

Biometanización de residuos ganaderos mediante codigestión anaerobia: efecto del pretratamiento térmico a bajas temperaturas

Alejandra Ramírez-Martínez ¹, Luis Antonio López-Escobar ², Juan Díaz-Vela ² y Noemi Nava-Valente ^{3,*}

¹ Colegio de Posgraduados Campus Veracruz, Carretera Xalapa-Veracruz Km. 88,5, Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, 91690, Veracruz, México.

² Universidad Politécnica de Huatusco, Calle 22 Sur S/N Col. Centro, 94100. Huatusco, Veracruz, México.

³ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Unidad Noreste, Autopista Monterrey-Aeropuerto, Vía de la Innovación 404, Parque PIIT, 66628, Apodaca, Nuevo León, México.

* Autor de correspondencia: nnav@ciatej.mx

Energías Renovables (Biomasa). Ponencia Presencial.

Recibido: 29 de mayo de 2023

Aceptado: 28 de agosto de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: En México las actividades ganaderas generan 34,785,528 toneladas anuales de estiércol, de las cuales 9.19 millones de toneladas son de estiércol porcícola y 7.57 millones de toneladas de estiércol bovino, además de residuos remanentes de forraje cultivado para alimentación del ganado; las características inherentes de estos residuos los perfilan como biomasa con potencial de aprovechamiento para la producción de bioenergía. Por lo tanto, se estudió la codigestión anaerobia del estiércol porcino, estiércol bovino y forraje con el objetivo de: a) evaluar el efecto del pretratamiento térmico a baja temperatura en la solubilización de materia orgánica y producción de biometano y b) evaluar el efecto sinérgico en la cinética de producción de biometano. La metodología consistió en el muestreo y acondicionamiento de los residuos, evaluación del pretratamiento térmico en la solubilización de materia orgánica, digestión anaerobia en lotes, evaluación cinética mediante el modelo de Gompertz modificado y determinación de rendimiento de la codigestión. La aplicación del pretratamiento térmico a baja temperatura (80°C durante 60 y 90 min) favoreció la solubilización de materia orgánica en los monosustratos y cosustratos, reportándose grados de solubilización entre 1.35-5.12%. Así mismo, el pretratamiento térmico impactó positivamente en remociones de SV (38.3-42.5%), aumentó el rendimiento de biogás en 20% y el rendimiento de metano en 17.7%. El coeficiente de correlación para el modelo de Gompertz modificado alcanzó valores de 0.97-0.99 para todos los grupos de prueba. Por último, la codigestión anaerobia mostró efectos sinérgicos positivos (1.42) para la producción de biometano y su posible aprovechamiento como biomasa para la producción de energía renovable.

Palabras clave: Biometano; Codigestión anaerobia; Pretratamiento térmico; Biomasa.

Biomethanation of livestock waste by anaerobic co-digestion: effect of thermal pretreatment at low temperatures

Abstract: In Mexico, livestock activities generate 34,785,528 tons of manure per year, of which 9,198 million tons are pig manure and 7,578 million tons of cow manure, in addition to remaining residues of cultivated forage for cattle feed; the inherent characteristics of these residues outline them as biomass with the potential to be used for the production of bioenergy. Therefore, the anaerobic co-digestion of pig manure, bovine manure, and forage was studied with the objective of: a) evaluating the effect of PTT at low temperatures on the organic matter solubilization and biomethane production and b) evaluating the synergistic effect on the biomethane production kinetics. The methodology consisted of sampling and conditioning of the residues, evaluation of the thermal pretreatment in the solubilization of organic matter, anaerobic digestion in batches, kinetic evaluation using the modified Gompertz model, and determination of co-digestion performance. Applying thermal pretreatment at low temperatures (80°C for 60 and 90 min) favored the solubilization of organic matter in mono substrates and cosubstrates, reporting solubilization degrees between 1.35-5.12%. Likewise, thermal pretreatment had a positive impact on VS removals (38.3-42.5%), increased biogas yield by 20%, and methane yield by 17.7%. The correlation coefficient for the modified Gompertz model reached values of 0.97-0.99 for all test groups. Finally, anaerobic codigestion showed positive synergistic effects (1.42) for producing biomethane and its possible use as biomass for producing renewable energy.

Keywords: Biomethane; Anaerobic Codigestion; Thermal pretreatment; Biomass.

Introducción

Una de las principales fuentes de energía en el mundo son los combustibles fósiles, que indirectamente, han contribuido al progreso tecnológico, económico y social (Kasinath *et al.*, 2021), sin embargo, las estrategias energéticas globales, se han encaminado a la utilización de recursos renovables para la producción de bioenergía (Koupaie *et al.*, 2019), generando en las últimas décadas un creciente interés en la recuperación de energía a partir de fuentes

orgánicas o biodegradables (biomasa), como desechos animales, desechos de alimentos, residuos lignocelulósicos y lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas residuales (Karrabi *et al.*, 2023).

