruebas: Rango de trabajo: 1g de sustrato:10 ml de agua desionizada (1:10). Tiempo y potencia de centrifugación de la suspensión semilíquida: 10000 rpm por 10 min.</p>		
Efecto del pretratamiento ultrasónico en la producción de biogás a partir de paja de arroz	Físico - Mecánico	Ultrasonido	Paja de arroz	<p>Generador ultrasónico Modelo AG1007, T&C Power Conversion) 37 kHz (Transduce HNC-8SH-3840) y EL 10kHz (Transducer HNC-4SS-38100)</p>	<p>Niveles de energía: 100, 160 y 200W) Tiempos de exposición: 10, 20 y 30 min. Potencias de prueba: 37 y 102 kHz. Se preparó una suspensión de 500 ml para ST al 5% añadiendo agua destilada a la paja de arroz preparada. Se sonicó con 8 transductores ultrasónicos.</p>	<p>Concentración óptima: 200W, 30 min y 37 kHz. Potencial Bioquímico de CH₄: 250.36 mlCH₄/g.SV</p>	PANSRIPONG, S., et al. 2019
Producción mejorada de metano a partir de foliolos secos de palmera datilera argelina (Phoenix dactylifera L.) Hmira cultivar, por pretratamiento alcalino	Químico	Alcalino	Foliolos secos de Palmera Datilera Argelina	NaOH	<p>Solución de prueba: NaOH. Concentraciones de prueba: 6, 12 y 18% p/p SV sustrato. Dosis NaOH: 0.6, 1.2 y 1.8 g. Cantidad agua destilada: Max. 100 ml Cantidad sustrato: 10gSV Velocidad de agitación: 250 rpm por Tiempo de agitación: 6 horas.</p>	<p>Concentración óptima: 12% de NaOH. Rendimiento de CH₄: 135 mL.CH₄/g.SV. DQO removido: 48.68 % SV removido: 38.71 %</p>	DJAAFRI, M., et al. 2020
Optimización de las condiciones de pretratamiento de hidróxido de sodio para mejorar la producción de biogás a partir del rastrojo de espárrago	Químico	Alcalino	Rastrojos de espárrago	NaOH	<p>Solución de prueba: NaOH. Concentraciones de prueba: 2.5 a 7.5% Dosis NaOH: 2. 654 a 8.108 g. Cantidad agua destilada: 20 a 100 ml. Tiempo de prueba: 10 a 25 días.</p>	<p>Concentración óptima: 4.2% de NaOH. Tiempo óptimo: 19 días. Rendimiento máx. de biogás: 277.86 ml/g.SV.</p>	SUN, C., et al. 2017

Efecto del pretratamiento con ácido sulfúrico en la producción de biogás a partir de Salvinia molesta	Químico	Ácido	Salvinia molesta	H2SO4	<p>Solución de prueba: H2SO4 Concentraciones de prueba: 2, 4 y 6% p/p).</p> <p>Cantidad de sustrato: 25 g. Cantidad de solución: 500ml. Tiempo de prueba: 2 días a Temperatura de prueba: 30°C. El sustrato se separó del solvente usando filtro de papel, se lavó con agua y se secó.</p>	<p>Concentración óptima: 4% de H2SO4 Resultados: CH4: 72.09 %. CO2: 26.99%. CO: 0.32 % H: 0.61 %. Rendimiento máx. de biogás: 24.14 ml/gSV</p>	SYAICHURROZI, I., et al. 2019
Producción de metano a partir de efluentes de palma aceitera ozonizados	Químico	Ozonización	Aguas residuales de palma aceitera	Ozonizador Modelo OZ-553	<p>Dosis de O3: 3000 mgO3/hr. Tiempos de prueba: 3, 6, 12, 15, 18, 21, 24, 27 y 30 minutos. Rango mg de DQO/ mg de O3: 94 (DBO5/DQO). Ratio carga de O3: 0.76 a 27 min.</p>	<p>Concentración óptima: 15000 mg DQO/L. Producción máx. CH4: 273.8 ml/g DQO removido.</p>	TANIKKUL, P., et al. 2019
Producción mejorada de biogás a partir de estiércol de pollo a través de enzimas.	Biológico	Enzimático	Estiércol de pollo	Enzimas: Onozuka R-10 (SERVA Electrophoresis, Cat N° 16419) y Mace-rozyme R-10 (SERVA Electrophoresis, Cat N° 28302)	<p>Método enzimático 1: El sustrato se mezcló con agua de grifo para ajustar al porcentaje óptimo de ST. Proporción de enzimas: 1:1 p/p Dosis: 0.65g de cada enzima por ml de sustrato. pH: 5. Velocidad, temperatura y tiempo de agitación de incubación: 150 rpm, 40°C y 24 horas. Método enzimático 2: Se mezcló 22 g de sustrato con 100 ml de agua de grifo y 200 mg del Proporción de enzimas: 1:1 p/p por g de biomasa. Dosis: 4.5 mg de cada enzima. temperatura y tiempo de agitación de incubación: 24°C y 1h.</p>	<p>Método óptimo: SET 2B, Dosis: 125 ml de sustrato pretratado y 125 ml de inoculo. Producción máxima de Metano: 536.61 ml CH4/gSV removido. Tasa máx. de producción: 802.24 ml CH4</p>	KUCUKER, M. et al. 2020

Efecto del pretratamiento hidrotermal (HTP) en lodos de residuos de los mataderos de aves de corral (PSW) para mejorar la solubilización, propiedades físicas y producción de biogás a través de la digestión anaeróbica.	Térmico	Hidrotermal	Residuos de matadero de aves de corral	-	Tamaño de reactor: 500mL. Dosis de sustrato: 200mL Temperaturas de prueba: 170 a 220 °C Presiones de prueba: 1.7 Mpa a 2.0 MPa. Tiempo de prueba: 30 min. Velocidad de agitador: 200 rpm.	Temperatura óptima: 190°C. Producción máxima de metano: 148 mL, Rendimiento: 0.48 LCH4/Kg.Svañadido Tasa máxima de producción: 12.44 ml/día	PARK, S., et al. 2017
Digestión anaeróbica del hidrolizado de hemicelulosa producido después del pretratamiento hidrotermal del bagazo de caña de azúcar en el reactor UASB	Térmico	Hidrotermal	Bagazo de caña de azúcar	Reactor Parr modelo 4848 y prensa hidráulica (SOLAB, Modelo SL-10)	Tamaño de reactor: 2L Cantidad de sustrato a tratar: 120g. Presión de deshidratación: 9 ton. Prueba óptima: Cantita de sustrato: 0.24g/L. Temperatura: 178.6°C Tiempo: 43.6 min. Prueba 2: Cantidad de sustrato pretratado: Se 450 mL de hidrolizado de hemicelulosa Concentración: 88.16 g DQO/L. T° de almacenamiento: 0°C. Frecuencia de alimentación: 3 veces por semana. pH sin tratar: 3.14 ±0.04 DQO sin tratar: de 88.16 ±3.88 g/L.	Rendimiento de Metano: 269.96 LCH4/kgDQO DQO Removido: 85.7 ± 3.1 % pH final: 7.2 ±0.3 DQO final: 0.26 (±0.05) g/L. Celulosa removida: 6.8%. Hemicelulosa removida: 49%. Lignina removida: 6.3%.	RIBEIRO, F., et al. 2017
Pretratamiento con agua caliente líquida para mejorar la digestión anaeróbica de la paja de trigo: efectos de la temperatura y el tiempo de retención	Térmico	Hidrotermal	Paja de trigo	Reactor discontinuo de 500 ml	Temperatura hidrotermal: 150, 175, 200 y 225 °C. Velocidad de calentamiento: 9°C/min Presión: 0.4 - 2.5 Mpa Relación de masa (paja/Agua): 1:30 Tiempo de retención: 5, 30 y 60 min. Cantidad de sustrato: 5 g. Cantidad de agua desionizada: 150 g.	Temperatura y tiempo óptimo: 175°C durante 30 min Rendimiento máx. de CH4: 201.81 mlCH4/g.SV	SHANG, G., et al. 2019

