

Artículo Original

**MEJORA DE LA CODIGESTIÓN ANAEROBIA DE ESTIÉRCOL
PORCINO Y GALLINAZA MEDIANTE LA ADICIÓN DE
ESTIÉRCOL VACUNO**

**IMPROVEMENT OF ANAEROBIC CODIGESTION OF SWINE MANURE AND
POULTRY MANURE BY THE ADDITION OF CATTLE MANURE**

Sheila de la Caridad Brunet-Ramos^{1*} <https://orcid.org/0009-0009-9038-6130>

Lisbet Mailin López-González² <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>

Mario Fernando Melián-González² <https://orcid.org/0000-0001-7868-6987>

Janet Jiménez-Hernández² <https://orcid.org/0000-0003-1631-6539>

¹ Departamento de Ciencias Naturales. Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez".
Sancti Spiritus, Cuba.

² Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales. Universidad de Sancti Spiritus
"José Martí Pérez". Sancti Spiritus, Cuba.

Recibido: Noviembre 6, 2023; Revisado: Diciembre 18, 2023; Aceptado: Enero 12, 2024

RESUMEN

Introducción:

En Cuba, existe tendencia a descentralizar producciones con la creación de módulos pecuarios donde coexisten diferentes especies de ganado, como porcino, vacuno y avícola. En este contexto, la digestión anaerobia (DA) resulta una alternativa para la descarbonización del sector agropecuario, ya que genera energía durante el tratamiento de residuales.

Objetivo:

Evaluar la DA de estiércol porcino (EP) y gallinaza (EG) con estiércol vacuno (EV) en términos del potencial bioquímico de metano (PBM), y parámetros cinéticos en mono y codigestión.

Materiales y Métodos:

El ensayo se realizó en reactores de 2 L a 27 °C (promedio). Se determinó el PBM del EP, EG y EV en monodigestión, y luego con adición de 15, 30 y 45 % de EV, a la mezcla EG40:EP60. Para describir el comportamiento cinético del proceso, se ajustaron



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Sheila Brunet, Email: sheilacbrunetr@gmail.com



los datos experimentales a tres modelos de primero y segundo orden.

Resultados y Discusión:

El PBM experimental con adición de EV fue superior al esperado, con incremento entre 26-31 %, demostrando la sinergia de las mezclas; ya que se mejoró la relación C/N y la comunidad de arqueas metanogénicas. Los modelos se ajustaron a los datos experimentales con coeficientes de determinación ajustado superiores al 90 %.

Conclusiones:

La adición de EV aumentó el rendimiento de metano experimental respecto al esperado. El modelo de Hill muestra un rendimiento máximo de 369 LCH₄/kgSV para las mezclas con 15 y 30 % de EV. La mejor variante fue con 15 %, y se necesita transportar estiércol de 20 vacas al biodigestor.

Palabras clave: biogás; codigestión anaerobia; estiércol porcino; estiércol vacuno; gallinaza.

ABSTRACT

Introduction:

In Cuba, there is a tendency to decentralize productions with the creation of livestock modules where different livestock species coexist, such as swine, cattle and poultry. In this context, anaerobic digestion (AD) is an alternative for the decarbonization of the agricultural sector, since it generates energy during waste treatment.

Objective:

To evaluate the AD of swine manure (SM) and poultry manure (PM) with cattle manure (CM) in terms of biochemical methane potential (BMP), and kinetic parameters in mono and co-digestion.

Materials and Methods:

The trial was conducted in 2 L reactors at 27 °C (average). The BMP of SM, PM and CM was determined in mono-digestion, and then with addition of 15, 30 and 45 % of CM, to the PM40:SM60 mixture. To describe the kinetic behavior of the process, experimental data were fitted to three first and second order models.

Results and Discussion:

The experimental BMP with CM addition was higher than expected, with increase between 26-31 %, demonstrating the synergy of the mixtures; since the C/N ratio and the methanogenic archaeal community were improved. The models were adjusted to the experimental data with adjusted coefficients of determination higher than 90 %.

Conclusions:

The addition of CM increased the experimental methane yield over the expected one. The Hill model shows a maximum yield of 369 LCH₄/kgVS for mixtures with 15 and 30 % CM. The best variant was with 15 %, and it is necessary to transport manure from 20 cows to the biodigester.