En este sentido, en México las actividades ganaderas generan 34,785,528 toneladas anuales de estiércol, de las cuales 9.198 millones de toneladas son de estiércol porcícola (EP) y 7.578 millones de toneladas de estiércol bovino (EB) (INEGI, 2020), ambos tipos de estiércol están asociados con la producción animal y contienen elevados contenidos de macronutrientes (particularmente carbono) y micronutrientes (Ramírez *et al.*, 2020; Raza *et al.*, 2020). En adición, otro subproducto asociado con la producción animal es el Forraje (F), el cual posee buenos contenidos de carbono y materia orgánica fermentable. Las características inherentes de estos residuos los perfilan como biomasa con potencial de aprovechamiento para la producción de bioenergía (Kolackova *et al.*, 2023). Además, el aprovechamiento simultáneo de estos residuos resolvería dos problemas paralelos, la gestión eficaz de la biomasa (disminución de infraestructura para el tratamiento, traslado y disposición de residuos) y el suministro de materia prima para las operaciones de bioenergía.

Una tecnología robusta que permite el tratamiento y revalorización de este tipo de biomasa es la codigestión anaerobia (CDA), ya que dos o más sustratos son aplicados al mismo tiempo en los reactores anaerobios para convertirlos en biogás (compuesto principalmente de biometano y dióxido de carbono), una fuente de energía renovable (Peyrelasse *et al.*, 2021). La CDA propicia el efecto sinérgico entre los sustratos digeridos brindando mayor estabilidad al proceso (Nava *et al.*, 2022). Sin embargo, la limitante en la aplicación de esta tecnología es la lenta degradación del material orgánico contenido en los residuos, impactando negativamente la eficiencia del proceso (Gahlot *et al.*, 2022).

La aplicación de diversos tipos de pretratamientos ha sido estudiada con la finalidad de mejorar la eficiencia de la CDA; El pretratamiento térmico (PTT) es un tipo de pretratamiento físico que se utiliza para pretratar los residuos orgánicos. Esta técnica de pretratamiento se realiza aplicando temperatura en el rango entre 50 y 250°C con la finalidad de acelerar la hidrólisis y mejorar la biodegradabilidad de la biomasa mediante la ruptura de los enlaces químicos en la pared celular, liberando biopolímeros intracelulares y extracelulares a la fase soluble (Ávila *et al.*, 2020) y la inactivación de microorganismos patógenos presentes en los sustratos (Li *et al.*, 2021).

Estudios realizados por Kim *et al.*, (2022) evaluaron el efecto del PTT a temperaturas de 100, 120, 150 y 180 °C durante 10, 20, 30, 60 y 120 min en la codigestión de mezclas de estiércol de ganado, ensilaje de maíz y pulpa de remolacha en condiciones mesófilas, obteniéndose un incremento en el rendimiento de biogás de 8.3–100.3% y demostrando que la CDA con pretratamiento térmico es una opción viable para el manejo de este tipo de residuos.

Por otra parte, el nivel de éxito del PTT ha sido demostrado incluso a escala piloto, Venegas *et al.*, (2022) monitorearon un reactor CSRT a escala piloto (1 m³) durante la digestión anaerobia de estiércol de cerdo con pretratamiento térmico (80 °C) operado a temperatura termofílica (45 °C) y concluyeron que el pretratamiento térmico contribuyó a una producción estable de biogás con una composición de 69% de CH₄, a un buen control de acidificación y que el pretratamiento térmico es una buena opción cuando se realiza una adecuada integración energética.

Por lo tanto, este estudio investigó la codigestión anaerobia del estiércol porcino, estiércol bovino y forraje con el objetivo de: a) evaluar el efecto del PTT a baja temperatura en la solubilización de materia orgánica y producción de biometano. b) evaluar el efecto sinérgico en la cinética de producción de biometano.

Materiales y Métodos

Muestreo y acondicionamiento de residuos

Los residuos empleados (EP, EB y F) fueron muestreados de una granja ubicada en el municipio de Medellín de Bravo, Veracruz semanalmente. Los residuos fueron muestreados individualmente y trasladados al laboratorio en sacos de plástico para su acondicionamiento. Después de la recolección, el forraje se redujo de tamaño hasta obtener trozos entre 2-5 cm de longitud, posteriormente fueron secados al sol y sometidos a un proceso de reducción de tamaño medio de 3 mm con un molino de cuchillas de laboratorio. Los tres residuos fueron acondicionados hasta obtener una concentración de Sólidos Totales (ST) entre 5-6% mediante dilución.

Una vez acondicionados los residuos se procedió a elaborar la mezcla de ellos compuesta volumétricamente por 30% EP, 30% EB Y 40% F, para asegurar la incorporación homogénea de los tres residuos se mezcló con un agitador de paletas a 115 rpm y se llevó a refrigeración a 4°C para su posterior uso. La Tabla 1 muestra los valores promedio y desviación estándar de tres réplicas por parámetro físico o químico empleado para la caracterización de los sustratos crudos. Los métodos analíticos empleados para la caracterización de sustratos se describen en la sección Métodos analíticos.