Proteína soluble mejorada y potencial de metano bioquímico frente a los residuos biológicos adicionales mediante un pretratamiento diferente	Híbrido	Ultrasonido y Termoquímico	Orujo de manzana	Ultrasonido: Kudos, LHC Heating. Incubadora agitadora ZHICHENG, ZHWY-211D	<p>Temperaturas de prueba: 25°C, 40°C, 50°C y 60°C.</p> <p>Tiempos de prueba: 5, 15, 30 y 45 min</p> <p>Niveles de intensidad del ultrasonido: 35 kHz y 53 kHz.</p> <p>pH: 7 (neutralizado con 0,5 M de NaOH).</p> <p>Desoxigenación del reactor: Nitrógeno gaseoso.</p> <p>Tiempo de desoxigenación: 2 min. A Tiempo de prueba de BMP: 30 días.</p>	<p>Valor óptimo: 53kHz, 60°C a 45 min.</p> <p>BMP: 1519mLCH4/gSVS.</p>	TULUN, S., et al. 2018
Mejora de la digestión anaeróbica de microalgas mediante pretratamiento termoalcalino con cal (CaO)	Híbrido	Sonicación térmica	Microalgas (Chlorella sp. Y Scenedesmus sp)	-	<p>Dosis de solución: 4 y 10% CaO en 3 Temperaturas de prueba: 25, 55 y 72°C.</p> <p>Tiempo de exposición 25°C: 4 días</p> <p>Tiempo de exposición 55 y 72°C: 24 horas.</p>	<p>El resultado óptimo se obtuvo a 72°C + 10% CaO.</p> <p>CH4: 77.9 ± 0.6 %</p>	SOLÉ-BUNDÓ, M., et al. 2017
Pretratamiento asistido por plasma de biomasa lignocelulósica para digestión anaeróbica	Híbrido	Molienda, térmica y Plasma	Maíz	Scanning Electro Microscopy (SEM) Molino de corte (Pulverisette 15)	<p>Corte tamaño del sustrato: 6 mm</p> <p>Temperatura y tiempo de secado: 150°C por 2 hrs.</p> <p>Tamaño de triturado: 1 - 2 mm</p> <p>Se suministró aire a la cámara de plasma a 1.5 LPM a través de un controlador de flujo másico. La membrana de níquel actuó como electrodo a tierra para la descarga de plasma y como rociador para la producción de microburbujas.</p> <p>Diámetro de microburbujas: 550 um aprox.</p> <p>el resultado de maiz se suspendió por filtración con un embudo de papel (retuvo partículas de 5um), se lavó con agua ionizada y se secó por 12 hrs a 105°C</p>	<p>CH4: 49.8 ± 3.5%</p> <p>CO2: 18.6 ± 0.6%</p>	WRIGHT, A., et al. 2020
Mejora integrada de la producción de metano a partir de la cáscara	Híbrido	Microondas y alcalino	Cáscara de caña de azúcar	Horno microondas Showerwave 800. SANYO, Japón	<p>Cantidad de sustrato: 10g</p> <p>Dosis de solución: 4% p/p de Ca(OH)2</p>	<p>Producción Máx de CH4: 271.67 NmL CH4/g VS</p>	WANG, Y., et al. 2019

<p>de la caña de azúcar mediante el pretratamiento de hidróxido de calcio acoplado por microondas</p>					<p>Tamaño de botella: 250 ml Proporción sólido-líquido: 1:10, Potencia de horno microondas: 700W Tiempo de prueba: 10 min. Se enfrió a Temperatura Ambiente, se lavó con agua desionizada y filtró con un embudo.</p>		
---	--	--	--	--	---	--	--

Fuente: Elaboración propia

Kang et al. (2019) mediante el pretratamiento físico como la molienda, utilizó *Penisetum* híbrido (planta herbácea), con la finalidad de determinar el efecto del tamaño de partícula sobre el desempeño en la mono-digestión anaerobia para la producción de metano, que fue positivo en rangos de 0.380, 0.250 mm, obteniendo un Potencial Bioquímico de Metano de 291.9 mlCH₄/gSV, (p.5). Asimismo, Al Afif et al. (2021), también investigaron la viabilidad del mencionado pretratamiento para mejorar la producción del metano, la diferencia fue que en este experimento utilizaron tallos de algodón como sustrato y se demostró que la molienda es un pretratamiento eficaz, ya que se observó un aumento significativo en su rendimiento con 20.3% y 26% para partículas con tamaños de 3 y 0.5 mm respectivamente, en comparación con el sustrato no tratado. El rendimiento óptimo de metano fue 143.5 L/KgSV, con una calidad de 55.2% (p.5). Ambos autores coinciden en que la reducción de las partículas ayuda a mejorar la calidad del metano durante el proceso de mono-digestión anaerobia

Por otro lado, Zhao et al. (2017) investigó el efecto del pretratamiento con irradiación de microondas en el jacinto de agua, con la finalidad de romper las estructuras celulares y generar una mayor solubilidad de sus componentes para facilitar la degradación bacteriana en la mono-digestión. Durante el experimento, se mantuvo la potencia del microondas en 500 W y a 100°C, se trabajó con diversos tiempos: 7.9, 10, 15, 20 y 22.1 minutos. El mejor resultado respecto a la producción de metano se obtuvo con el sustrato pretratado durante 15 minutos, esto permitió una eficiencia 38.3%, un valor mayor que con el pretratamiento hidrotermal, produciendo 221 ml/gSustrato de metano (p.8). De la misma manera, Kainthola et al. (2019), utilizó el ya mencionado pretratamiento, pero utilizó como sustrato la paja de arroz, a fin de demostrar su eficiencia en la producción de metano. En el estudio se consideraron 6 temperaturas a trabajar: 130°C, 150°C, 170°C, 190°C, 210°C y 230°C, y 4 tiempos de exposición: 2, 3, 4 y 5 minutos. La mejor producción de metano se dio con el sustrato pretratado a 190°C durante 4 minutos, obteniendo 325.76 ml/gSV (p.8). La diferencia entre Zhao y Kainthola fue que el segundo probó con diversas temperaturas hasta encontrar la más adecuada, mientras que Zhao trabajó con 1 sola, ambos usaron diferentes tiempos de pretratado; teniendo una diferencia en la producción de metano de 67.8%.

Pansrispong et al. (2019) investigó el efecto del pretratamiento ultrasónico sobre la producción de biogás a partir de la paja de arroz como sustrato. La paja de arroz se dejó secar al sol hasta obtener una humedad de 12% en peso y se molió en tamaños de 25 mm y 2.5 mm. Luego, se preparó una suspensión de 500 ml para sólidos totales al 5% añadiendo agua destilada al sustrato molido, este se sonicó en un recipiente con 8 transductores ultrasónicos, se utilizaron 3 niveles de energía: 100, 160 y 200 W, también 3 tiempos de exposición: 10, 20 y 30 min y 2 potencias de prueba: 37 y 102 kHz. El resultado óptimo fue cuando se pretrató el sustrato a un nivel de energía de 200 W por 30 minutos a 37kHz, ya que se obtuvo un potencial bioquímico de metano de 250 mlCH₄/g.SV, siendo la producción 21.95% mejor en comparación con el sustrato no tratado.

