

Recibido 12 de septiembre de 2022. Aceptado 15 de diciembre de 2022. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

Producción de Biogás a partir de residuos agroindustriales de mango Ataulfo y heces caninas

JEAN CARLO VELARDE-MEZA^{1*}, LITZY JHOANNA TIZNADO-OSUNA¹, YOSHLIN MONTSERRAT AGUILERA-HERNÁNDEZ¹, DAVID ULISES SANTOS-BALLARDO^{1,2}.

¹Unidad Académica de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

²Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, México.

*Autor de Correspondencia: 2020030111@upsin.edu.mx.

RESUMEN El uso de biomasa representa una fuente de productos energéticos con potencial para disminuir el uso de los combustibles fósiles y acumulación de gases de efecto invernadero; uno de los principales biocombustibles es el biogás, el cual puede complementar/sustituir al gas natural en la generación de electricidad. El objetivo de este artículo fue desarrollar un proceso de co-digestión anaeróbica en un reactor semicontinuo, utilizando residuos agroindustriales de mango como sustrato y heces caninas como inóculo, para esto se partió del análisis de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) de ambos materiales. Se obtuvieron porcentajes de ST de 36.75 ± 0.02 y SV de 91.82 ± 0.0055 para los residuos de mango, mientras que para las heces caninas se obtuvieron ST: 21.25 ± 0.02 y SV: 62.485 ± 0.02 . Se desarrolló la digestión anaeróbica semicontinua por un periodo de 15 días, se monitorearon las condiciones del reactor, finalmente se obtuvo una producción de 0.520 litros de metano acumulados al finalizar el proceso de co-digestión, que se traducen en un potencial teórico de producción de energía eléctrica de 0.0052 kWh (21.89 kWh por tonelada de mezcla), que podría contribuir al cubrimiento parcial de la actual demanda energética regional y sobre todo al manejo de residuos.

PALABRAS CLAVE— Biogás, sustrato, co-digestión, biodigestor semicontinuo.

I. INTRODUCCIÓN

A. PARADIGMA DE ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO

Desde que el ser humano desarrolló metodologías para generación de energía a escala industrial, la mayoría de su producción se ha basado fundamentalmente en el uso de combustibles fósiles; los cuales, a pesar de ser muy eficientes energéticamente, presentan una sensible inestabilidad en su precio y además, generan una serie de efectos negativos sobre el medio ambiente; por tal motivo, se ha llevado a cabo una exploración incesante en búsqueda de nuevas fuentes de energía, que presenten un menor impacto ambiental y características renovables [1].

Dentro de los esfuerzos realizados a nivel internacional, México se unió a varios países del mundo mediante el Acuerdo de París, cuyo objetivo es reducir de manera significativa las emisiones de gases de efecto invernadero que van al ambiente, donde destacan el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y otros gases. A pesar de esto, algunos autores reportan que, incluso con un estricto cumplimiento de las metas de reducción de emisiones que se han fijado a nivel mundial, se pronostica que, en los siguientes años, el planeta podría presentar incrementos entre 3 y 4 grados Celsius sobre la temperatura promedio histórica. Ante esta

realidad, la transición energética es considerada hoy en día como uno de los principales pilares de la mitigación del cambio climático; por otro lado, una de las áreas claves para lograr esta transición, es el desarrollo y uso de los biocombustibles [2].

B. EL BIOGÁS COMO OPCIÓN ENÉRGICA

Los biocombustibles son aquellos productos energéticos obtenidos mediante la transformación de materia orgánica (o biomasa), estos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos y se caracterizan por tener un impacto ambiental menor que sus contrapartes no renovables; dentro de este tipo de productos energéticos se destacan el biodiésel, el bioetanol y el biogás [3]. Este último es una mezcla de gases que se genera por procesos naturales, usualmente en dispositivos específicos denominados biodigestores, el fundamento del proceso de obtención de biogás es la degradación biológica de materia orgánica mediante la acción de microorganismos en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno). El biogás generalmente está compuesto por metano (50-75%), dióxido de carbono (35-40%) y algunos gases traza como el nitrógeno (0.5-5%), sulfuro de hidrógeno (0.1%), hidrógeno (1-3%), y vapor de agua [4].