Tabla 1. Caracterización de sustratos

	EP	EB	F	EP+EB+F
Sólidos Totales (%)	6.30±0.25	6.21±0.36	6.95±0.45	6.50±0.21
Sólidos volátiles (%)	84.55±1.14	68.02±4.13	68.65±2.23	73.22±1.54
pH	6.91±0.09	7.08±0.03	5.96±0.13	6.68±0.22
DQO Total (mg/L)	2654.9±23.4	1012.3±16.3	3678.47±25.1	2144.67±15.2
DQO soluble (mg/L)	1583.1±18.30	201.4±2.47	710.1±1.23	785.13±11.2

Pretratamiento térmico

El pretratamiento térmico clasificado de baja temperatura es aquel que opera a < 100 °C de acuerdo a lo reportado por Kor-Bicakci *et al.*, 2019. Para fines de este estudio, la temperatura de exposición seleccionada fue de 80 °C durante 60 y 90 minutos, el pretratamiento térmico se llevó a cabo en reactores herméticamente sellados, con agitación magnética y controlador de temperatura, capacidad de 1 L y volumen útil de 0.7 L. Una vez concluido el tiempo del pretratamiento, las muestras se retiraron del reactor, se enfriaron y analizaron. El pretratamiento térmico se aplicó a los residuos individuales y a la mezcla elaborada. Cada experimento se realizó por triplicado.

El contenido de Demanda Química de Oxígeno (DQO) total y soluble fue evaluado en las muestras crudas y pretratadas para determinar el porcentaje de solubilización de materia orgánica. Las fracciones solubles de las muestras crudas y de pretratamiento se obtuvieron mediante centrifugación a 12,000 rpm durante 15 min y filtración del sobrenadante con una membrana de 0.2 µm.

El porcentaje de solubilización de DQO se calculó utilizando la siguiente Ecuación 1:

$$\text{Grado de solubilización (\%)} = \frac{SCOD_P - SCOD_i}{TCOD_i - SCOD_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde, SCOD_p es la Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg/L) de la muestra después del pretratamiento, SCOD_i es la Demanda Química de Oxígeno Soluble (mg/L) de la muestra sin pretratamiento y TCOD_i indica la concentración en mg/L de la Demanda Química Oxígeno Total de las muestras antes del pretratamiento (Koch *et al.*, 2015).

Digestión anaerobia en lotes

Se utilizaron como reactores discontinuos botellas de vidrio selladas de 1 L con un volumen de trabajo de 0.7 L para la monodigestión y codigestión de los residuos crudos y pretratados térmicamente. Cada botella fue sellada y acondicionada con dos puertos destinados para muestreo de gas y una entrada de alimentación. La temperatura de operación se mantuvo a 35±2°C con agitación intermitente a 150 rpm. Los digestores se cargaron con una relación volumétrica de 70% sustrato y 30% inóculo, el cual se recolectó del exceso de biomasa de reactores anaerobios mesofílicos operados a nivel laboratorio para el tratamiento de lodos residuales. Las características esenciales del inóculo fueron pH = 7.2, 2.3% ST y 74% Sólidos Volátiles (SV). Durante esta etapa experimental se monitoreó la remoción de SV, pH, producción y rendimiento de biometano.

Métodos analíticos

Todos los análisis fueron realizados por triplicado. Los siguientes parámetros se determinarán de acuerdo al Standard Methods (2017), los ST y SV fueron determinados por el método 2540G, las determinaciones de Demanda Química de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno Soluble se realizaron por el método 5220D utilizando un espectrofotómetro Thermo Scientific™ Genesys 20. Las fracciones solubles de las muestras crudas y con pretratamiento se obtuvieron mediante centrifugación a 12,000 rpm durante 15 min y filtración del sobrenadante con una membrana de 0.2 µm. El pH se determinó utilizando un potenciómetro Thermo Scientific TM Orion Star Model A1110.

El volumen de biogás se mide por el volumen de agua reemplazada y la composición del gas producido en cada prueba (O₂, CH₄, CO₂ y N₂) se determinó como el valor medio del gas en cada gasómetro empleando un dispositivo de análisis de cromatografía de gases fuera de línea con un cromatógrafo de gases Thermo Scientific con una columna Heliflex AT-Mol Sieve (30 m × 0.53 mm de diámetro), una Heliflex AT-Q (30 m × 0.53 mm de diámetro de longitud) y un detector de conductividad térmica. En la primera columna se analizaron O₂, N₂, CH₄ y CO₂, mientras que en la segunda columna se analizaron CH₄ y CO₂. El gas utilizado como acarreador fue helio.

Análisis estadístico

Los datos se presentan como valor medio y se determinó la desviación estándar (±).

El análisis estadístico se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA), la diferencia entre los resultados se consideró significativa si el valor de *p* era inferior a 0.05, se realizó ANOVA con un nivel de confianza del 95 %. El análisis estadístico se realizó utilizando el software GraphPad Prism® Versión 9.

Modelo cinético de Gompertz modificado

El modelo de Gompertz modificado es una curva típica en "forma de S", que tiene en cuenta la duración de la fase de retraso. Los parámetros para evaluar la eficiencia de DA se determinan de la siguiente manera:

$$CM_t = CM_m \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m \cdot e}{CM_m} \cdot (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (2)$$

Donde CM_t es el volumen acumulado de metano con respecto al tiempo (t) en días; CM_m es el potencial de metano previsto de los sustratos digeridos (L); e es la constante de Euler (2.71821828); R_m es la tasa máxima de producción de metano pronosticada (L/d); λ es el tiempo de fase de retraso en días (Zhang *et al.*, 2022).

Se usó la regresión no lineal de mínimos cuadrados para determinar los parámetros cinéticos del modelo usando el software GraphPad Prism® Versión 9.