Djaafri et al. (2020) analizó el Hidróxido de sodio (NaOH) como pretratamiento alcalino, donde utilizaron foliolos secos de Palmera Datilera Argelina como sustrato y se trabajó con concentraciones de NaOH al 6%, 12% y 18% (0.6, 1.2 y 1.8 g). Se pudo demostrar que la mejor concentración fue del 12% de NaOH, mejorando la producción de metano entre un 98 y 133%, obteniendo 135 mlCH₄/gSV. Asimismo, se observó una alta tasa de eliminación de DQO de hasta 48.64% (p.9). De la misma manera, Sun et al. (2017) empleó un pretratamiento alcalino para mejorar la producción del biogás utilizando rastrojo de espárragos como sustrato. Se emplearon diversos tiempos de pretratamiento de 10 a 25 días, concentraciones de 2.5 a 7.5% de NaOH y diferentes dosis de agua de 20 a 100 ml. La mejor producción de biogás fue de 275.65 ml/g.SV bajo las condiciones óptimas de 19 días a una concentración de 4.2% de NaOH y 74 ml de agua. A la vez, se redujo la hemicelulosa en un 65.20%, la celulosa en 29.06% y la lignina en 13.51% (p.1), esto significa que aplicando el pretratamiento alcalino, utilizando hidróxido de sodio, se podría mejorar eficientemente el rendimiento del biogás durante la digestión anaerobia.

Por otro lado, Syaichurrozi et al. (2019), evaluó la eficiencia del ácido sulfúrico (H₂SO₄) como pretratamiento ácido, utilizó *Salvinia Molesta* (helecho acuático) como sustrato antes del proceso de mono-digestión anaerobia, esto ayudó a modificar la composición química del sustrato, eliminó el contenido de lignina y

degradó en compuestos orgánicos simples a la celulosa. Durante el experimento se usaron concentraciones al 2, 4 y 6% de H₂SO₄, la concentración que brindó mejores resultados fue al 4% de H₂SO₄, con un rendimiento de biogás de 24.14 ml/gSV y concentración de 72.09% de CH₄, a diferencia del sustrato sin pretratar que sólo produjo 13.28 ml/gSV (p.20). Se puede observar que la aplicación de un tratamiento previo es fundamental, ya que, en la investigación del pretratamiento alcalino, se pudo demostrar una diferencia significativa del 55.01% entre el sustrato tratado y el que no lo fue; sin embargo, el pretratamiento alcalino mostró resultados casi 6 veces más superiores a comparación del pretratamiento ácido.

Tanikkul et al. (2019) utilizó ozono para tratar aguas residuales de palma aceitera y mejorar el proceso de mono-digestión para la producción de metano. El experimento utilizó una carga de 300 mg de ozono por hora en diversos tiempos de trabajo: 3, 6, 12, 15, 18, 21, 24, 27 y 30 min y diferentes concentraciones: 3000, 6000, 10000, 15000, 20000, 25000, 32000 y 40960 mgDQO/L. El mejor resultado se obtuvo con la concentración de 15000 mgDQO/L de aguas residuales de palma aceitera pretratada, produciendo 273.8 ml/g DQOremovido de metano, a diferencia de la no tratada, que produjo sólo 177.8 ml/gDQOremovido (p.7). De acuerdo con los resultados mencionados, se pudo demostrar la eficiencia de la ozonización, ya que existe una diferencia del 64.9% en la producción de metano entre el sustrato previamente tratado y el que no lo fue.

Dentro de los pretratamientos biológicos, Kucuker et al. (2020), investigaron el impacto del pretratamiento enzimático para la producción de biogás y metano utilizando estiércol de pollo como sustrato, donde se demostró la eficiencia del pretratamiento, ya que la producción del metano aumentó en un 35% aproximadamente en comparación con el sustrato sin tratamiento previo. Durante el experimento, se trabajaron con dos enzimas: Onozuka R-10 y Macerozima R-10. Se utilizaron 2 métodos, el primero consistía en utilizar 0.65 mg de cada enzima por ml de sustrato, para luego incubarse en una placa a 40°C con una velocidad de agitación de 150rpm por 24 horas. El segundo método consistió en mezclar 22g de sustrato con 100 ml de agua de grifo y 200mg de la mezcla enzimática (1:1 p/p) por gramo de biomasa, que constó 4.5mg de cada enzima y finalmente ser agitada a temperatura ambiente (24°C) durante 1 hora. El mejor resultado para la producción

de metano se obtuvo con el segundo método, produciendo 536.6 mlCH₄/gSVeliminado (p.4).

Park et al. (2017), evaluó el pretratamiento hidrotermal a fin de mejorar la solubilización, propiedades físicas en la mono-digestión anaerobia de las aguas residuales de aves de corral de matadero. Durante el experimento se utilizaron rangos de temperatura de 170 a 220°C y presiones entre 1.7 a 2.0 MPa en un tiempo de reacción de 30 minutos. El mejor resultado fue con el sustrato pretratado a 190°C, con una producción máxima de metano de 148 ml y una tasa máxima de 12.44 ml/día (p.5). Asimismo, Ribeiro et al. (2017) evaluó el desempeño de la mono-digestión anaerobia del hidrolizado de hemicelulosa producido después del pretratamiento hidrotermal del bagazo de caña de azúcar. El experimento trató 120 g de sustrato en peso seco en un reactor "Parr" de 2L, luego se deshidrató en una prensa hidráulica a una presión de 9 toneladas. Se obtuvo un mejor resultado cuando el sustrato se pretrató a una relación de sólido líquido de 0.24 g/ml a 178.6°C y a 43.6 min, produciendo 269.96 LCH₄/KgDQO (p.3). Por otro lado, Shang et al. (2019) estudió la viabilidad de pretratar la paja de trigo con agua caliente líquida con la finalidad de mejorar el rendimiento del metano en la digestión anaerobia. El pretratamiento consistió en 14 pruebas, se utilizaron 3 temperaturas diferentes: 150, 175, 200 y 225°C y 3 tiempos de retención: 5, 30 y 60 min, bajo presiones de 0.4 a 2.5 Mpa. El mejor resultado se obtuvo con el sustrato pretratado a 175°C durante 30 min, se produjo 201.81 mlCH₄/g.SV, el cual superó la producción de la paja no tratada en un 62.9%.

Finalmente, están los pretratamientos híbridos, que utilizan diversos tratamientos con la finalidad de mejorar la velocidad y eficiencia en el proceso de digestión anaerobia para la producción del biogás.

Tulun et al. (2018) evaluaron el desempeño de la mono-digestión anaerobia del orujo de manzana como sustrato para la producción de metano, utilizando tres pretratamientos: ultrasonido, térmico y alcalino. El experimento utilizó diferentes temperaturas: 25, 40, 50 y 60°C, distintos tiempos de operación: 5, 15, 30 y 45 minutos. Para cada pretratamiento se mezclaron 10g de residuo de orujo de manzana con 90 ml de agua destilada y se calentó en una incubadora agitadora en las condiciones mencionadas. El tratamiento alcalino consistió en utilizar una

solución NaOH 1N para nivelar los niveles de pH. El efecto de la frecuencia de sonido se realizó por medio de un dispositivo ultrasónico con dos niveles de intensidad (35 y 53 kHz), las 4 temperaturas y tiempos mencionados. El mejor resultado se obtuvo con un nivel de intensidad de ultrasonido de 35 kHz a 60°C y 45 minutos, que logró una eficiencia de 40.93% mayor que la del sustrato no tratado, produciendo 1519 mlCH₄/gSVS (p.9).