Una manera de producir biogás de manera controlada es mediante biodigestores, los cuales consisten en una cámara sellada que propicia la degradación anaeróbica de materiales como aguas negras, lodos activados o residuos biodegradables, donde se observan mezclas de materia orgánica con un consorcio de microorganismos presentes en él, esto es lo que se conoce como *inóculo*. Otro factor importante del proceso es la materia orgánica que se va a degradar, usualmente se obtiene a partir de residuos generados por actividades humanas, plantas, o productos vegetales y es conocido como *sustrato* [5].

Esta tecnología ha sido bien estudiada y presenta múltiples ventajas: disminuye la carga orgánica de los desechos orgánicos que están presentes en los residuos orgánicos, disminuye la contaminación ambiental, produce un gas combustible que puede emplearse para complementar y/o satisfacer las demandas de energía de algunas comunidades y, paralelamente genera un subproducto que tiene potencial uso como fertilizante y/o mejorador de suelos [3,4].

C. INÓCULOS Y SUSTRATOS ALTERNATIVOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Una de las premisas relacionadas con la producción de biogás es encontrar materiales que se puedan utilizar como inóculos y sustratos de manera conveniente; dentro de las opciones de materia orgánica utilizable como sustratos destacan los residuos generados en la producción de alimentos [5].

Por otro lado, la industria alimentaria tiene una gran importancia en México, ya que emplea aproximadamente a más del 4% de las personas económicamente activas. De igual forma, la producción bruta en esta industria representa casi el 6.5% del total de la economía [6]. Según diversos autores, algunos residuos de la industria alimentaria, especialmente los derivados de frutas y verduras (tales como el plátano, papaya, jitomate, cebolla y mango), tienen un alto potencial para ser aprovechados para la generación de biogás, dentro de estas opciones, los residuos de mango han generado un gran interés con fines energéticos por los altos contenidos de materia orgánica y una alta disponibilidad [7].

Además, Sinaloa es considerado el tercer productor de mango en el país, debido a que participa con aproximadamente el 32% de la exportación nacional. Actualmente, en el municipio de El Rosario se registra la presencia de 1538 productores de mango. De acuerdo con cifras reportadas por el Gobierno Mexicano, Sinaloa es responsable de la producción de cerca de 397,780 toneladas de mango, donde, después del proceso de exportación una parte se queda en el país para consumo nacional, de este producto una parte es procesada, generando grandes cantidades de residuos. También, se ha reportado que aproximadamente entre un 10 a un 20% de la producción

total de mango no es aprovechado, por lo que es desechado sin fines de utilización, y en algunos casos puede extenderse hasta el 50% [8]. Actualmente, a nivel regional estos residuos no tienen un uso establecido que permita darles un valor agregado y que a su vez contribuya a reducir pérdidas económicas, así como a la mitigación de los problemas ambientales que su mal manejo provoca.

Por otra parte, el otro factor vital en la digestión anaeróbica son los inóculos, dentro de estos los más utilizados son lodos activados obtenidos de plantas tratadoras de aguas, residuos sólidos urbanos y heces obtenidas de diversos animales (destacando ganado vacuno, porcino y equino); se ha generado gran interés en encontrar inóculos alternativos que presenten potencial para obtener biogás; una opción interesante se encuentra en el sector doméstico, específicamente en los desechos de mascotas [9]. Este tipo de residuos generan una gran cantidad de materia orgánica en forma de desechos, en México, hasta el año 2021 se reportó un acumulado de 80 millones de mascotas, entre las cuales, 43.8 millones de ellas son animales caninos; éstos son capaces de producir en promedio 300 gramos de excremento al día, por lo que, tomando en cuenta las estadísticas anteriores, se puede considerar que en el país se generan aproximadamente 13,140 toneladas diarias de excremento canino [9]. Estos materiales tienen potencial aplicación en la producción de biogás ya que se pueden considerar como inóculos anaeróbicos, aunque en general su rendimiento no es muy alto (30-40 % de eficiencia); sin embargo, al realizar co-digestiones con materiales vegetales su potencial aumenta [9, 10]; es importante mencionar que a pesar las grandes cantidades generadas de este material, este ha sido pobremente estudiado, dejando un vacío de información en el uso de heces caninas como fuente de biogás.

Es por ello que, una vez analizadas las características de la biomasa residual de mango y la cantidad de residuos que se generan por temporada, así como también el hecho de que los residuos domésticos como heces caninas han sido poco estudiados como inóculos anaeróbicos, el presente proyecto analizó el potencial de posicionar estos materiales como posibles materia primas para la producción de biogás, con el objetivo de contribuir al manejo adecuado de estos residuos y permitir también la reducción de la carbonización al planeta de una manera pertinente.