Keywords: biogas; anaerobic co-digestion;; swine manure; cattle manure; poultry manure.

1. INTRODUCCIÓN

La producción ganadera y el consumo de alimentos generan grandes cantidades de desechos orgánicos, los cuales son altamente contaminantes debido a su elevado contenido de materia orgánica, microorganismos y nutrientes (Moreno-Cardona y col., 2021). Su valorización mediante la digestión anaerobia (DA) se considera una opción viable, ya que reduce la carga contaminante, produce una fuente de energía renovable (biogás) y un biofertilizante (Carabeo-Pérez y col., 2021; López-Dávila y col., 2022).

La implementación de la DA, en países subdesarrollados como Cuba, es usualmente con un solo sustrato (Monodigestión), sin embargo, varios estudios reportan que tanto el rendimiento de metano como la estabilidad del proceso mejoran cuando co-sustratos son utilizados en el proceso de DA (Codigestión) (Barreda, 2022). Esto se logra por un mejor balance de C/N y micronutrientes, reducción de inhibidores y compuestos tóxicos, mayor diversidad de microorganismos, entre otros factores. Otro elemento importante a tener en cuenta es la disponibilidad y localización de los co-sustratos, ya que los costos logísticos por recolección y transportación influyen en la factibilidad económica del proyecto (Altinbas y Cicek, 2019).

En la Empresa Agroindustrial de Granos Sur del Jíbaro, de la provincia de Sancti Spíritus, Cuba, está localizada la Unidad Empresarial Básica (UEB) de Comercialización de Productos Agropecuarios. Dicha unidad cuenta con dos naves, una dedicada a la producción porcina con 200 cerdos en corrales, y otra a la producción de huevos con 1000 gallinas ponedoras en jaulas. Los residuos de ambos procesos son colectados y vertidos a una laguna localizada cercana a las naves, lo cual origina malos olores y la emisión de gases de efecto invernadero, en detrimento del medio ambiente.

El estiércol de gallina (EG), conocido como gallinaza, se caracteriza por una composición rica en proteínas y minerales. La monodigestión de EG no se considera una buena opción, debido a problemas de inhibición de la DA por acumulación de amoníaco, producido por la degradación biológica de proteínas y urea y su baja relación C/N. La codigestión de gallinaza con paja de trigo, estiércol vacuno, lodo primario no tratado, suero de queso, yerba de heno, paja de trigo, residuos de coco, yuca y café molido, permitió una mejora del proceso de DA en términos de rendimiento de metano (Altinbas y Cicek, 2019; Zahan y col., 2018).

Por otro lado, el estiércol porcino (EP) tiene una elevada capacidad tampón y aporta una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de microorganismos anaerobios, lo cual favorece la producción de metano. Sin embargo, al igual que la gallinaza se caracterizan por un alto contenido de Nitrógeno por lo que su relación C/N es baja (Barreda, 2022).

En este escenario, el cual es similar en varias regiones del país, se hace necesario identificar un sustrato que permita un mejor balance de la relación C/N del proceso de DA. Una variante es el estiércol vacuno (EV), dada su disponibilidad y cercanía a la UEB de Comercialización de Productos Agropecuarios. El EV es una fuente rica en nutrientes que se utilizan comúnmente en procesos de codigestión, contiene una alta proporción de materia orgánica y posee una relación C/N óptima para la producción de metano (30:1) (Mamani y col., 2021), con valores que oscilan alrededor de 38:1. Además, en comparación con otros sustratos tiene una menor tendencia a inhibir las arqueas metanogénicas, encargadas de la síntesis de metano en la fase metanogénica del

proceso, por lo que la DA puede ocurrir de manera más eficiente cuando se emplea como co-sustrato (Huamán-Borja y Huayllani-Velásquez, 2020).