Solé-Bundó et al. (2017) estudió el efecto del pretratamiento alcalino utilizando cal (CaO) en la mono-digestión anaerobia de microalgas, la investigación utilizó 2 dosis diferentes de CaO: 4 y 10% en varias temperaturas: 25, 55 y 72°C. En el experimento se utilizaron botellas de vidrio de 160 ml conteniendo 27.62 g de biomasa de microalgas a una concentración de 14.5 gSv/L, para evaluar la mejor condición del pretratamiento se probaron con dosis de 4 y 10% de CaO, con tiempos de exposición a temperatura ambiente (25°C) por 4 días y para temperaturas de 55 y 72°C se trabajaron por 24 horas. Los mejores resultados se obtuvieron cuando se pretrató el sustrato con una dosis de 10% de CaO a 72°C por 24 horas, produciendo un 77.9% de metano, asimismo, se mencionó que este pretratamiento alcalino es amigable al ambiente, ya que la cal no es tóxica y menos costosa a comparación de otros químicos como el hidróxido de sodio (p.6).

Wright et al. (2020), utilizó maíz pretratado con plasma como materia prima en un reactor SCTR con un volumen total de 10 L, volumen de trabajo de 9L, velocidad de agitación de 100 rpm, TRH de 20 días y diferentes OLR: 2.14, 2.18 y 2.19 g.SV/L.d y operó bajo condiciones mesófilas (37°C). El pretratamiento se basó en cortar el maíz a 6mm, luego se secaron a 150°C durante 2 horas en un horno de laboratorio y con ayuda de un molino se trituró de 1-2 mm. Finalmente, se utilizó el reactor de microburbujas de plasma que suministró aire a la cámara a 1.5LPM, y las microburbujas producidas tenían un diámetro de 550 um, el resultado de esto se filtró con ayuda de un embudo de papel, que retuvo partícula de 5um, se lavó con agua ionizada y se secó por 12 horas a 105°C (p.2). Gracias a estos pretratamientos se obtuvo biogás con una concentración de metano de 49.8% y CO₂ de 18.6%. Se demostró que tratar al sustrato con un reactor de plasma con microburbujas produce una alteración fisicoquímica a la estructura del maíz, el rendimiento del biogás fue 18% mayor que con el maíz no pretratado.

Wang et al. (2019) para mejorar la producción de biogás utilizando cáscara de caña de azúcar como sustrato acopló 2 pretratamientos: alcalino y microondas. Se utilizó 10 g de sustrato seco y se mezcló con 4% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (p/p) en una botella de 250 ml con una proporción de sólido/líquido de 1:10. La suspensión del pretratamiento alcalino se calentó a una potencia de 700 W por 10 minutos en el horno microondas, finalmente se dejó enfriar a temperatura ambiente y la fracción sólido/líquida se separó con ayuda de un embudo. La producción máxima de metano fue 271.67 $\text{mlCH}_4/\text{g.SV (N)}$, siendo 41.13% mayor que el sustrato no tratado.

V. CONCLUSIONES

OE G: La mono-digestión anaerobia es una tecnología que se presenta como una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos, ya que estos pasan de ser desechos no reutilizables para convertirse en materia prima, capaces de generar biocombustible (biogás) y ser reaprovechado.

OE G: La mono-digestión anaerobia es una tecnología que permite desarrollarse en el campo científico, ya que se pueden realizar diversos estudios y proyectos utilizando una amplia gama de residuos orgánicos como materia prima, analizar el pretratamiento más adecuado para mejorar las características del sustrato, identificar adecuadamente el mejor tipo de reactor según las características encontradas y analizar las condiciones operativas durante todo el proceso de digestión, a fin de asegurar una producción de biogás de alta calidad.

OE 1: Se identificaron cuatro tipos de reactores, continuos y discontinuos, se consideran continuos siempre y cuando la alimentación con el sustrato y la producción sea constante, el discontinuo es todo lo contrario, ya que la alimentación es al principio y se espera hasta la producción del metano para poder utilizarlo. De acuerdo con lo mencionado, se puede afirmar que cada reactor es independiente y presenta una forma operacional distinta, dentro de los estudiados tenemos: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente – UASB, que son los más eficientes para tratar aguas residuales y soportan altos contenidos de OLR a un menor TRH, recalcando que el reactor que mayor cantidad de biogás produjo (432.3 L/d), Reactor Anaerobio de Tanque Agitado Discontinuo – CSTR no sólo tiene la capacidad de tratar aguas residuales, sino también residuos sólidos orgánicos, este reactor utiliza un agitador mecánico y su eficiencia disminuye con TRH bajos, en este reactor la mejor producción de CH₄ fue 354.6 ml/g.SV, Reactor discontinuo de Secuenciación Anaerobia – ASBR su eficiencia disminuye en OLR elevados, la mejor tasa de producción de CH₄ fue de 3.96 LCH₄/L.d, y Reactor Anaerobio Discontinuo – ABR que presenta una estructura simple, los estudios en escala de laboratorio se pueden realizar con matraces u jeringas, es una tecnología fácil de adaptar, siempre y cuando se utilice nitrógeno gaseoso para establecer la condición

anaerobia, al ser un reactor continuo requiere recircular el sustrato, fue el que menos metano produjo (273.8 ml/gDQOremovido). En todos los reactores el pH, la temperatura, el TRH y OLR son los parámetros más importantes y que deben ser medidos constantemente para evitar que el proceso de obtención del metano se vea afectado.

OE 2: Se determinaron los principales parámetros de control durante el proceso de mono-digestión anaerobia y son: Temperatura psicrófila en un rango de 17 – 19°C, mesófila con un promedio de 33.8°C y termófila con 55°C , potencial de hidrógeno (pH) que va desde 6.5 hasta 8.9, tiempo de retención hidráulica (TRH) de 18.4 horas produjo la tasa más alta de metano con 269.96 LCH₄/kgDQO, el promedio de TRH fue de 7.6 días (conversión de unidad de medida) y tasa de carga orgánica (OLR) DE 2.4 g.DQO/L.d, con un promedio de 9.7 g/L.d y estos parámetros fisicoquímicos determinan si se obtendrá éxito o no en la digestión. Por ejemplo, la temperatura y el pH son parámetros que deben medirse durante todo el proceso de digestión anaerobia hasta la obtención del biogás, ya que cambios bruscos de estos podrían inhibir todo el proceso de metanización.

OE 2: Se determinaron los principales parámetros fisicoquímicos de caracterización de los sustratos previo al proceso de mono-digestión, ya que de ellos depende si el sustrato es el adecuado o requiere algún pretratamiento, según los estudios analizados, el 100% de los autores midieron el pH a los sustratos, según la literatura el mejor valor es el neutro o debe estar dentro del rango de 6 a 8.50, si se encuentra fuera de este, se corre el riesgo de que el proceso de metanización se vea afectado. Los parámetros principales son: potencial de hidrógeno (pH) con valores entre 3.42 a 8.2 y un promedio de 6.4, demanda química de oxígeno (DQO) en un rango de 460.9 mg/L hasta 176.5 g/L, demanda bioquímica de oxígeno (DBO) con valores desde 245.6 mg/L a 17158 mg/L, alcalinidad con valores entre 180.9 mgCaCO₃/L a 22291.7 mgCaCO₃/L, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), ácidos grasos volátiles (AGV), relación amonio-nitrógeno (NH₄-N) con valores desde 1.75 mgNH₄/L hasta 2.6 g/Kg y una relación amoníaco-nitrógeno (NH₃-N) con valores desde 1.68 mg/g a 3974 mg/Kg.