II. DESARROLLO

A. MATERIALES

La biomasa residual de mango fue donada por la desecadora de mango “Los Aguilares Produce, S. de R.L. de C.V.”, ubicada en El Rosario, Sinaloa, México; responsables de producir toneladas de residuo de mango Ataulfo, el cual actualmente es desechado directamente en rellenos sanitarios, llegando a generar residuos todos los días dentro de los meses de mayo, junio y julio.

Para la preparación de la biomasa de mango, se realizó un pre-tratamiento de secado al sol que duró aproximadamente 4 días. Posteriormente fueron trituradas para reducir su tamaño. Finalmente, ésta fue almacenada a 4 ± 1 °C hasta su posterior uso.

Por otro lado, el inóculo se obtuvo de una mascota local, la cual se encontraba con un buen estado de salud y es alimentada de manera regular y exclusivamente con alimento para perro, además, se mantuvieron condiciones de crianza estables.

B. MÉTODOS

1. Caracterización de inóculo y sustrato – determinación de Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Humedad (H) y Sólidos Fijos (SF) o cenizas

Los contenidos de H, ST, SV y SF se evaluaron según lo reportado por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) [11].

Para la determinación de ST, se calentaron los platos de evaporación (crisoles) a 103-105°C por 15 min en un horno de secado (Novatech® HS35-ED), se dejaron enfriar en un desecador y se tomó su peso (W_{crisol}). Posteriormente, se colocaron 20 g de muestra (inóculo o sustrato) y se registró su peso (W_{muestra}), finalmente se secaron las muestras a 103-105°C por 24 h. Se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se registró el peso (W_{total}). El porcentaje de ST se calculó utilizando la Ec. (1). Las pruebas se realizaron por triplicado y el resultado se presentó como porcentaje promedio con desviación estándar [11].

$$\%ST = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{muestra}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (1)$$

El contenido de humedad se calculó restando la diferencia en porcentaje de los ST, con la Ec. (2).

$$\%H = 100\% - \%ST \quad (2)$$

Para la determinación de SV y los SF, los crisoles con las muestras secas se calcinaron utilizando una mufla a 550°C durante 60 min, posteriormente el residuo fue pesado ($W_{\text{volátil}}$). Los SV y SF se calcularon por triplicado y se presentan como porcentajes promedios con desviación estándar, se calcularon empleando las Ecs. (3) y (4) [11].

$$\%SV = \frac{W_{\text{total}} - W_{\text{volátil}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (3)$$

$$\%SF = \frac{W_{\text{volátil}} - W_{\text{crisol}}}{W_{\text{total}} - W_{\text{crisol}}} \times 100 \quad (4)$$

2. Condiciones teóricas, cálculos y dimensionamiento

Una vez determinados los valores de ST y SV para sustrato e inóculo, para el desarrollo de digestión anaeróbica se determinó utilizar una proporción de 70% y 30% respectivamente, esto porque la fuente de inóculo se encontró limitada por la cantidad de producción diaria. Aquí es necesario destacar que la proporción de inóculo-sustrato se encontró dentro de lo recomendado por diversos autores. Además, este mismo factor se utilizó para elegir un diseño de biodigestor semicontinuo, pues de esta forma el inóculo se incorporaría lo más fresco posible durante las cargas diarias [12, 13, 14]. De acuerdo con la bibliografía, el porcentaje de ST recomendado para biodigestores semicontinuos va desde 8% hasta 12%, por lo que fue necesario realizar una dilución de la mezcla con agua [12]. En el presente proyecto, los ST se utilizaron en una dilución de 8% por kg de mezcla inóculo-sustrato, la cantidad de agua necesaria para esto se calculó mediante la Ec. (5):

$$\%S.T. (diluída) = \frac{(1 \text{ kg de mezcla})(S.T. de la mezcla)}{1 \text{ kg de mezcla} + \text{cantidad de agua}} \quad (5)$$

Para el cálculo del volumen del biodigestor se tomó en cuenta que la producción de inóculo diaria era aproximadamente de 120 g/día, además de que el tiempo de retención hidráulica (TRH) determinado fue de 15 días; la Ec. (6) muestra la relación del volumen con el TRH y la cantidad de mezcla inóculo-sustrato (tasa de carga orgánica o TCO):

$$(TRH)(TCO) = \text{Volumen del biorreactor} \quad (6)$$

Basándose en los cálculos presentados, se optó por utilizar un biodigestor con capacidad total de 20 L, con un espacio de cabeza de 52.5% para la acumulación de biogás, lo cual arrojó una tasa de carga orgánica de 0.5 L/día que representa solo un 5.26% de la carga total fija, misma que se encuentra dentro del rango recomendado [5, 12]. Esto no solo contribuyó a la facilidad de búsqueda de materiales, sino que también previno el caso hipotético de que la producción de inóculo no fuera suficiente, pues redujo su participación en un poco menos de la mitad. Las cantidades de cada uno de los elementos de acuerdo con la proporción antes mencionada se encuentran en la Tabla I.