Efecto sinérgico e índice de rendimiento de la codigestión.

La evaluación del efecto sinérgico en el rendimiento de metano entre los sustratos empleados (EP, EB, F) se cuantificó mediante el índice de rendimiento de codigestión (CPI por sus siglas en inglés), el cual es calculado mediante las Ecuaciones 3 y 4:

$$CPI_{I,n} = \frac{CMI_{i,n}}{\overline{CMY}_{oi,n}} \quad (3)$$

$$\overline{CMY}_{oi,n} = \sum_i^n \%VS_i CMY_{o,i} \quad (4)$$

donde CMI_{i,n} es el rendimiento acumulativo de metano en la codigestión anaeróbica; CMY_{o,i}, n es el rendimiento de metano promedio ponderado que se determinó con base en el contenido de SV (%SV) de los sustratos y sus correspondientes rendimientos de metano acumulados en monodigestión (CMY_{o,i}). Los efectos sinérgicos de la

codigestión en la producción de metano podrían determinarse como: $CPI > 1.0$ indica un efecto sinérgico; y $CPI \leq 1.0$ indica un efecto antagónico (Liu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022)

Resultados y Discusión

Efecto del pretratamiento térmico en la solubilización de materia orgánica

El pretratamiento térmico incrementó la concentración de DQO soluble (Tabla 2) en los monosustratos y mezcla de residuos, reportándose que el tiempo de exposición al pretratamiento térmico tuvo un efecto estadísticamente significativo ($p < 0.05$) en la solubilización de la DQO, esto se reflejó en el porcentaje de grado de solubilización, en donde se obtuvieron porcentajes entre 1.5-5.12%, destacando que el sustrato con mayor complejidad para hidrolizar fue el forraje el cual alcanzó valores de 1.35 y 2.35% para tiempos de 60 y 90 min respectivamente; en cuanto a la mezcla de residuos agroindustriales, esta alcanzó un porcentaje de solubilización de 3.86% al pretratar a 80°C y 90 min. Por otra parte, el estiércol de cerdo fue el sustrato con mayor concentración de DQO soluble, por lo que alcanzó valores mayores en porcentaje de grado de solubilización.

Anteriormente, Han *et al.*, (2017) reportó las condiciones óptimas del pretratamiento térmico a 165°C y 50 min alcanzando 45.2% de grado de solubilización para lodos con alto contenido de ST. De igual manera, Şenol *et al.*, (2020) reportaron que el pretratamiento térmico a 180°C y 60 min incrementó de 16000 mg/L a 35000 mg/L la concentración de DQO soluble en una mezcla de estiércol de ganado, ensilaje de maíz y pulpa de remolacha. En concordancia con los estudios citados, el pretratamiento térmico es eficaz para mejorar la solubilización e hidrólisis de residuos con elevadas concentraciones de ST, sin embargo, los porcentajes de solubilización reportados en el presente estudio son inferiores debido a la aplicación de bajas temperaturas de pretratamiento, efecto que pudiera representar una ventaja en el proceso de digestión anaerobia ya que, según lo citado por Ahmed *et al.*, (2021) el pretratamiento a alta temperatura (>150 °C) da como resultado una producción de biogás reducida e incluso más baja que el sustrato no pretratado, aunque el grado de solubilización de DQO sea alto.

Tabla 2. Grado de solubilización pretratamiento térmico

	EP		EB		F		EP+EB+F	
	DQO soluble (mg/L)	Grado de solubilización (%)	DQO soluble (mg/L)	Grado de solubilización (%)	DQO soluble (mg/L)	Grado de solubilización (%)	DQO soluble (mg/L)	Grado de solubilización (%)
Residuo crudo	1583.1	0	201.4	0	710.1	0	785.13	0
80°C 60 min	1708.2	4.72	232.1	3.04	759.6	1.35	858.3	3.42
80°C 90 min	1719.1	5.12	239.4	3.76	796.6	2.35	867.8	3.86

Digestión anaerobia en lotes

La remoción de SV representa el rendimiento de biodegradabilidad de los mono y cosustratos, los valores reportados en los sustratos crudos entre 35.3-38.3% (Tabla 3); el menor porcentaje de remoción de SV se obtuvo al digerir forraje como mono sustrato efecto que puede atribuirse a que en su composición existe una mayor concentración de fibras, en particular lignina (Chiumenti *et al.*, 2018). En cambio, al aplicar el pretratamiento térmico el porcentaje de remoción de SV aumentó, reportándose valores entre 38.3-42.5%, el mayor porcentaje de remoción de SV fue el reportado para EP con 90 min de tiempo de exposición, en cuanto a la mezcla de residuos, el porcentaje de remoción fue ligeramente menor para el mismo pretratamiento, reportando se un valor de 41.8%. En este sentido, Principi *et al.*, (2019) reportaron que el pretratamiento térmico entre 50 y 250 °C es considerado una tecnología para el aumento de la degradabilidad anaerobia de sustratos con alto contenido orgánico. En adición, el análisis estadístico reveló que el pretratamiento térmico tiene un efecto significativo ($p < 0.05$) en la remoción de SV.