OE 3: Los pretratamientos identificados en el presente estudio fueron: Molienda, Microondas, alcalino, ácido, ozonización e hidrotermal, también se identificaron pretratamientos híbridos, denominados así ya que se utilizan dos o más tratamientos para un mismo sustrato, por ejemplo: ultrasonido más termoquímico (físico, térmico y químico) y termoquímico. Por ello, la aplicación de estos a un sustrato, previo al proceso de mono-digestión anaerobia, ayuda a modificar la estructura fisicoquímica del mismo, haciéndolo mejor digerible para los microorganismos durante el proceso de obtención de metano. Los pretratamientos que presentaron mayor producción de metano fueron: Molienda con 143.5 L/kgSV (N) e hidrotermal con 269.96 LCH₄/kgDQO. El pretratamiento que produjo una mínima cantidad de biogás fue el químico, utilizando ácido sulfúrico, el valor fue de 24.14 ml/gSV.

VI. RECOMENDACIONES

OE G: Desarrollar mayor investigación sobre la tecnología de mono-digestión anaerobia, porque a comparación de la co-digestión, si se busca encontrar información con una relación directa entre un tipo de reactor, pretratamiento y parámetros de control para una adecuada producción de biogás, la información es un poco limitada.

OE G: Realizar estudios sobre la calidad fisicoquímica de los residuos que genera el proceso de mono-digestión, conocer si es necesario realizar otro tratamiento antes de disponerlo o que uso brindarle a ello.

OE G: Brindar mayor apoyo en la accesibilidad de la información, muchos de los experimentos realizados o investigaciones analizadas en el presente estudio se encuentran en revistas indexadas que exigen un pago para poder acceder a la información. Si se desea promover la investigación, se debería mejorar este aspecto.

OE 1: Mejorar el contenido de los estudios, se deberían describir los parámetros de control adecuados para cada tipo de reactor, ya que no todos se desempeñan de la misma manera.

OE 2: Uniformizar las unidades de medida de los distintos parámetros de control, a fin de que, al realizar estudios como el presente, permita que los resultados obtenidos sean comparables entre sí y se ejecute un mejor análisis.

OE 3: Realizar mayor investigación sobre la aplicación de pretratamientos a gran escala, ya que la mayoría de ellos al ser pilotos (experimentales) se ejecutan a escala de laboratorio, cabe recalcar que se ha demostrado que tratar previamente a un sustrato mejora el proceso de mono-digestión anaerobia y brinda una mejor calidad del metano.

REFERENCIAS

1. AB RASID, Nurul, ZAINOL, Muzakkir y SAIDINA, Nor. Pretreatment of agroindustry waste by ozonolysis for synthesis of biorefinery products. *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts* [en línea]. 2020. [Fecha de consulta: 08 de mayo de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818996-2.00014-4>
2. ACID pretreatment of lignocellulosic biomass for energy vectors production: A review focused on operational condition and techno-economic assessment for bioethanol production por Juan Camilo Solarte-Toro [et al]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Junio 2019. Vol. 107. [Fecha de consulta: 03 de mayo de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.024>
3. A comparative study of biogas production from cattle slaughterhouse wastewater using conventional and modified upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors por Mohammed Ali Musa [et al]. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [en línea]. 2019. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.3390/ijerph17010283>
4. A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery por M.R. Atelge [et al]. *Fuel* [en línea]. Junio 2020. Vol. 270. [Fecha de consulta: 05 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117494>
5. ADVANCES in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review por Rimika Kapoor [et al]. *Journal of Cleaner Production* [en línea]. Noviembre 2020. Vol. 273. [Fecha de consulta: 15 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123052>

6. AL AFIF, Rafat y PFEIFER, Christoph. Enhancement of methane yield from cotton stalks by mechanical pre-treatment. *Carbon Resources Conversion* [en línea]. 2021. Vol. 4. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.04.003>
7. ALSHAMMARI, Obaid, MAHYUDDIN, Muhammad y JERBI, Housseem. A Survey on Control Techniques of a Benchmarked Continuous Stirred Tank Reactor. *Journal of Engineering Science and Technology* [en línea]. 2018. Vol. 13. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: http://jestec.taylors.edu.my/Vol%2013%20issue%2010%20October%202018/13_10_20.pdf
8. AN integrated solution with Swara&Copras methods in renewable energy production: City selection for biogas facility por G. Nilay Yücenur [et al]. *Renewable Energy* [en línea]. Enero 2020. Vol. 145. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.011>
9. ANAEROBIC digestion of agricultural manure and biomass – Critical indicators of risk and knowledge gaps por Rajat Nag [et al]. *Science of the Total Environment* [en línea]. Noviembre 2019. Vol. 690. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.512>
10. ANAEROBIC digestion of hemicellulose hydrolysate produced after hydrothermal pretreatment of sugarcane bagasse in UASB reactor por Fernanda Resende Ribeiro [et al]. *Science of the Total Environment* [en línea]. Abril 2017. Vol. 584-585. [Fecha de consulta: 23 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.170>
11. ANAEROBIC digestion process: technological aspects and recent developments por Neves [et al]. *International Journal of Environmental*

- Science and Technology* [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1682-2>
- 12.A REVIEW of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends por Dinh Pham Van [et al]. *Environmental Engineering Research* [en línea]. Marzo 2019. Vol. 25. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.334>
- 13.A REVIEW of Biogas Utilization, Purification and Upgrading Technologies por Olumide Wesley Awe [et al]. *Waste and Biomass Valorization* [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9826-4>
- 14.A review of the role of critical parameters in the design and operation of biogas production plants por Shiplu Sarker [et al]. *Applied Sciences* [en línea]. Mayo 2019. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app9091915>
- 15.A review on evaluation of applied pretreatment methods of wastewater towards sustainable H₂ generation: Energy efficiency analysis por V. Godvin Sharmila [et al]. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea]. Marzo 2020. Vol. 45. [Fecha de consulta: 23 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.081>
- 16.BAJPAI, Pratima. Basics of Anaerobic Digestion Process. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology* [en línea]. Marzo 2017. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021].
Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4130-3_2
ISBN: 978-981-10-4130-3

17. BANU, J. y KAVITHE, S. Various Sludge Pretreatments: *Their Impact on Biogas Generation* [en línea]. Marzo 2017. Fecha de consulta: 22 de mayo de 2021]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49595-8_3
18. BIOGAS: A promising clean energy technology por Muhammad Arshad [et al]. *Bioenergy Resources and Technologies* [en línea]. 2021. [Fecha de consulta: 13 de mayo de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822525-7.00011-1>
19. BIOGAS Generation Through Anaerobic Digestion of Compost Leachate in Semicontinuous Completely Stirred Tank Reactor por Alessio Siciliano [et al]. *Processes* [en línea]. 2019. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr7090635>
20. BIOGAS production from saline wastewater of evisceration process of the fish processing industry por Alain R. Picos – Benítez [et al]. *Journal of water process engineering* [en línea]. Diciembre 2019. Vol. 32. [Fecha de consulta: 01 de mayo de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100933>
21. BIOGAS production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives por Safoora Mirmohamadsadeghi [et al]. *Bioresource Technology Reports* [en línea]. Septiembre 2019. Vol. 7. [Fecha de consulta: 01 de mayo de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>
22. BIOGAS production from recycled paper mill wastewater by UASB digester: Optimal and mesophilic conditions por Mohammed Bakraoui [et al]. *Biotechnology Reports* [en línea]. Marzo 2020. Vol. 25. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00402>