TABLA I. CONDICIONES TEÓRICAS DEL BIODIGESTOR.

Parámetros	Mezcla
PSTM	32.1%
TRH	15 días
ST	8%
TB	Semicontinuo
Temperatura	Rango mesofílico
TCO	0.5 L/día
CF	9.5 L

PSTM: Promedio de ST de la mezcla (sin diluir); THR: Tiempo de retención hidráulica; ST: Sólidos totales (diluidos); TB: Tipo de biodigestor; TCO: Tasa de carga orgánica; CF: Carga fija.

En cuanto a la temperatura del proceso, se optó por utilizar un rango mesofílico, principalmente por dos razones, primero, dado que los microorganismos del inóculo se obtuvieron directamente de un organismo vivo es muy probable que los consorcios bacterianos trabajen de manera más eficiente bajo esas temperaturas; en segundo lugar se decidió realizar la digestión anaeróbica a la temperatura ambiente natural, donde, por las características del clima regional se permitió aprovechar el rango de temperatura de la localidad durante el mes de agosto, llegándose a presentar temperaturas máximas registradas de 32 °C, mientras que por las noches se llegaron a presentar temperaturas mínimas de 25 °C, esto permitió realizar un proceso sin muchos requerimientos energéticos.

3. Diseño, construcción del biodigestor y puesta en marcha

Se utilizó un biodigestor de 20 L de polietileno de baja densidad, mismo que se adaptó para colocar un sistema de toma de muestras en la parte inferior, esto para el monitoreo del proceso de digestión anaeróbica. A su vez, en la parte superior se contó con un dispositivo de control de salida del gas generado, lo que permitió las mediciones de la producción obtenida en el proceso. Además, se implementó un tubo de PVC cortado en diagonal, que funcionó como sistema de alimentación (Fig. 1).

La agitación del sistema se realizó de manera manual al menos dos veces al día durante todo el proceso de digestión anaeróbica, esta agitación es importante para evitar formación de espumas, además de favorecer una mezcla homogénea y adecuada del inóculo y el sustrato [13]. Para la medición del biogás generado se implementó un sistema de eudiometría utilizando hidróxido de sodio 0.5M como solución de medición (Fig. 1D), lo que permitió medir directamente el contenido de metano formado en la digestión anaeróbica [14]. Finalmente, el proceso se diseñó para realizar una digestión anaeróbica con una carga diaria semicontinua de 0.5 L de mezcla fresca (inóculo más sustrato). El digestato saliente se utilizó para monitorear los parámetros de pH y temperatura dentro del biodigestor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. CARACTERIZACIÓN DEL INÓCULO Y SUSTRATO

La Tabla II muestra los resultados de la caracterización del sustrato y del inóculo.

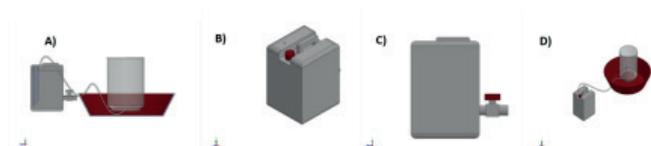


Fig. 1. A) Vista lateral del biodigestor. B) Vista isométrica del reactor modificado. C) Vista lateral del reactor modificado. D) Vista del biodigestor ensamblado.

TABLA II. CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO.

Parámetros	Mango	Heces caninas
%H	63.25 ± 0.02	78.75 ± 0.02
%ST	36.75 ± 0.02	21.25 ± 0.02
%SV	91.82 ± 0.0055	62.485 ± 0.02
%SF	8.181 ± 0.0055	37.515 ± 0.02

H: Humedad; ST: Sólidos totales; SV: Sólidos volátiles; SF: Cenizas

Las pruebas de caracterización del sustrato muestran que hubo un contenido de H relativamente alto, esto se puede explicar debido a que se realizó un proceso de secado al sol, que algunos autores consideran que no son los más eficientes para alcanzar un secado completo, sin embargo, con el potencial disminución del gasto energético del proceso se considera conveniente, además, el contenido de H obtenido después del proceso de secado es adecuado ya que este tipo de materiales usualmente presenta valores de H que oscilan entre 95 y 98 % [14, 15, 16].