La adición de EV a la mezcla de EG y EP existente en el escenario mencionado anteriormente, es una variante a considerar en la mejora del proceso de DA. Sin embargo, la proporción de EV que debe ser adicionada a la mezcla para lograr efectos sinérgicos debe ser determinada por ensayos de laboratorio. De ahí que los objetivos de este trabajo son, evaluar la DA de estiércol porcino (EP) y gallinaza (EG) con estiércol vacuno (EV) en términos del potencial bioquímico de metano (PBM), y estimar parámetros cinéticos en mono y codigestión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El inóculo que se empleó en el ensayo fue una mezcla de dos lodos provenientes de dos biodigestores alimentados con estiércol porcino, uno del municipio Cabaiguán y otro de la localidad Sur del Jíbaro, ambos en la provincia Sancti Spíritus. Los estiércoles (EG, EP y EV) fueron colectados en una granja de la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro”, en el municipio La Sierpe, Sancti Spíritus, Cuba; transportados y almacenados a 4 °C. Los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), cenizas y pH se determinaron de acuerdo a las normas establecidas por los métodos estandarizados (APHA y col., 2017). La determinación del PBM se realizó a escala de laboratorio en reactores de polietileno de 2 litros de capacidad, a temperatura ambiente. El promedio de temperatura en el día fue de 27 °C. Los reactores fueron conectados por mangueras a colectores, los cuales contenían NaOH (12 % p/p), y así facilitar la disolución del CO₂ contenido en el biogás. El volumen de metano producido se midió por desplazamiento de la columna de líquido.

Las características físico-químicas del inóculo del ensayo fueron: pH de 7,6; ST=7,95 (% ST/MF) y SV=58,95 (% SV/ST). En cada reactor se adicionaron 19 g SV de sustrato, para mantener una relación inóculo/sustrato (g SV/g SV) de 2 (VDI, 2016). Se utilizaron veintiún reactores, de ellos, nueve contenían los sustratos individuales EP, EG y EV, otros nueve fueron preparados con tres mezclas en base al contenido de SV que aportaba cada sustrato, mientras que, los tres restantes contenían solo inóculo (blanco). Primero se calculó el % SV a aportar por la mezcla EG: EP (Ecuación 1), para una adición de 15, 30 y 45 % de EV, igual a 85, 70 y 55 %, respectivamente. Luego se calculó la proporción de EG y EP para una relación fija de 40:60, determinada por la disponibilidad de 73,91 g SV aportados por 1000 gallinas y 108,88 g SV aportados por 200 cerdos, en la UEB de Comercialización de Productos. Así el % de SV aportado en cada mezcla por el EG y EP se calculó según las ecuaciones 2 y 3.

$$EP: EG = 100 - EV \quad (1)$$

$$EG = (100 - EV) * 40/100 \quad (2)$$

$$EP = (100 - EV) * 60/100 \quad (3)$$

La matriz de diseño experimental para los seis tratamientos se muestra en la tabla 1. El rendimiento de metano obtenido experimentalmente se corrigió a condiciones normalizadas de temperatura y presión (0 °C y 101,3 kPa) y se expresó como litros de metano por kilogramos de SV añadidos (LCH₄/kgSV). El ensayo se realizó por 39 días.

Tabla 1. Matriz de diseño experimental

<i>Mezcla</i>	% SV			<i>g sustrato</i>		
	<i>EP</i>	<i>EG</i>	<i>EV</i>	<i>EP</i>	<i>EG</i>	<i>EV</i>
EP ₁₀₀ :EG ₀ :EV ₀	100	0	0	78,70	0	0
EP ₀ :EG ₁₀₀ :EV ₀	0	100	0	0	128,80	0
EP ₀ :EG ₀ :EV ₁₀₀	0	0	100	0	0	116,70
EP ₅₁ :EG ₃₄ :EV ₁₅	51	34	15	8,10	5,50	2,40
EP ₄₂ :EG ₂₈ :EV ₃₀	42	28	30	6,67	4,53	4,80
EP ₃₃ :EG ₂₂ :EV ₄₅	33	22	45	5,24	3,56	7,20

Para el procesamiento estadístico de los parámetros evaluados se utilizó el paquete estadístico *Statgraphics Centurión XV*. Se empleó el análisis de varianza de clasificación simple y para comparar las medias se utilizó la prueba de intervalos múltiples de Duncan (p -valor $\leq 0,05$). El comportamiento cinético fue descrito a través de dos modelos de reacciones de primer orden (Ecuaciones 4-5), y uno de segundo orden (6), para analizar el comportamiento de la producción acumulada de metano P (L CH₄/kg SV) en un tiempo dado t (d).