23. BIOHYDROGEN and biomethane production from cassava wastewater in a two-stage anaerobic sequencing batch biofilm reactor por Angelo G. Mari [et al]. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea]. Febrero 2020. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.054>
24. CAKMAK, Ece y UGURLU, Aysenur. Enhanced biogas production of red microalgae via enzymatic pretreatment and preliminary economic assessment. *Algal Research* [en línea]. Septiembre 2020. Vol. 50. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101979>
25. CHOI, Jae-Min, HAN, Sun-Kee y LEE, Chae-Young. Enhancement of methane production in anaerobic digestion of sewage sludge by thermal hydrolysis pretreatment. *Bioresource Technology* [en línea]. Julio 2018. Vol. 259. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.123>
26. CHOONG, Yee Yaw, CHOU, Kian Weg y NORLI, Ismail. Strategies for improving biogas production of palm oil mill effluent (POME) anaerobic digestion: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Febrero 2018. Vol. 82. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.036>
27. COMPARISON of process stability in methane generation from palm oil mill effluent using dairy manure as inoculum por Santhana Krishnan [et al]. *Environmental Technology & Innovation* [en línea]. Noviembre 2017. Vol. 8. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.005>
28. DARVISHI, Farshad y Hilgsmann, Serge. *Microbial Fuels: Technologies and Applications* [en línea]. 1a ed. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos. CRC

Press Taylor & Francis Group, 2018. [fecha de consulta: 27 de abril de 2021].

Disponible en:

<https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=WmpQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA77&dq=Microbial+biomethane+from+solid+wastes:+Principles+and+biotechnological+processes.&ots=FO8ui7XX1Y&sig=wq7Wy-LQXcuPMeuZvUtNLEmAFFg#v=onepage&q&f=false>

ISBN: 9781498763790

29. DAHUNSI, O., ORANUSI, S. y EFEOVBOKHAN, E. Anaerobic mono-digestion of tithonia diversifolia (Wild Mexican Sunflower). *Energy Conversion and Management* [en línea]. Septiembre 2017. Volumen 148. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.056>
30. EFFECT of hydeothermal pre-treatment (HTP) on poultry slaughterhouse waste (PSW) sludge for enhancement of the solubilization, physical properties, and biogas production through anaerobic digestion por Seyong Park [et al.]. *Waste Management* [en línea]. Junio 2017. Vol. 64. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.004>
31. EFFECT of organic loading on production of methane biogas from tofu wastewater treatment by UASB reactor por P. Prayitno [et al.]. AIP Conference Proceedings [en línea]. Enero 2020. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/1.5140933>
32. EFFECT of organic loading rate on anaerobic digestion performance of mesophilic (UASB) reactor using cattle slaughterhouse wastewater as substrate por Mohammed Ali Musa [et al.]. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph15102220>

33. EFFECT of sulfuric acid pretreatment on biogas production from *Salvinia Molesta* por Iqbal Syaichurrozi [et al.]. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea]. Febrero 2019. Vol.7. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102857>
34. EFFECT of ultrasonic pretreatment on biogas production from rice straw por Saran Panrispong [et al.]. *Oriental Journal of Chemistry* [en línea]. Agosto 2019. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13005/ojc/350403>
35. EFFICIENTE biogas production from cattle manure in a plug Flow reactor: A large-scale long-term study por Lili Dong [et al.]. *Bioresource Technology* [en línea]. Abril 2019. Vol. 278. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.100>
36. ENDOGENOUS ternary pH buffer system with ammonia-carbonates-VFA's in high solid anaerobic digestion of swine manure: An alternative for alleviating ammonia inhibition? Por Xiaoshan Meng [et al.]. *Process Biochemistry* [en línea]. Junio 2018. Vol. 69. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.03.015>
37. ENHANCED of microalgae anaerobic digestion by thermo-alkaline pretreatment with lime (CaO) por Solé-Bundó [et al.]. *Algal Research* [en línea]. Junio 2017. Vol. 24. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.03.025>
38. ENHANCED Methane Production from Dry Leaflets of Algerian Date Palm (*Phoenix dactylifera L.*) *Hmira Cultivar*, by Alkaline Pretreatment por Mohammed Djaafri [et al.]. *Waste and Biomass Valorization* [en línea]. Enero 2020. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00574-w>

39. Enhanced Methane Potential of rice straw with microwave assisted pretreatment and its kinetic analysis por Jyoti Kainthola [et al.]. *Journal of Environmental Management* [en línea]. Febrero 2019. Vol. 232. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.052>
40. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production – A review por E. Hosseini Koupaie [et al.]. *Journal of Environmental Management* [en línea]. Marzo 2019. Vol. 233. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.106>
41. FAEKAH, I., FATIHAH, S. y MOHAMED, Zawawi. Kinetic evaluation of a partially packed upflow anaerobic fixed film reactor treating low-strength synthetic rubber wastewater. *Heliyon* [en línea]. Marzo 2020. Vol. 6. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03594>
42. Food and Agriculture Organization - FAO. Guía teórico – práctica sobre el biogás y los biodigestores. *Colección Documentos Técnicos N°12* [en línea]. Buenos Aires. 2019. [Fecha de consulta: 15 de abril de 2021]. Disponible en: <http://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5082ES/>
ISBN: 978-92-5-131559-0
43. GAMBOA Bulla, Liliana. Análisis Documental de la Importancia de la Gestión del Conocimiento para la Cultura de la Investigación en las instituciones Educativas. Tesis (Magíster en Educación). Universidad Pedagógica Nacional. 2016. Disponible en: <http://repositorio.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/1016/T-O-19593.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
44. GHIMIRE, Nirmal, BAKKE, Rune y BERGLAND, Wenche. Mesophilic Anaerobic Digestion of Hydrothermally Pretreated Lignocellulosic Biomass

- (Norway Spruce (*Picea abies*)). *Processes* [en línea]. Enero 2021. [fecha de consulta: 12 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/pr9020190>
45. GONZÁLES, Judith, SÁNCHEZ, Marta y GÓMEZ, Xiomar. Enhancing Anaerobic Digestion: The Effect of Carbon Conductive Materials. *Journal of Carbon Research* [en línea]. Noviembre 2018. [fecha de consulta: 09 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/c4040059>
46. HASSAN, Muhammad, ZHAO, Chao y DING, Weimin. Enhanced methane generation and biodegradation efficiencies of goose manure by thermal-sonication pretreatment and organic loading management in CSTR. *Energy* [en línea]. Mayo 2020. Vol. 198. [fecha de consulta: 14 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117370>
47. HERNÁNDEZ, Roberto, FERNÁNDEZ, Carlos y BAPTISTA, María. *Metodología de la Investigación* [en línea]. 6ta ed. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V. [Fecha de consulta: 18 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
48. INNOVATIVE pretreatment strategies for biogas production por Regina J. Patinvoh [et al.]. *Bioresource Technology* [en línea]. Enero 2017. Vol. 224. [Fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.083>
49. INTEGRATED methane production improvement from sugarcane rind by microwave coupled calcium hydroxide pretreatment por Yi Wang [et al.]. *Fuel* [en línea]. Enero 2019. Vol. 246. [Fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.001>
50. KAINTHOLA, Jyoti, KALAMDHAD, Ajay y GOUD, Vaibhav. Optimization of process parameters for accelerated methane yield from anaerobic