Por otro lado, en cuanto a los SV, los residuos de mango presentaron porcentajes de 91.82 ± 0.0055 %, valores cercanos a los reportados por Gonzáles-Arenas [15] y Luna-Avelar [14, 16] quienes reportaron resultados para mango Kent y Haden, obteniendo valores entre 95.55 y 96.90 respectivamente. Este factor es importante ya que los SV representan el contenido de materia orgánica disponible para transformarse biológicamente en biogás, es decir, mientras más altos valores de SV contenga el material, mayor potencial teórico tiene para obtención de biogás [5,12]. Este resultado se conecta con los SF, ya que el porcentaje restante de los SV son los minerales que usualmente no se pueden aprovechar mediante procesos bioquímicos, por eso es recomendable que los materiales que se utilizarán como sustratos tengan valores bajos de este parámetro (menores a 10 %), lo que se cumple en el presente trabajo [12].

En cuanto al inóculo, se obtuvo un 78.75 ± 0.02% de H, valor inferior comparado con los reportes otros autores [9, 10, 11] quienes determinaron un rango de H entre 96 y 98.5%, esta diferencia puede explicarse por el manejo que se tiene del inóculo desde que se obtiene hasta que se utiliza, además de que los reportes no son uniformes en las regiones de estudio ni en las condiciones de alimentación de los animales. En cuanto a los SV, es decir la cantidad de materia orgánica disponible para transformarse, se reportó un 62.485 ± 0.02, valor que se encuentra muy por encima de lo determinado por otros autores, quienes reportaron valores entre 5 y 20%, es importante mencionar que las posibles variaciones de SV en las heces caninas se pueden deber a múltiples factores, que van desde la alimentación, edad, raza y hábitos del animal [9, 10, 11].

Por las características observadas tanto en inóculo como sustrato, se puede suponer que ambos materiales tienen propiedades adecuadas para realizar procesos de digestión anaeróbica, aunque en el presente artículo no se realizaron mediciones de la relación carbono/nitrógeno (C/N), según la

bibliografía reportada previamente los residuos de mango pueden presentar rangos de C/N entre 78 y 86 [14, 15, 16], mientras que las heces caninas se han reportado con valores C/N que oscilan entre 15- 17 [9, 10, 11], esto permite suponer que los materiales de manera individual no presentan valores de C/N adecuados (el rango óptimo de este parámetro se encuentra entre 15-30), pero la posible combinación de estos pudiera arrojar un valor dentro del rango adecuado para la digestión anaeróbica [5].

B. MONITOREO DE LAS CONDICIONES EN EL REACTOR

En la Fig. 2, se muestran los registros de las temperaturas tanto del ambiente como del interior del reactor; se observa que la temperatura interna del reactor generalmente estuvo por encima de la temperatura promedio ambiental que se presentó durante el periodo de digestión, lo que indica que durante el proceso se mantuvieron condiciones mesofílicas, para que la digestión anaeróbica se realizara de manera adecuada.

Por otro lado, en la Fig. 3 se muestran los valores en los que se mantuvieron algunos parámetros dentro del reactor (temperatura y pH). En cuanto a la temperatura se observó que fue en aumento hasta un punto máximo y luego se mantuvo en un valor constante.

En cuanto al pH se registró un ligero descenso a lo largo de los primeros días, eso pudiera indicar que entró en etapa de acidogénesis, posteriormente se mantuvo el pH sin presentar un incremento notable, esto es anormal porque usualmente al salir de la etapa de acidogénesis se observa un incremento en el pH (debido a las etapas de acetogénesis y de metanogénesis), lo que no se observó en el presente trabajo.

El comportamiento de estos valores concuerda con lo reportado por otros autores [9,10, 11], donde se registraron comportamientos similares en la temperatura y pH en digestiones anaeróbicas con materiales similares.