Modelo de Roediger:

$$P = P_m * [1 - \exp(-kt)] \quad (4)$$

Modelo de Gompertz modificado:

$$P = P_m \exp \left[- \exp \left(\frac{R_m e}{P_m} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \quad (5)$$

Modelo modificado de Hill:

$$P = P_m \frac{t^b}{(c^b + t^b)} \quad (6)$$

A partir del ajuste de los datos experimentales a los modelos, los parámetros cinéticos obtenidos fueron: máximo rendimiento de metano P_m (L CH₄/kg SV), constante cinética de velocidad aparente k (d⁻¹), duración del desfase inicial en la producción de metano λ (d), máxima producción específica de metano R_m (L CH₄/kg SV d), el tiempo al cual la mitad del rendimiento de metano es alcanzado c (d) y b un parámetro para ajuste del modelo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización físico-química de los sustratos

Los ST de los sustratos evaluados fueron de 19,12 % para EV; 31,52 % para EP y 19,81 % para EG. Los resultados obtenidos para EV y EP coinciden con los intervalos reportados en la literatura, y oscilan entre 13-56 % y 15-49 %, respectivamente (Varnero, 2011). El valor de ST para el EG se encuentra por debajo del intervalo reportado por Varnero (2011) de 26-92 % y puede tener varias causas, entre ellas: la estación del año (húmeda en el momento de recolección: Mayo, 2023), la alimentación de los animales, el manejo del agua de bebida y al método de recolección. En el

escenario del presente estudio el método de recolección fue húmedo, ya que el piso de cemento del pozo donde se deposita la gallinaza se limpiaba con agua a presión, a diferencia de otros pozos donde la gallinaza va cayendo y se acumula por periodos entre 6 y 12 meses, así una parte del agua es drenada.

En el proceso de DA para la producción de biogás, los SV poseen gran importancia porque es el parámetro que cuantifica la cantidad de materia orgánica disponible para los microorganismos y, por tanto, apropiado para ser transformada en biogás. Su valor promedio en base a ST fue de 85,29; 74,62 y 76,76 % para EV, EG y EP, respectivamente. Estos valores están en el intervalo reportado en la literatura por Tian y col., (2023) y confirman su potencialidad como sustratos en el proceso de DA.

3.2 Rendimiento de metano para los sustratos en monodigestión y codigestión

El mejor rendimiento de metano acumulado experimental en monodigestión se obtuvo para el EG con un valor de 404,65 L CH₄/kgSV, seguido por el EP con 202,44 L CH₄/kgSV, y por último el EV con 188,07 L CH₄/kgSV. Estos resultados se encuentran dentro del intervalo reportado para monodigestión de EG, según Marin-Batista y col., (2016) y para EP y EV, según Castro-Molano, (2019).

El mayor PBM obtenido para EG, se debe a la gran cantidad de alimento desperdiciado por las gallinas con un alto contenido en grasas y proteínas. Un rendimiento de biogás similar fue reportado por Wang y col., (2019) para gallinas ponedoras, con un valor de 410 L CH₄/kgSV. Sin embargo, los autores afirman que la baja relación C/N (inferior a 13), resulta un inconveniente para la estabilidad del proceso de DA.

En otro estudio, Tian y col., (2023) obtuvieron un rendimiento de metano de 181,71 L CH₄/kg SV para el EP y demuestran el efecto sinérgico cuando actúa como cosustrato con paja de arroz. Además, Wang y col., (2017) estudiaron la monodigestión de EP y su codigestión con tallo de maíz. Los resultados muestran un rendimiento acumulado de 239 L CH₄/kg SV para el EP, resultado similar al obtenido en este estudio.

Otros autores han estudiado la monodigestión de EV, Hamzah y col., (2022) reportan un rendimiento de 179,08 L CH₄/kg SV para EV en monodigestión, valor ligeramente inferior al obtenido en este estudio. El EV contiene un alto contenido de materia orgánica rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, que son de difícil degradación, por lo que muestra bajos rendimientos cuando se emplea por sí solo en procesos de DA (Zhu y col., 2020).

Respecto a las mezclas, la adición de EV a la mezcla EG: EP, tuvo un efecto sinérgico, con rendimientos experimentales por encima de los rendimientos esperados, obtenidos teniendo en cuenta la proporción de SV de cada estiércol en la mezcla y sus rendimientos en monodigestión.