Por otro lado, los metanógenos son muy sensibles a las fluctuaciones del pH del sistema y funcionan a su máxima capacidad dentro del rango limitado de pH de 6,5 a 7,2 (Zhang *et al.*, 2014), valores entre los que oscilaron los promedios de pH de todos los digestores (7.34-8.01). Se observó que los valores más bajos de pH se obtuvieron al

digerir los monosustratos y mezcla de residuos sin pretratamiento térmico, sin embargo, al aplicar un mayor tiempo de pretratamiento el pH de los reactores aumentó, efecto que está relacionado con una mayor capacidad amortiguadora que evita la caída de pH en los reactores anaerobios operados con pretratamiento térmico, debido al equilibrio alcanzado en la generación y consumo materia orgánica biodegradable, de acuerdo a lo reportado por Azarmanesh *et al.*, (2020).

El efecto del pretratamiento térmico en el rendimiento de biogás y de metano dados por la producción de gas en L sobre unidad de masa removida, se reportaron los menores rendimientos para el forraje sin pretratar, en cambio, los mayores rendimientos fueron registrados para la mezcla de residuos pretratada durante 90 min y 80°C, el incremento en el rendimiento de biogás para la mezcla de residuos pretratados térmicamente fue de 20% en relación a la prueba testigo, mientras que el incremento en el rendimiento de metano fue de 17.7%.

Un efecto similar fue reportado por Du *et al.*, (2019) quien evaluó el pretratamiento hidrotérmico y termoalcalino a baja temperatura en la digestión anaerobia de paja de arroz, los resultados indicaron que la aplicación del pretratamiento termoalcalino fue mas eficiente que la aplicación del pretratamiento hidrotérmico reflejándose en un aumento en el rendimiento de biogás de 24.04%, superando los rendimientos de la prueba control y del pretratamiento hidrotérmico.

Tabla 3. Resumen monitoreo digestión anaerobia en lotes

Parámetro	EP			EB			F			EP+EB+F		
	Residuo crudo	80°C 60 min	80°C 90 min	Residuo crudo	80°C 60 min	80°C 90 min	Residuo crudo	80°C 60 min	80°C 90 min	Residuo crudo	80°C 60 min	80°C 90 min
Remoción SV (%)	35.3±3	39.9±1.2	42.5±0.81	37.8±1.5	38.3±0.66	39.3±0.41	35.9±0.14	38±0.13	39.4±0.57	38.3±0.21	41.1±0.42	41.8±0.32
pH	7.52	7.61	7.65	7.37	7.51	7.63	7.4	7.5	7.53	7.45	7.57	7.67
Y _{biogás} (L/gSV _{rem})	0.99±0.01	1.12±0.05	1.13±0.03	0.69±0.03	0.79±0.02	0.99±0.03	0.59±0.03	0.72±0.03	0.91±0.02	1.13±0.1	1.25±0.2	1.36±0.02
Y _{CH₄} (L/gSV _{rem})	0.66±0.13	0.75±0.08	0.80±0.07	0.48±0.01	0.49±0.01	0.67±0.02	0.43±0.02	0.45±0.02	0.62±0.03	0.79±0.01	0.78±0.1	0.93±0.01

Modelación cinética Gompertz modificado

Los datos de producción de biometano acumulado de cada grupo de prueba se ajustaron al modelo de Gompertz modificado (Figura 1). La tabla 4 resume los parámetros cinéticos, donde se destaca que el coeficiente de correlación para el modelo de Gompertz modificado alcanzó valores de 0.97-0.99 para todos los grupos de prueba, lo que demuestra un ajuste aceptable del modelo con los datos experimentales. Estudios previos han reportado que este modelo ofrece un nivel alto en consistencia con los datos experimentales (Ranjbar *et al.*, 2022).

Tabla 4. Parámetros cinéticos modelo Gompertz modificado

	EP				EB				F				EP+EB+F			
	CMm	Rm	λ	R ²	CMm	Rm	λ	R ²	CMm	Rm	λ	R ²	CMm	Rm	λ	R ²
Raw	1.29	0.06	1.88	0.98	0.83	0.03	4.42	0.97	1.25	0.04	6.19	0.98	1.49	0.09	3.34	0.97
80°C 60 min	1.59	0.07	1.77	0.98	0.89	0.04	4.51	0.98	0.88	0.03	4.42	0.97	1.56	0.10	3.29	0.98
80°C 90 min	2.03	0.08	1.58	0.99	1.27	0.05	4.31	0.98	0.98	0.04	4.64	0.98	1.89	0.12	3.40	0.98

Los resultados demuestran que el sustrato con menor potencial de generación de metano y menor tasa máxima de metano fue el forraje; Shamurad (2020) asegura que la obtención de valores bajos en el potencial de metano y tasa máxima de metano se atribuye a la biodegradabilidad del sustrato, la fracción de materia orgánica que se puede utilizar para la síntesis de material celular y para energía, por ejemplo, el contenido de lignina refractaria, estas condiciones

prolongan la fase de retraso (λ), el presente estudio reporta un comportamiento similar, al ser la fase de retraso (λ) mas prolongada la reportada para el forraje.