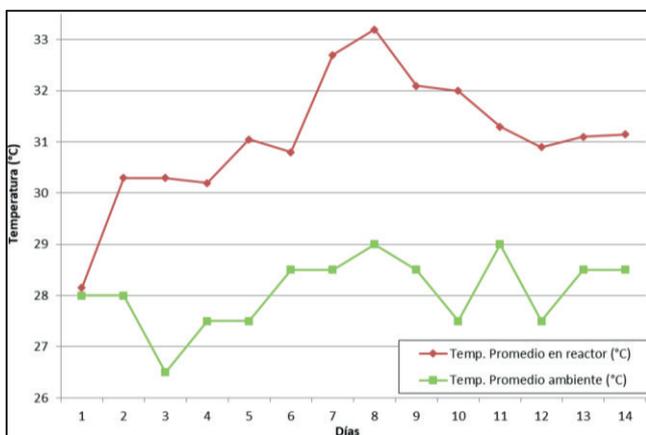


Fig. 2. Registro de temperaturas durante el proceso de digestión anaeróbica.

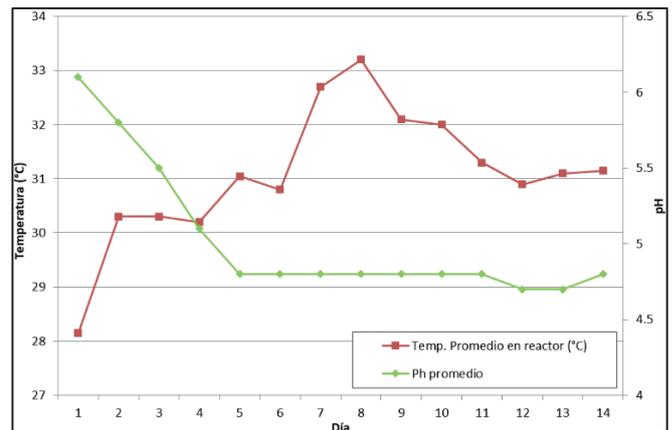


Fig. 3. Registro de las condiciones dentro del reactor.

C. PRODUCCIÓN DE METANO ACUMULADA EN LA CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Al finalizar el proceso de digestión anaeróbica se obtuvo una producción acumulada de 0.520 L de metano (CH_4); en relación con el volumen de operación del reactor (9.5 L) se obtuvieron 0.054 L de metano por cada litro de mezcla en el reactor ($\text{L CH}_4 / \text{L}$), indicando que la mezcla de materiales presenta buen potencial para la producción de metano.

Okoroigwe *et al.* [10], reportaron una producción de 0.508 L de biogás por L de mezcla en el reactor. Aunque los resultados en el presente trabajo son menores, los autores no realizaron discriminación entre el biogás generado y el contenido de metano, además de que el tipo de material utilizado presentaba diferentes características.

Phetyma *et al.* [9], obtuvieron una producción de biogás de entre 1.67 y 1.97 $\text{L CH}_4/\text{L}$, en una digestión de 28 días, utilizando heces de perro en co-digestión con residuos vegetales. Cabe la pena mencionar que en el trabajo realizado se buscaron optimizar las relaciones de inóculo-sustrato.

Otro factor importante en las diferencias obtenidas en el presente trabajo con otras referencias es el tamaño del reactor, ya que se empleó un biorreactor con volumen de 20 L (actual experimento), contra equipos con volúmenes entre 50 y 200 L (en los reportes previos); y se ha mencionado que utilizar volúmenes mayores en el proceso de digestión tiene un impacto importante en la cantidad de biogás/metano que se genera [5].

Por otro lado, diversos autores realizaron pruebas de la relación de carbono nitrógeno (C/N) de este tipo de materiales [9,10,11,14,15,16], donde se observó que generalmente los residuos de mango presentan valores altos (con rangos entre 78-86) y las heces caninas valores bajos (que oscilan entre 15-17), por lo que la idea de realizar co-digestiones con estos materiales puede potenciar la producción de biogás, aunque en el presente trabajo no se analizaron estos parámetros.

Una de las aplicaciones principales del biogás es la generación de calor y/o electricidad. La estimación de la electricidad que potencialmente se puede obtener a partir del biogás es recomendable para predecir la inversión y costo operativo de la potencial planta de digestión anaeróbica, así como el costo de producción del biocombustible, entonces, tomando en cuenta las características del biogás, tales como su poder calorífico de 36 MJ, que es el equivalente a un aproximado de 10 kWh por m³ [17], en el presente trabajo, con la producción obtenida de 0.520 L equivalentes a 0.0052m³ de metano producido a partir de 2.375 kg de mezcla es posible producir alrededor de 0.0052 kWh de electricidad.