El mayor rendimiento de metano experimental se corresponde a la mezcla con adición de 15 % de EV (EP₅₁:EG₃₄:EV₁₅), con un valor de 339,32 L CH₄/kgSV, pero sin diferencias significativas con las otras dos mezclas. El rendimiento obtenido experimentalmente fue superior en un 26 % al rendimiento esperado (266,77 L CH₄/kg SV) para la mezcla EP₅₁:EG₃₄:EV₁₅. Mientras que, para las dos mezclas con mayor proporción de EV, EP₄₂:EG₂₈:EV₃₀ y EP₃₃:EG₂₂:EV₄₅, este fue superior en un 31 % respecto al rendimiento esperado de 255,34 L CH₄/kg SV y 240,91 L CH₄/kg SV, respectivamente.

Atendiendo a que el EV es un residuo que necesita ser transportado hasta la planta de biogás, la mejor decisión sería con la variante con adición de 15 % de EV, donde se necesitaría transportar el estiércol de 20 vacas (8 kg estiércol/vaca día). Futuras investigaciones donde se incluya el ensayo de codigestión en semicontinuo, un análisis económico-ambiental con el costo logístico para la recolección y transportación de estiércol, podrían realizarse.

Resultados similares a los de este estudio fueron reportados por Justiniano-Costas, (2019), quien trabajó varios tratamientos con adición de EV, mostrando mejor resultado la mezcla de EV y paja de maíz en una proporción de 70:30, reportando una producción de 288 L CH₄/kg SV, el cual se incrementó con la adición de EV en un 21 %. En otro estudio, Altinbas y Cicek, (2019) mostraron un efecto sinérgico para la mezcla EV70:EG30, con un incremento de un 13 %. También, Zhang y col., (2013) determinaron la producción de metano de desechos de alimentos y su codigestión con EV, los resultados indicaron un incremento del 41 %, con un rendimiento de metano acumulado de 388 L CH₄/kg SV para la mezcla estudiada. Los resultados obtenidos en este estudio se deben a una mejor relación C/N de la mezcla, respecto a los sustratos por separado. Según la literatura consultada, los valores para la relación C/N de EG es de 8:1 (Mamani y col., 2021), 12:1 para EP y 38:1 para EV (Barreda, 2022), por lo que la adición de EV a la mezcla mejora la relación C/N, aumentando el rendimiento de metano.

Un elemento significativo, cuando se utiliza la codigestión, es la mayor cantidad y diversidad de microorganismos en la DA (Castro-Rivera y col., 2020). Estudios realizados por Tawfik y col., (2023) reportan un aumento en la abundancia relativa de las arqueas metanogénicas de 12,0 a 43,7 % en codigestión de *Enteromorpha prolifera*, residuos verdes y gallinaza. Además, Niu y col., (2023) demostraron que la asociación de las bacterias *Syntrophomonas*, *Syntrophaceticus*, *Aminobacterium* y los metanógenos *Methanoculleus* y *Methanosarcina* aumentó en un 23 % la producción de CH₄ durante la codigestión de residuos sólidos municipales. La sinergia de las mezclas de nutrientes en la codigestión influye en la abundancia relativa de microorganismos y mejora las condiciones nutritivas de aquellos productores de metano, lo cual lleva a un efecto positivo en el rendimiento de metano, como sucedió durante la investigación (Wang y col., 2023).

3.3 Comportamiento cinético de la digestión anaerobia

En la tabla 2 se detallan los parámetros cinéticos y sus estadísticos a partir del ajuste de los modelos de: Roediger (MR), Hill modificado (MH) y Gompertz modificado (MG). Todos los modelos se adecuaron a los datos experimentales del rendimiento de metano acumulativo con un valor de R²aj superior al 90 %. El error estándar de estimación estuvo entre 2,14 y 21,84 con valores superiores para el modelo de Roediger y Gompertz. Esto se confirma con la figura 1, donde se observa un mejor ajuste para el modelo de Hill, que predice mejor el comportamiento del proceso para los sustratos.