- codigestion of rice straw and food waste. *Renewable Energy* [en línea]. Abril 2020. Vol. 149. [Fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.124>
51. KAINTHOLA, Jyoti, KALAMDHADA, Ajay S. y GOUD, Vaibhav V. A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. *Process Biochemistry* [en línea]. Septiembre 2019. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.05.023>
52. KAMYAB, Behzad, ZILOUEI, Hamid y RAHMANIAN, Bashir. Investigation of the effect of hydraulic retention time on anaerobic digestion of potato leachate in two-stage Mixed-UASB system. *Biomass and Bioenergy* [en línea]. Noviembre 2019. Vol. 130. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105383>
53. KOUGIAS, Panagiotis y ANGELIDAKI, Irini. Biogas and its opportunities - A Review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>
54. KUMAR, Atul, Samadder, S. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management* [en línea]. Noviembre 2017. Vol. 69. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
55. KUCUKER, A, DEMIREL, B. y ONAY, T. Enhanced biogas production from chicken manure via enzymatic pretreatment. *Journal of Material Cycles and waste Management* [en línea]. Abril 2020. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01039-w>
56. LARGE pilot-scale submerged anaerobic membrane bioreactor for the treatment of municipal wastewater and biogas production at 25°C por Zhe

- Kong [et al.]. *Bioresource Technology* [en línea]. Enero 2021. Vol. 319. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124123>
57. LIQUID hot wáter pretreatment to enhance the anaerobic digestion of wheat straw-effects of temperature and retention time por Gaoyuan Shang [et al]. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. Agosto 2019. [Fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06111-z>
58. MUNICIPAL solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-ToEnergy Technologies por Moya Diego [et al]. *Energy Procedia* [en línea]. Octubre 2017. Vol. 134. [Fecha de consulta: 12 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.618>
59. MUKUMBA, Patrick; MAKAKA, Golden y MAMPHWELI, Sampson. Anaerobic digestion of donkey dung for biogas production. *S. Afr. j. sci.* [en línea]. 2016, vol.112, n.7-8 [fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17159/sajs.2016/20160013>.
60. MORALES CH., Edson. Evaluación de la estabilidad de un digestor anaerobio termófilo. *Rev. Soc. Quím. Perú* [en línea]. 2020, vol.86, n.2 [fecha de consulta: 27 de abril de 2021], pp.152-163. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v86i2.285>.
61. MORALES, Carlos, CLEDERA, Maria y MORATILLA, Yolanda. Reviewing the Anaerobic Digestion of Food Waste: From Waste Generation and Anaerobic Process to Its Perspectives. *Applied Sciences* [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/app8101804>

62. MÜHLEMEIER, Ilka, SPEIGHT, Robert y STRONG, Peter. Biogas, Bioreactors and Bacterial Methane Oxidation. *Methane Biocatalysis: Paving the way to sustainability* [en línea]. Junio 2018. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-74866-5_14
63. NICHOLLS, David. Qualitative Research. Part 3: Methods. *International Journal of Therapy and Rehabilitation* [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 01 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.12968/ijtr.2017.24.3.114>
64. NUTRIENT recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion por Haiyuan Ma [et al]. *Bioresource Technology* [en línea]. Diciembre 2018. Vol. 269. [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.114>
65. OPTIMIZATION of microwave pretreatment of lignocellulosic waste for enhancing methane production: Hyacinth as an example por Bai-Hang Zhao. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* [en línea]. Julio 2017. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0965-z>
66. OPTIMIZATION of sodium hydroxide pretreatment conditions to improve biogas production from asparagus stover por Chen Sun [et al]. *Waste and Biomass Valorization* [en línea]. Julio 2017. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0020-0>
67. OVERCOME inhibition of anaerobic digestion of chicken manure under ammonia-stressed condition by lowering the organic loading rate por Ahmed Mahdy [et al]. *Biosource Technology Reports* [en línea]. Febrero 2020. Vol.9 [Fecha de consulta: 02 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100359>

68. PANIGRAHI, Sagarika y DUBEY, Brajesh. A critical review on operating parameters and strategies to improve the biogas yield from anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Renewable Energy* [en línea]. Diciembre 2019. Vol. 143. [Fecha de consulta: 25 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.040>
69. PLASMA – assisted pre-treatment of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion por Alexander Wright [et al]. *Food and Bioproducts Processing* [en línea]. Noviembre 2020. Vol. 124. [Fecha de consulta: 21 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.09.005>
70. PRE-TREATMENTS to enhance biogas yield and quality from anaerobic digestion of whiskey distillery and brewery wastes: A review por Burcu Gunes [et al]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Octubre 2019. Vol. 113. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109281>
71. Programa Energía Renovables y Eficiencia Energética en Chile – 4eChile. GUÍA para el instalador de plantas de biogás de mediana y gran escala. Providencia Santiago de Chile. Noviembre 2018. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.4echile.cl/publicaciones/guia-para-el-instalador-de-plantas-de-biogas-de-mediana-y-gran-escala/>
72. RAHI, Samar. Research Design and Methods: A Systematic Review of Research Paradigms, Sampling Issues and Instruments Development. *International Journal of Economics & Management Sciences* [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.mendeley.com/catalogue/e9c54d47-2b8c-3b44-a5ce-8615b584317f/>

73. RAJIN, Mariani. A Current Review on the Application of Enzymes in Anaerobic Digestion. *Green Energy and Technology* [en línea]. Abril 2018. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021].
Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3_4
ISBN: 978-981-10-8129-3
74. RECENT achievements in enhancing anaerobic digestion with carbon-based functional material por Jishi Zhan [et al]. *Bioresource Technology* [en línea]. Octubre 2018. Vol. 266. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.076>
75. Resolución de Consejo Universitario N° 0126-2017/UCV. Universidad Cesar Vallejo, Trujillo, Perú, 23 de mayo de 2017.
76. RESOLUCIÓN de Presidencia N° 215-2018-CONCYTEC-P. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 16 de noviembre de 2018.
77. REVIEW on the renewable energy and solid waste management policies towards biogas development in Malaysia por Cassendra Phun Chien Bong [et al]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Abril 2017. Vol. 70. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.004>
78. ROJAS, Xiomara y OSORIO, Belkis. Criterios de Calidad y Rigor en la Metodología Cualitativa [en línea]. 2019. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/337428163_Criterios_de_Calidad_y_Rigor_en_la_Metodologia_Cualitativa
79. ROSATO, Mario. Managing Biogas Plants: A Practical Guide [en línea]. 1. Ed. Estados Unidos: Taylor & Francis Group. 5 de septiembre de 2018. [Fecha de consulta: 13 de mayo de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.1201/b22072> ISBN: 9781315225838

80. SEMARNAT. Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales [en línea]. Ciudad de México. Julio 2017. Disponible en:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia_lodos_2017.pdf
81. SIVAPRAKASAM, S. y BALAJI, K. Effect of HRT on biogas yield in treating dairy industry wastewater using Upflow Anaerobic Sludge Fixed Film reactor. *Materialstoday: Proceedings* [en línea]. 2021. Vol. 43. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.182>
82. SOM, Ayub, YAHYA, Asdarina. Kinetics and performance study of ultrasonic-assisted membrane anaerobic system using Monos Model for Palm Oil Mill Effluent (POME) treatment. *Cleaner Engineering and Technology* [en línea]. Junio 2021. Vol. 2. [Fecha de consulta: 10 de mayo de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100075>
83. STEAM explosión pretreatment of rice straw to improve structural carbohydrates anaerobic digestibility for biomethanation por Muhammad Abdul Hanan Siddhu [et al]. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. Mayo 2019. [Fecha de consulta: 27 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05382-w>
84. TANIKKUL, Pinanong, BOONYAWANICH, Siriorn y PISUTPAISAL, Nipon. Production of methane from ozonated palm oil mill effluente. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea]. Noviembre 2019. Vol.44. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.210>
85. TECNOLOGIES and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review por Vitorino de Souza Melaré [et al].