Si se quiere aumentar la escala de producción mediante el aprovechamiento de las grandes cantidades de residuos generado por la agroindustria del mango y del sector doméstico de mascotas; por cada tonelada de mezcla se estarían produciendo aproximadamente 21.89 kWh de electricidad, lo que sería equivalente a la alimentación de 43 refrigeradores con un consumo de 0.5 kWh cada uno.

IV. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó la caracterización de los residuos agroindustriales de mango de la región y las heces caninas, donde se concluye que ambos materiales presentan altos valores de ST y SV, características adecuadas para procesos de digestión anaeróbica. Se recomienda para investigaciones posteriores el análisis de relación de carbono/nitrógeno (C/N) de los materiales usados para poder valorar y modificar los contenidos de las mezclas inóculo sustrato en busca de mejorar las condiciones del proceso.

Ambos residuos poseen las cualidades necesarias para procesos de digestión anaeróbica de manera individual, sin embargo, los estudios sobre el aprovechamiento de las heces caninas aún son muy escasos, lo que contrasta con la relevancia que tiene este tipo de residuo ya que con las grandes cantidades que se generan representan riesgos sanitarios importantes, por lo que el presente estudio puede representar un campo de oportunidad tanto para la investigación como para la industria, e incluso para los hogares.

Al aumentar la escala teórica de producción, se obtienen valores teóricos significativos en cuanto a la capacidad de producción de energía eléctrica, por lo que, con un análisis más detallado que involucre costos de producción, mantenimiento, etc. (que no fueron el fin de este documento), se podría sumar alguna propuesta interesante para el área de la generación.

Los resultados de potencial metanogénico del proceso semicontinuo de co-digestión, a pesar de encontrarse por debajo de otros trabajos (que manejan reactores con mayores volúmenes) abren la posibilidad del uso de estos materiales como posibles fuentes de biogás/biometano en la región. Lo

que coadyuvaría a mejorar el manejo de estos importantes residuos que en caso de no disponerse de manera adecuada pueden tener impactos negativos en el ambiente.

REFERENCIAS

- [1] Gobierno de México. "Energías renovables en México". [En línea]. Disponible en <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/2017-06-26-16-35-48/17-cienciahoy/1526-energias-renovables-en-mexico> (accedido el 14 de julio de 2022).
- [2] D. Castañeda, "México y la historia de sus transiciones energéticas", Nexos, 18 de marzo de 2021. Accedido el 14 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://economia.nexos.com.mx/mexico-y-la-historia-de-sus-transiciones-energeticas/>
- [3] C. Álvarez 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional.
- [4] "Reactor de biogas". SSWM. <https://sswm.info/es/gass-perspectives/tecnologias-de-tecnologias-de-saneamiento/recoleccion-y-almacenamiento/reactor-debiogas#:~:text=Un%20reactor%20de%20biogás%20es,parte%20superior%20de%20la%20cámara> (accedido el 15 de julio de 2022).
- [5] Santos-Ballardo DU, Rossi S, Reyes-Moreno C, Valdez-Ortiz A. 2016. Microalgae potential as a biogas source: current status, restraints and future trends. Rev Environ Sci Biotechnol. doi: 10.1007/s11157-016-9392-z
- [6] Secretaría de Economía de México. "Industria alimentaria". <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/industria-y-comercio/informacionsectorial/industria-industria-alimentaria> (accedido el 14 de julio de 2022).
- [7] "Proyecto para producción de biogás". Autotransporte. <https://www.autotransporte.mx/combustibles/proyecto-para-produccion-de-biogás/> (accedido el 15 de julio de 2022).
- [8] A. I. Reho, "Producción de mango en el sur de Sinaloa", Hortalizas, 14 de mayo de 2015. Accedido el 15 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.hortalizas.com/cultivos/produccion-de-mango-en-el-sur-de-sinaloa/>
- [9] Phetyima N., Wanthonga T., Kannikaa P., Supngama A. 2015. Biogas Production from Vegetable Waste by using Dog and Cattle Manure. Energy Procedia 79: 436 – 441.
- [10] Okoroigwe E.C., Ibeto C.N., Okpara C.G. 2010. Comparative study of the potential of dog waste for biogas production. Trends in Applied Sciences Research. 5(1): 71-77.
- [11] Seyitoglu S.S., Avcioglu E., Haboglu M. R. 2022. Determination of the biogas potential of animal waste and plant location optimization: A case study. International Journal of energy Research. 46(14) 20324-20338.
- [12] U.S. Environmental Protection Agency. 2001. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solid, and Biosolids Draft, EPA-821-R-01-015 January 2001. Disponible: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1002CZ8.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000016%5CP1002CZ8.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>
- [13] D.U. Santos-Ballardo, X. Font, A. Sánchez, R. Barrena, S. Rossi, A. Valdez-Ortiz. 2015. Valorisation of biodiesel production wastes: anaerobic digestion of residual *Tetraselmis suecica* biomass and co-digestion with glycerol. Waste Manag. Res. 33(3), 250–257, <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X15572182>.
- [14] K. D. Luna Avelar, N. Y. Mejías Brizuela, A. Valdez Ortiz, L. J. Germán Baez, D. U. Santos Ballardo. 2018. Efecto de pre-tratamientos sobre la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de la