Tabla 2. Rendimiento experimental y parámetros cinéticos estimados por los modelos

Mezcla	y_{CH_4} exp.	Modelo	y_{CH_4} max.	k	R_m	λ	b	c	R^2	ES
EG ₁₀₀ EP ₀ EV ₀	404,65	MR	449,96	0,10					97,25	21,84
		MH	425,28				2,06	6,23	99,67	7,57
		MG	394,13		40,41	1,09			99,80	5,87
EG ₀ EP ₁₀₀ EV ₀	202,44	MR	268,83	0,05					90,39	19,64
		MH	200,56				2,17	9,06	93,12	16,62
		MG	182,01		14,15	2,00			93,05	16,70
EG ₀ EP ₀ EV ₁₀₀	188,07	MR	266,66	0,03					99,66	3,62
		MH	279,93				1,27	28,33	99,88	2,14
		MG	454,79		5,89	0,86			98,99	6,34
EP ₅₁ : EG ₃₄ :EV ₁₅	339,32	MR	326,55	0,10					99,53	6,28
		MH	369,48				1,27	8,40	99,74	4,58
		MG	305,49		19,90	0,73			98,14	12,67
EP ₄₂ : EG ₂₈ :EV ₃₀	334,11	MR	332,05	0,09					99,53	6,52
		MH	369,64				1,31	8,46	99,77	4,55
		MG	308,63		20,08	0,57			98,28	12,41
EP ₃₃ : EG ₂₂ :EV ₄₅	314,81	MR	316,92	0,09					99,51	6,33
		MH	351,23				1,33	9,17	99,77	4,35
		MG	291,65		18,32	0,47			98,39	11,49

R_a^2 : Coeficiente de determinación ajustado %, ES: Error estándar del estimado, y_{max} : rendimiento máximo de metano (L CH₄/kgSV), k (d⁻¹): constante cinética de velocidad aparente k (d⁻¹), R_m : velocidad máxima de producción de metano (L CH₄/kg SV d), λ : Fase de retardo (días), c : el tiempo al cual la mitad del rendimiento de metano es alcanzado (días) y b : parámetro para ajuste del modelo

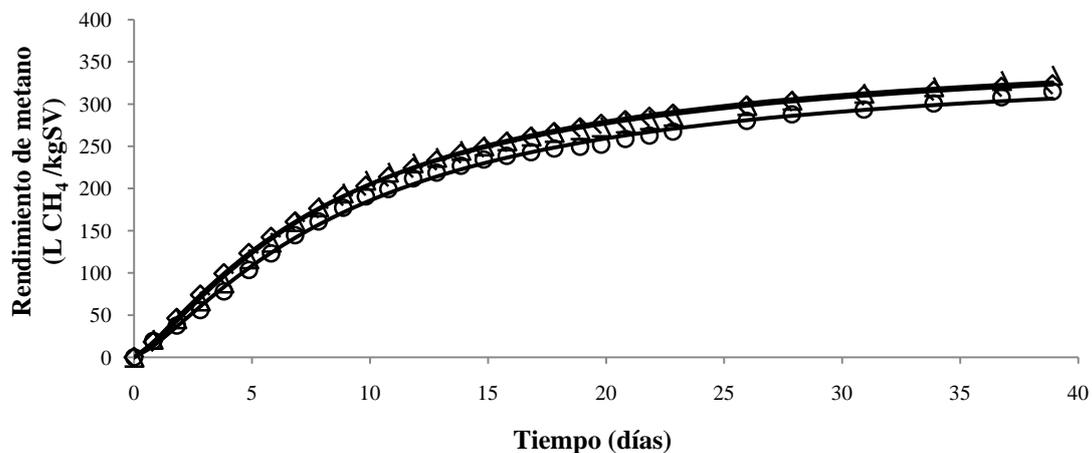


Figura 1. Rendimiento acumulado de metano experimental, (rótulos) para EP₅₁:EG₃₄:EV₁₅ (◇), EP₄₂:EG₂₈:EV₃₀ (Δ), EP₃₃:EG₂₂:EV₄₅ (○) y su ajuste de acuerdo a MH (líneas)

Las mezclas EP₅₁:EG₃₄:EV₁₅ y EP₄₂:EG₂₈:EV₃₀, tuvieron los mejores rendimientos máximo de metano para el modelo de Hill, superior en un 74 % a la monodigestión de EP y en un 32 % a la del EV y por debajo a la del EG en un 13 %, lo cual es de esperar atendiendo al alto rendimiento del EG.