En cuanto a EP, se reportó un aumento en el potencial de metano previsto y en la tasa máxima de producción de metano, además de observarse que la fase de retraso (λ) disminuye al aplicar los pretratamientos térmicos con respecto a la prueba testigo, el pretratamiento térmico cambia la composición del sustrato, transformando el material lignocelulósico contenido en el estiércol en componentes solubles simples que pueden degradarse fácilmente durante la actividad enzimática, aumentando los niveles de demanda química de oxígeno (DQO) y mejorando el rendimiento de metano de acuerdo con Neshat *et al.*, 2017.

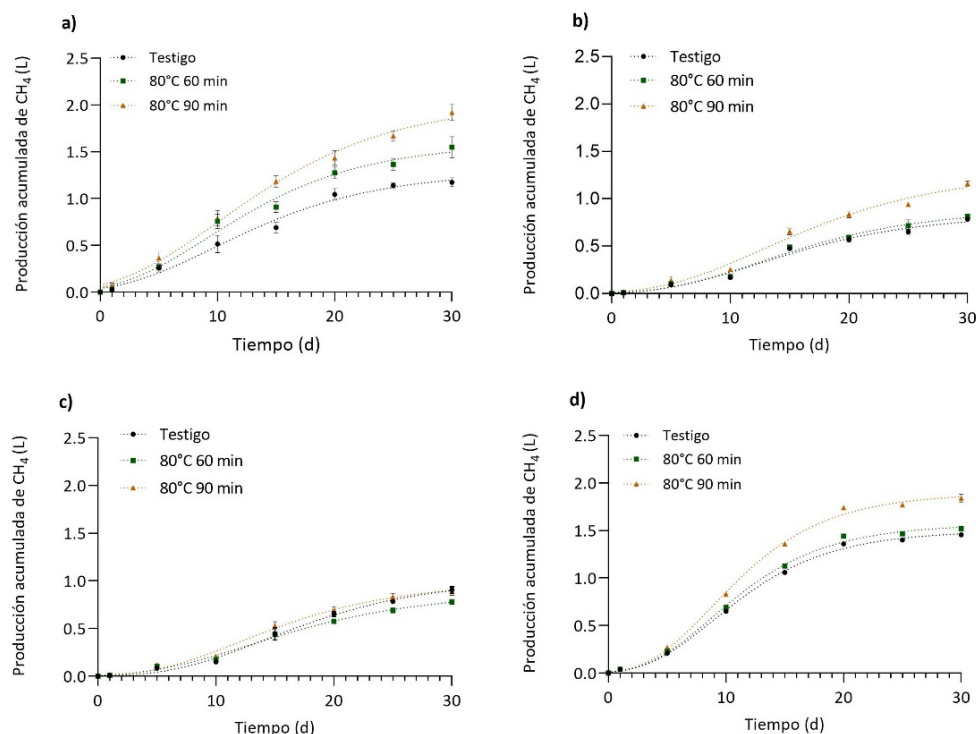


Figura 1 Producción acumulada de metano. (a) Estiércol porcino. (b) Estiércol bovino. (c) Forraje. (d) EP+EB+F

Por otra parte, EB presentó una reducción en la fase de retraso (λ) con la aplicación del pretratamiento térmico, sin embargo, los valores obtenidos para este parámetro, el potencial de metano previsto y tasa máxima de producción de metano, son similares con los obtenidos para F, efecto que puede atribuirse a que en su composición más del 50% de ST son componentes lignocelulósicos que incluyen celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes considerados recalcitrantes y resistentes a la degradación microbiana (Li *et al.*, 2020), mismos que con las condiciones de pretratamiento propuestas en este estudio no alcanzan la biodisponibilidad necesaria para ser aprovechadas por bacterias metanogénicas.

El análisis cinético de la codigestión anaerobia de EP, EB y F reveló que el contenido de F retardó el tiempo de degradación de la mezcla, estudios previos han confirmado que las mezclas con alto contenido de material lignocelulósico aumentan la fase de latencia, incluso por encima de los sustratos monodigeridos (Lahbab *et al.*, 2021). Con base en el análisis anterior, los resultados del modelo cinético indicaron que F es el sustrato con menos potencial para la producción de biometano y con mayor etapa de fase de retraso (λ), incluso con la aplicación del pretratamiento térmico a baja temperatura, comportamiento que se asemeja al monosustrato EB, sin embargo, el sustrato con mayor potencial de generación de biometano es EP, mismo que con la proporción porcentual empleada en este estudio (30%) contribuyó a disminuir los valores en la fase de latencia, aumentar los valores del potencial previsto de metano y tasa máxima de producción de metano.

Efecto sinérgico e índice de rendimiento de la codigestión

Para indicar si existe el efecto sinérgico en la CDA de EP, EB y F, se evaluó el CPI; Una sinergia >1 indica un efecto sinérgico positivo, mientras que una sinergia inferior al 1 indica un efecto sinérgico negativo. Una sinergia igual al 1 indica que no existe ningún efecto sinérgico. La codigestión anaerobia de EP, EB y F, mostró efectos sinérgicos positivos (1.42).