- Waste Management* [en línea]. Enero 2017. [Fecha de consulta: 09 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.045>
86. TECHNOLOGY overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development por Rafaela Lora Grando [et al]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. Diciembre 2017. Vol. 80. [Fecha de consulta: 15 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.079>
87. THE anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints por Sagor Kumar Pramanik [et al]. *Bioresource Technology Reports* [en línea]. Diciembre 2019. Vol. 8. [Fecha de consulta: 20 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>
88. THE effect of mechanical pretreatment on the anaerobic digestion of Hybrid Pennisetum por Kang Xihui [et al]. *Fuel* [en línea]. Septiembre 2019. Vol. 252. [Fecha de consulta: 15 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.134> ISSN: 0016-2361
89. THE effect of temperature on the microbial communities of peak biogas production in batch biogas reactors por Guangliang Tian [et al]. *Renewable Energy* [en línea]. Agosto 2018. Vol. 123. [Fecha de consulta: 12 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.119>
90. THERMOPHILIC anaerobic digestion of pre-treated orange peel: Modelling of methane production por M. A. Martín [et al]. *Process Safety and Environmental Protection* [en línea]. Julio 2018. Vol. 117. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.008>
91. THE use of acidified palm oil mill effluente for thermophilic biomethane production by changing the hydraulic retention time in anaerobic sequencing

- batch reactor por Muhammad Abd Nasir [et al]. *International Journal of Hydrogen Energy* [en línea]. Febrero 2019. Vol. 44. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.149>
92. TRATAMIENTO biológico de aguas residuales: Principios, modelación y Diseño por Gary Amy [et al]. *IWA Publishing* [en línea]. Enero 2017. Vol. 16. [Fecha de consulta: 28 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.2166/9781780409146>
ISBN Electrónico: 978-1-78040-914-6
93. TRAVAINI, Rodolfo, JUÁREZ, Judit, Hernando y Ana, Rodríguez Silvia. Ozonolysis: An advantageous pretreatment for lignocellulosic biomass revisited. *Bioresource Technology* [en línea]. Enero 2016. Vol. 199. [Fecha de consulta: 14 de mayo de 2021].
Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.143>
94. TREATMENT of chocolate-processing industry wastewater in a low-temperature pilot-scale UASB: Reactor performance and in-situ biogas use for bioenergy recovery por Alcaraz-Ibarra S. [et al]. *Biomass and Bioenergy* [en línea]. Noviembre 2020. Vol. 142. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105786>
95. TREHARNE, Gareth y RIGGS, Damien. Ensuring Quality in Qualitative Research [en línea]. 2015. [Fecha de consulta: 14 de mayo de 2021].
Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/313264898_Ensuring_Quality_in_Qualitative_Research
96. TULUN, Sevket y BILGIN, Melayib. Enhanced Soluble Protein and Biochemical Methane Potential of Apple Biowaste by Different Pretreatment. *Earth Systems and Environment* [en línea]. Enero 2018. [Fecha de consulta:

29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s41748-017-0033-7>

97. WASTE to bioenergy: A review on the recent conversion technologies por Sze Ying Lee [et al]. *BMC Energy* [en línea]. Mayo 2019. [Fecha de consulta: 15 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s42500-019-0004-7>

98. WASTE to energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy por Surbhi Sharma [et al]. *Science of the total Environment* [en línea]. Abril 2020. Vol. 713. [Fecha de consulta: 18 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136633>

99. YILDIRIM, Elif, INCE, Orhan, AYDIN, Sevcan e I., Bahar. Improvement of Biogas Potential of Anaerobic Digesters Using Rumen Fungi. *Renewable Energy* [en línea]. Agosto 2017. Vol. 109. [Fecha de consulta: 29 de abril de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.021>

100. ZEYNALI, Reyhaneh, KHOJASTEHPOUR, Mehdi, EBRAHIMI-NIK, Mohammadali. Effect of ultrasonic pre-treatment on biogas yield and specific energy in anaerobic digestion of fruit and vegetable wholesale market. *Sustainable Environment Research* [en línea]. Noviembre 2017. Vol. 27. [Fecha de consulta: 03 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.07.001>

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de categorización apriorística

Objetivos Específicos	Problemas Específicos	Categoría	Subcategoría	Fuente
Identificar los tipos de reactores en los procesos de mono-digestión anaeróbica utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás	¿Qué tipo de reactores se utilizan en los procesos de mono-digestión anaeróbica utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás?	Tipos de reactores	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente - UASB 2. Reactor de tanque agitado continuo - CSTR 3. Reactor anaerobio de lotes secuenciales o continuo - ASBR 4. Reactor Anaerobio Discontinuo o Secuencial - ABR 	<p>Gunes et al., 2019 Valijanian et al., 2018 Mari, A., et al. 2020 Abd Nasir, M., et al. 2019 Mahdy, A., et al. 2020 Hassan, M., et al. 2020 Alcaraz, S., et al. 2020 Tanikkul, P., et al. 2019 Ghimire, N., et al. 2021</p>
Analizar los parámetros críticos de control en los procesos de monodigestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás	¿Cuáles son los parámetros críticos de control en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás?	Parámetros de control	Temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica (TRH), tasa de carga orgánica, Demanda química de oxígeno.	<p>Mari, A., et al. 2020 Musa, M., et al. 2019 Krishnan, S., et al. 2017 Prayitno, P., et al. 2020 Musa, M., et al. 2018 Abd Nasir, M., et al. 2019 Ribeiro, F., et al. 2017 Mahdy, A., et al. 2020</p>
Analizar los pretratamientos aplicados a los sustratos en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás	¿Qué nuevos pretratamientos son aplicados a los sustratos en los procesos de mono-digestión anaerobia utilizando residuos orgánicos para la producción de biogás?	Tipos de Pretratamientos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Químicos 2. Mecánicos 3. Biológicos 4. Térmicos 	<p>Gunes et al., 2019 Atelge et al., 2020 Morales et al. 2018 Kang et al. 2019 Al et al. 2021 Zhao et al. 2017 Kainthola et al. 2020 Djaafri, et al. 2020 Syaichurrozi, et al. 2019 Kucuker, et al. 2020 Tulun, et al. 2018</p>

Fuente: Elaboración propia



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Originalidad del Autor

Yo, ASTRID FIORELLA MAC KAY RODRIGUEZ estudiante de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA y Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, declaro bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: **Tecnología de Mono-digestión Anaerobia Usando Residuos Orgánicos para la Producción de Biogás. Revisión Sistemática, 2021**, es de mi autoría, por lo tanto, declaro que la Tesis:

1. No ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
2. He mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicado ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Apellidos y Nombres del Autor	Firma
MAC KAY RODRIGUEZ ASTRID FIORELLA DNI: 72401022 ORCID: 0000-0002-5246-1293	