La fase de retardo para los sustratos en monodigestión fue para EP de 2 días, EG 1,9 días y el menor valor corresponde al EV con 0,86 días, ya que es el sustrato menos tóxico y con menor contenido de Nitrógeno. Todos estos valores fueron superiores a los

obtenidos en codigestión, debido a que se logra mejorar el balance C/N, lo cual favorece la comunidad de arqueas y bacterias.

La velocidad máxima de producción de metano (Rm) fue mayor para el EG en monodigestión, seguido por las mezclas con 30, 15 y 45 % de EV y monodigestión de EP. El menor valor se corresponde con el EV, ya que medida que aumenta el contenido de fibras, disminuye la velocidad de producción máxima para los días de experimento. La alta carga orgánica del EG influye en su potencial de biometanización y se ha demostrado que la DA de EG en jaula presenta altos rendimientos de metano (Marin-Batista y col., 2015). Por otra parte, el EV contiene un alto contenido de materia orgánica rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, que son de difícil degradación (Zhu y col., 2020), lo que justifica su valor de Rm.

4. CONCLUSIONES

1. Se probó el efecto sinérgico de la adición de EV a la mezcla de EG: EP. Con la adición de 15, 30 y 45 % de EV, se aumentó entre 26-31 % el rendimiento de metano experimental respecto al rendimiento esperado. De acuerdo al modelo de Hill se obtuvo un rendimiento máximo de 369 L CH₄/kg SV para las mezclas con 15 y 30 % de adición de EV.
2. No se obtuvieron diferencias para los parámetros cinéticos entre las mezclas. La mejor variante es con la adición de 15 % de EV, para la cual se necesitaría transportar el estiércol de 20 vacas al biodigestor.

REFERENCIAS

- Altinbas, M., & Cicek, O.A., Anaerobic co-digestion of chicken and cattle manures: Free ammonia inhibition., *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 41, No. 3, 2019, pp. 1097-1109. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1539143>
- APHA, AWWA, & WEF., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd Edition)*., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 2017. <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.216>
- Barreda, J.E., Ancco-Mamani, M.R., Nuñez-Chambi, A.D., Aguirre-Gamero, C.E., Tejada-Meza, K., y Pacheco-Pacheco, G.M., Co-Digestión de tres tipos de estiércol (Vaca, Cuy y Cerdo) para obtener biogás en el sur del Perú., *Revista de Investigaciones Altoandinas*, Vol. 24, No. 3, 2022, pp. 174-181. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.457>
- Carabeo-Pérez, A., Odales-Bernal, L., López-Dávila, E., & Jiménez, J., Biomethane potential from herbivorous animal's manures: Cuban case study., *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 23, 2021, pp. 1404–1411. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01220-9>
- Castro-Molano, L.P., Parrales-Ramírez, Y.A., y Escalante-Hernández, H., Co digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino como alternativa para mejorar el potencial energético en digestores domésticos., *Revista Ion*, Vol. 32, No. 2, 2019, pp. 29-39. <https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019003>
-

- Castro-Rivera, R., Solís-Oba, M.M., Chicatto-Gasperín, V., y Solís-Oba, A., Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 36, No. 3, 2020, pp. 529-539. <https://doi.org/10.20937/RICA.53545>
- Hamzah, A.F., Hamzah, M.H., Man, H.C., Jamali, N.S., Siajam, S.I., & Show, P.L., Biogas production through mono and co-digestion of pineapple waste and cow dung at different substrate rations., *BioEnergy Research*, Springer, 2022, pp. 2-10. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10478-2>
- Huamán-Borja, M.M., y Huayllani-Velásquez, Y.Y., Revisión sistemática de la obtención de biogás mediante la aplicación de diferentes tipos de estiércol., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Ingeniera Ambiental en la Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2020. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75339>
- Justiniano-Costas, N., Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de estiércol vacuno y residuos agrícolas., Tesis presentada en opción al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 2019. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6583>
- López-Dávila, E., Jiménez-Hernández, J., López-González, L.M., Barrera-Cardoso, E.L., Bravo-Amarante, E., Contreras-Velázquez, L.M., & Romero-Romero, O., Biochemical methane potential of agro-wastes as a renewable source alternative for electrical energy production in Cuba., *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, Vol. 23, No. 1, 2022, pp. 2-4. https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:1890
- Mamani, J., Llumipanta, F., Ramos, S., Rea, J., Alucho, J., & Saltos, D., Biogas production systems: rationale, improvement techniques, advantages and disadvantages., *Agroindustrial Science*, Vol. 11, No. 2, 2021, pp. 239-247. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.02.14>
- Marin-Batista, J., Castro, L., & Escalante, H., Efecto de la carga orgánica de la gallinaza de jaula en el potencial de biometanización., *Revista Colombiana de Biotecnología*, Vol. 17, No. 1, 2015, pp. 18-23. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.39971>
- Marin-Batista, J., Salazar, L., Castro., & Escalante, H., Co-digestión anaerobia de vinaza y gallinaza de jaula: alternativa para el manejo de residuos agrícolas colombianos., *Revista Colombiana de Biotecnología*, Vol. 18, No. 2, 2016, pp. 6-12. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.53853>
- Moreno-Cardona, C., Aprovechamiento de biogás a partir de residuos de estiércol bovino y residuos orgánicos de alimentos almacenados en un biodigestor en lotes., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Agroindustrial en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, El Carmen de Viboral, Colombia, 2021. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/25016>
- Niu, J., Kong, X., Li, Q., Zhang, Y., Yuan, J., Liu, J., & Zhang, Y., Deciphering different effects of ZVI and NaOH on metabolic characteristics in the process of methanogenesis recovery from VFA suppression., *Journal of Environmental Management*, Vol. 336, 2023, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117686>
-