Este efecto ha sido reportado por diversos autores en la digestión de diferentes residuos con distintas tasas de biodegradabilidad; Zhang *et al.*, (2022) investigaron el desempeño de los residuos de vinagre de sorgo para mejorar la producción de metano a partir de estiércol de ganado durante la digestión anaeróbica en estado sólido. El residuo de vinagre de sorgo fue codigerido con estiércol de ganado vacuno, ovino y porcino, respectivamente, concluyendo que el estiércol de ganado vacuno y porcino ejercieron un efecto sinérgico positivo en la CDA, por el contrario, el estiércol de cerdo fue el residuo que menor sinergia presentó en la CDA dada la posible inhibición en la conversión de compuestos orgánicos debido a la presencia de elevados contenidos de sales (con 1.35 g/L Na^+ y 3.43 g/L K^+)

Por otra parte, Şenol *et al.*, (2020), investigaron la producción de biogás de mezclas de estiércol de ganado, ensilaje de maíz y pulpa de remolacha azucarera para determinar las proporciones adecuadas de la CDA y posterior aplicación de pretratamientos térmicos a 100, 120, 150 y 180°C con 10,20,30,60 y 120min, reportando efectos sinérgicos positivos en los grupos de prueba en 28 días de digestión anaerobia.

Conclusiones

La aplicación del pretratamiento térmico a baja temperatura (80°C durante 60 y 90 min) favoreció la solubilización de materia orgánica presente en el estiércol porcícola, estiércol bovino y forraje, así como en la mezcla de los mismos, los porcentajes de grado de solubilización reportados fueron de 1.35-5.12%, a medida que incrementó el tiempo de exposición a la temperatura de pretratamiento, aumentó la concentración de DQO soluble y el porcentaje de solubilización. El pretratamiento térmico favoreció la remoción de SV, producción de biogás y la calidad del mismo al aumentar el porcentaje de CH_4 en los monosustratos digeridos y en la codigestión anaerobia, reportándose los mayores rendimientos de biogás y metano al pretratar la mezcla de residuos a 80°C y 90 min. Los datos experimentales se ajustaron con éxito al modelo modificado de Gompertz alcanzando valores entre 0.97-0.99.

Las proporciones empleadas en la mezcla de residuos y los residuos empleados tuvieron un efecto sinérgico positivo para la producción de biometano y su posible aprovechamiento como biomasa para la producción de energía renovable.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen el apoyo brindado por el Colegio de Posgraduados Campus Veracruz, el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco y la Universidad Politécnica de Huatusco

Bibliografía

- Ahmed, B., Tyagi, V.K., Aboudi, K., Naseem, A., Álvarez-Gallego, C. J., Fernández-Güelfo, L. A., ... & Romero-García, L. I. (2021). Thermally enhanced solubilization and anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. *Chemosphere*, 282, 131136.
- American Public Health Association (2017) Standard methods for the examination of water and wastewater, American Water Works Association, & Water Environment Federation.
- Avila, R., Carrero, E., Crivillas, E., Mercader, M., Vicent, T., Blaquez, P. (2020). Effects of low temperature thermal pretreatments in solubility and co-digestion of waste activated sludge and microalgae mixtures. *Algal Research*, 50, 101965.
- Azarmanesh, R., Zonoozi, M. H., Ghiasinejad, H. (2020). Characterization of food waste and sewage sludge mesophilic anaerobic co-digestion under different mixing ratios of primary sludge, secondary sludge and food waste. *Biomass and Bioenergy*, 139, 105610.
- Chiumenti, A., Boscaro, D., Da Borso, F., Sartori, L., Pezzuolo, A. (2018). Biogas from fresh spring and summer grass: Effect of the harvesting period. *Energies*, 11(6), 1466.
- Du, J., Qian, Y., Xi, Y., Lü, X. (2019). Hydrothermal and alkaline thermal pretreatment at mild temperature in solid state for physicochemical properties and biogas production from anaerobic digestion of rice straw. *Renewable energy*, 139, 261-267.
- Gahlot, P., Tyagi, V. K., Balasundaram, G., Atabani, A. E., Suthar, S., Kazmi, A. A., ... & Kumar, A. (2022). Principles and potential of thermal hydrolysis of sewage sludge to enhance anaerobic digestion. *Environmental Research*, 113856.
- Han, Y., Zhuo, Y., Peng, D., Yao, Q., Li, H., Qu, Q. (2017). Influence of thermal hydrolysis pretreatment on organic transformation characteristics of high solid anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 244, 836-843.
- INEGI, "Censo de población y vivienda 2020", (2020). Disponible en <http://censo2020.mx/>