industria procesadora de mango. Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias. 9 (21): 1562–1580.

- [15] Y. Gonzáles Arenas, "Análisis del potencial de producción de metano a partir de residuos agroindustriales de mango", Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, 2019. Accedido el 19 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible: <http://repositorio.upsin.edu.mx/formatos/tesis/YadrissiaGonzalezArenas11746.pdf>
- [16] K.D. Luna-Avelar, R. Barrena, X. Font, A. Sánchez, D.U. Santos-Ballardo, L.J. Germán-Báeza, A. Valdez-Ortiza. 2021. A preliminary assessment of anaerobic co-digestion potential of mango and microalgal residue biomass using a design of experiments approach: Effect of thermal, physical and biological pretreatments. Food and Bioproducts Processing 128: 143–152.
- [17] S. Suhartini, Y. P. Lestari y I. Nurika, "Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 230, p. 012075, febrero de 2019. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012075>

AGRADECIMIENTOS

A los programas educativos de Ingeniería en Energía y Biotecnología UPSIN, por brindar su apoyo en cuanto a equipamiento, a la desecadora de mango “Los Aguilares Produce, S. de R.L. de C.V.”, y Jean Carlo Velarde por la donación del material, a la laboratorista Rosa Guadalupe Brion Gonzales, y a la Ingeniera en Energía Mara Fernanda Juárez Cota, Julián Osuna y Christian Beltrán Sosa, por el apoyo técnico brindado, y finalmente al Dr. David Ulises Santos Ballardo por su acompañamiento y asesorías brindadas a lo largo de este proyecto.

BIOGRAFÍAS



JEAN CARLO VELARDE-MEZA Actualmente cursa el Séptimo cuatrimestre de la Licenciatura de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa en Mazatlán, México. Experiencia en la elaboración de proyectos para la solución de problemas energéticos. Sus líneas de interés son la Energía de la Biomasa, la Eficiencia Energéticas y las Energías Renovables.



LITZY JHOANNA TIZNADO-OSUNA. Cursa el séptimo cuatrimestre de la Licenciatura de Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa. Aficionada a la ciencia en todas sus expresiones. Sus líneas de interés son la Energía Nuclear, Energía del Hidrógeno, Física en general y las Energías Alternativas.



YOSHLIN M. AGUILERA-HERNÁNDEZ Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería en Energía en la Universidad Politécnica de Sinaloa. Con capacidad para desarrollar soluciones a problemáticas sociales y ambientales a través de investigaciones cuyos objetivos son aportar en ciencia y tecnología, experiencia en desarrollo y creación de prototipos enfocados al área de fotovoltaica e hidráulica. Capacidad y experiencia en desarrollo y redacción en trabajos de investigación social, participación en olimpiadas de biología y certificada en instalación fotovoltaica por la fundación Carlos Slim. Actualmente interesada en trabajos de investigación enfocados a la bioenergía.



DAVID U. SANTOS-BALLARDO Ingeniero Bioquímico; Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos; Doctor en Biotecnología Ambiental, por la Universidad Autónoma de Sinaloa; Profesor-Investigador de la Universidad Politécnica de Sinaloa; Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2017; Miembro del Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos como Investigador Honorífico;

Miembro de la Red Mexicana de Bioenergía y de la Red Temática de Bioenergía; Autor de publicaciones científicas en revistas indizadas, actualmente desarrollando investigación relacionada con el desarrollo de energías renovables, específicamente biocombustibles de segunda y tercera generación, así como el desarrollo de biorrefinerías que promuevan la sostenibilidad de diversos procesos para la generación de bioproductos de alto valor.