- Tawfik, A., Eraky, M., Osman, A.I., Ai, P., Zhou, Z., Meng, F., & Rooney, D.W., Bioenergy production from chicken manure: a review., *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 21, 2023, pp. 2707-2727. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01618-x>
- Tian, P., Gong, B., Bi, K., Liu, Y., Ma, J., Wang, X., Ouyang, Z., & Cui, X., Anaerobic co-digestion of pig manure and rice straw: Optimization of process parameters for enhancing biogas production and system stability., *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 20, No. 1., 2023, pp. 804-807. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010804>
- Varnero, M.T., Manual de biogás, FAO. Proyecto CHI/00/G32, Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables, 2011, pp. 27-48. <https://energia.gob.cl/documentos/manual-de-biogas>
- VDI., Fachbereich Energietechnik., VDI 4630 fermentation of organic materials characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests., VDI Society Energy and Environment, Germany, 2016.
- Wang, M., Zhou, J., Yuan, Y.X., Dai, Y.M., Li, D., Li, Z.-D., & Yan, Z.Y., Methane production characteristics and microbial community dynamics of mono-digestion and co-digestion using corn stalk and pig manure., *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 8, 2017, pp. 4893-4901. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.144>
- Wang, Y., Xue, W., Zhu, Z., Yang, J., Li, X., Tian, Z., Dong, H., & Zou, G., Mitigating ammonia emissions from typical broiler and layer manure management-A system analysis., *Waste Management*, Vol. 93, 2019, pp. 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.019>
- Wang, R., Gu, J., Wang, Q., Jiang, S., Wu, Z., Wang, J., Li, G., & Gong, X., Enhancing methane production in dry anaerobic digestion of ruminant manures through substrates ratio regulation for strengthened microbial interactions., *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 32, 2023, pp. 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103389>
- Zahan, Z., Othman, M.Z., & Muster, T.H., Anaerobic digestion/co-digestion kinetic potentials of different agro-industrial wastes: A comparative batch study for C/N optimisation., *Waste Management*, Vol. 71, 2018, pp. 663-74. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.014>
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., & Tan, T., The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure., *Bioresource Technology*, Vol. 129, 2013, pp. 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.138>
- Zhu, Y., Merbold, L., Leitner, S., Pelster, D.E., Okoma, S.A., Ngetich, F., Onyango, A.A., Pellikka, P., & Butterbach-Bahl, K., The effects of climate on decomposition of cattle, sheep and goat manure in Kenyan tropical pastures., *Plant and Soil*, Vol. 451, 2020, pp. 325-343. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04528-x>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Lic. Sheila de la Caridad Brunet-Ramos. Conservación de datos, redacción - primera redacción.
 - Dra.C. Lisbet Mailín López-González. Gestión de proyectos, redacción - revisión y edición.
 - Lic. Mario Fernando Melián-González. Conservación de datos.
 - Dra.C. Janet Jiménez-Hernández. Supervisión.
-