- Karrabi, M., Ranjbar, F. M., Shahnavaz, B., Seyedi, S. (2023). A comprehensive review on biogas production from lignocellulosic wastes through anaerobic digestion: An insight into performance improvement strategies. *Fuel*, 340, 127239.
- Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwerek, A., & Luczkiewicz, A. (2021). Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111509.
- Kim, D., Choi, H., Yu, H., Kim, H., Baek, G., & Lee, C. (2022). Potential treatment of aged cow manure using spare capacity in anaerobic digesters treating a mixture of food waste and pig manure. *Waste Management*, 148, 22-32.
- Koch, K. (2015) Calculating the degree of degradation of the volatile solids in continuously operated bioreactors. *Biomass Bioenergy*, 74, 79–83
- Kolackova, I., Smolkova, B., Latal, O., Skalickova, S., Skladanka, J., Horky, P., ... & Brtnicky, M. (2022). Does Digestate Dose Affect Fodder Security and Nutritive Value? *Agriculture*, 12(2), 133.
- Koupaie, E.H., Dahadha, S., Lakeh, A.B., Azizi, A., Elbeshbishy E. (2019) Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production-A review. *J Environ Manage*, 233, 774–84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.106>.
- Kor-Bicakci, G., & Eskicioglu, C. (2019). Recent developments on thermal municipal sludge pretreatment technologies for enhanced anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 423-443.
- Lahbab, A., Djaafri, M., Kalloum, S., Benatallah, A., Atelge, M. R., Atabani, A. E. (2021). Co-digestion of vegetable peel with cow dung without external inoculum for biogas production: Experimental and a new modelling test in a batch mode. *Fuel*, 306, 121627.
- Li, Y., Achinas, S., Zhao, J., Geurkink, B., Krooneman, J., & Euverink, G. J. W. (2020). Co-digestion of cow and sheep manure: Performance evaluation and relative microbial activity. *Renewable Energy*, 153, 553-563.
- Li, Y., Zhao, J., Krooneman, J., Euverink, G. J. W. (2021). Strategies to boost anaerobic digestion performance of cow manure: Laboratory achievements and their full-scale application potential. *Science of The Total Environment*, 755, 142940
- Liu, C., Wei, B., Dai, Z., Chen, C., Liu, G. (2020). Methane Production from *Pennisetum giganteum* zx lin During Anaerobic Digestion. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 14(2), 258-264.
- Liu, Y., Yuan, H., & Zhu, N. (2022). Accelerated stabilization of high solid sludge by thermal hydrolysis pretreatment in autothermal thermophilic aerobic digestion (ATAD) process. *Journal of Environmental Management*, 318, 115615.
- Ma, X., Yu, M., Yang, M., Gao, M., Wu, C., Wang, Q. (2019) Synergistic effect from anaerobic co- digestion of food waste and sophora flavescens residues at different co-substrate ratios. *Environ Sci Pollut Res* 2019;26(36):37114–24. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06399>
- Nava-Valente, N., Hernández-Aguilar, E., Alvarado-Lassman, A., Méndez-Contreras, J. M. (2022). Effect of Acid Pretreatment on the Anaerobic Codigestion of Sewage Sludge, Chicken Litter, and Sugarcane Waste (SCW) for Biogas Production. *BioEnergy Research*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10533-y>.
- Neshat, S.A., Mohammadi, M., Najafpour, G.D., Lahijani, P. (2017) Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 79, 308–322.
- Peyrelasse, C., Kparaju, P., Lallement, A., Marques, M., Monlau, F. (2021) Reduction of the environmental footprint of thermos alkalipretreatment by reusing black liquor during anaerobic digestion of lignocellulosic biomasses. *Biofuels Bioprod. Biorefin.* 15, 657–670.
- Principi P, König R, Cuomo M (2019) Anaerobic digestion of lignocellulosic substrates: benefits of pre-treatments. *Curr Sustain/Renew Energy Rep* 6(3):61–70
- Ranjbar, F. M., Karrabi, M., Shahnavaz, B. (2022). Bioconversion of wheat straw to energy via anaerobic co-digestion with cattle manure in batch-mode bioreactors (Experimental investigation and kinetic modeling). *Fuel*, 320, 123946.
- Ramírez-Islas, M. E., Güereca, L. P., Sosa-Rodríguez, F. S., Cobos-Peralta, M. A. (2020). Environmental assessment of energy production from anaerobic digestion of pig manure at medium-scale using life cycle assessment. *Waste Management*, 102, 85-96.
- Raza, S. T., Zhu, B., Tang, J. L., Ali, Z., Anjum, R., Bah, H., ... & Ahmad, R. (2020). Nutrients recovery during vermicomposting of cow dung, pig manure, and biochar for agricultural sustainability with gases emissions. *Applied Sciences*, 10(24), 8956.
- Şenol, H., Açıkel, Ü., Demir, S., Oda, V. (2020). Anaerobic digestion of cattle manure, corn silage and sugar beet pulp mixtures after thermal pretreatment and kinetic modeling study. *Fuel*, 263, 116651.
- Shamurad, B., Gray, N., Petropoulos, E., Tabraiz, S., Membere, E., Sallis, P. (2020). Predicting the effects of integrating mineral wastes in anaerobic digestion of OFMSW using first-order and Gompertz models from biomethane potential assays. *Renewable Energy*, 152, 308-319.
- Vanegas, M., Romani, F., Jiménez, M. (2022). Pilot-Scale Anaerobic Digestion of Pig Manure with Thermal Pretreatment: Stability Monitoring to Improve the Potential for Obtaining Methane. *Processes*, 10(8), 1602
- Yun, H., Yang, Z., Dangcong, P., Qian, Y., Huijuan, L., Qiliang Q. (2017) Influence of thermal hydrolysis pretreatment on organic transformation characteristics of high solid anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 244(1), 836-843. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.166>.
- Zhang, J., Qi, C., Wang, Y., Li, Y., Han, T., Gong, X., ... & Luo, W. (2022). Enhancing biogas production from livestock manure in solid-state anaerobic digestion by sorghum-vinegar residues. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102276.
- Zhang, C., Su, H., Baeyaens, J., Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 383e392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>