

Digestión anaerobia del residuo del secado del arroz en sistema semicontinuo

Anaerobic digestion of the rice drying residue in semicontinuous regime

Lisbet Mailin López-González^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>

Mildre Zayas-González² <https://orcid.org/0000-0001-8034-9621>

Julio Pedraza-Garciga¹ <https://orcid.org/0000-0003-1780-5297>

¹Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales. Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, Sancti Spíritus. Cuba

²Departamento de Procesos Agroindustriales, Facultad de Agronomía, Universidad de Ciego de Ávila “Máximo Gómez Báez”. Ciego de Ávila, Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: llopez@uniss.edu.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el proceso de monodigestión anaerobia del residuo del secado de arroz (RS) y su codigestión con residuo vacuno (RV) y porcino (RP) en sistema semicontinuo. El estudio se realizó a escala de laboratorio en un reactor de tanque agitado en régimen mesofílico (37 °C). La carga orgánica volumétrica (COV) se incrementó de 0,5 a 3,0g SV/Ld en monodigestión, y luego se mantuvo a 3 g SV/Ld en el estudio en codigestión para las mezclas RS₉₆:RV₂:RP₂, RS₉₄:RV₄:RP₂ y RS₉₂:RV₆:RP₂ (en base al % de sólidos volátiles en la mezcla). El mejor rendimiento de biogás se obtuvo durante la codigestión para la mezcla RS₉₂:RV₆:RP₂ con un valor de 705,48 L/kgSV y una productividad de 2,42 L_{Biogás}/L_{Reactor} para COV de 3 g SV/Ld. Su valor fue superior en un 28 % al del

RS en monodigestión. Los resultados obtenidos demuestran la mejora del proceso de digestión anaerobia del RS por codigestión con RV y RP.

Palabras clave: digestión anaerobia; codigestión anaerobia; biogás; residuo del secado del arroz.

ABSTRACT

In the present work the anaerobic monodigestion process of rice drying residue (RS) and its codigestion with cattle (RV) and pig (RP) residues in semicontinuous regime was evaluated. The RS was studied on a laboratory scale in a continuous stirred tank reactor (CSTR) in mesophilic regime (37 °C). The organic loading rate (OLR) was increased from 0, 5 to 3 g VS/Ld in monodigestion, and then kept at 3 g VS/Ld in the codigestion study for the mixture RS₉₆:RV₂:RP₂, RS₉₄:RV₄:RP₂ and RS₉₂:RV₆:RP₂ (based on the % volatile solids in the mixture). The best biogas yield (y_{biogas}) was obtained during codigestion for the RS₉₂:RV₆:RP₂ mixture with a value of 705, 48 L/kgVS and a biogas productivity of 2,42 L_{biogas}/ L_{reactor} for a OLR of 3 gVS/Ld. The y_{biogas} was 28% higher than RS in monodigestion. Results show, an improvement in the AD process of RS by codigestion with RV and RP.

Keywords: Anaerobic digestion; anaerobic digestion; biogas; rice drying residue.

Recibido: 20/04/2020

Aceptado: 15/08/2020

Introducción

El desarrollo del biogás en Cuba, ha estado dirigido fundamentalmente al tratamiento de excretas de ganado porcino y vacuno en pequeñas y medianas granjas agropecuarias, con el fin de disminuir su carga contaminante, por medio

de biodigestores de cúpula fija, campana flotante, tubulares de polietileno, biodigestor híbrido y lagunas tapadas.⁽¹⁾

Ante los nuevos retos que enfrenta el país (alcanzar el 24 % de sustitución de las energías no renovables por renovables para el año 2030) y la necesidad cada vez más creciente de sustituir los combustibles fósiles, el sector del biogás está enfocado no solo a buscar nuevas biomásas; sino también a la aplicación de tecnologías innovativas y de avanzada que mejoren la producción de biogás y la eficiencia de proceso, con una consecuente mejora de su factibilidad económica.

En Cuba se generan una elevada cantidad de residuos agroindustriales, los cuales son una fuente de sustrato potencial para la producción de biogás. Entre ellos el RS, constituido por paja de arroz, cáscara de arroz y granos de arroz fraccionados, se destaca por su volumen de generación (0,04 t /t de arroz húmedo) y disponibilidad en la industria arrocera, cuyo destino es ser depositado en grandes montones, los cuales se encuentran cercanos al secadero, constituyendo en muchas ocasiones fuente de contaminación ambiental.⁽²⁾

En la revisión realizada de la literatura se encontraron pocos artículos que reportan el estudio del RS para la producción de biogás,^(3,4) obteniendo uno de ellos ⁽⁴⁾ durante la monodigestión del RS una producción de biogás de 320 L/kg SV en un sistema discontinuo a régimen mesofílico.⁽²⁾

La digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocera, principalmente la paja de arroz y el residuo del secado de arroz tienen una atención especial debido a su elevado contenido en materia orgánica.⁽⁴⁾ Sin embargo, su alta relación C/N y contenido de lignina, así como su compleja, estable y recalcitrante estructura lignocelulósica son consideradas limitantes cuando estos residuos son digeridos como único sustrato.⁽⁵⁾ De ahí que un mejor balance de nutrientes y alternativas de pretratamiento son estrategias a tener en cuenta para mejorar el proceso de digestión anaerobia para este tipo de residuos.

La codigestión ha sido aplicada con resultados positivos en la mezcla de la paja de arroz y cáscara de arroz con residuos de comida,^(6,7) excreta porcina,^(8,9) excreta vacuna,^(10,11) *hydrilla verticillata*⁽¹²⁾ y con gallinaza y excreta porcina,⁽¹³⁾ Recientemente se reportó⁽⁹⁾ el efecto positivo de la codigestión del RS

con excreta porcina, al lograrse un incremento del rendimiento de metano en un 18%, respecto al valor esperado por la contribución individual en la mezcla.

La codigestión anaerobia proporciona beneficios como estabilización del proceso, pH y capacidad de amortiguación, incorporación de macro y micronutrientes en falta, reduce la concentración de compuestos inhibidores o tóxicos (ácidos grasos volátiles/amoniaco), logrando una mejor sinergia, a través de la mezcla de diversos sustratos, y actividad microbiana, con lo cual se mejora el rendimiento de metano en el proceso.⁽¹⁴⁾

Aunque los estudios realizados hasta el momento dan información del potencial de biogás a partir del RS y la posibilidad de su mejoramiento por codigestión,^(2,9) no ofrecen información sobre los parámetros de diseño del proceso de digestión anaerobia y efectos acumulativos del proceso, que solo podrían ser estudiados en régimen semicontinuo.

La mezcla del RS con RP y RV se presenta como una alternativa atractiva para su implementación en Empresas Agroindustriales de Granos, al tener disponibilidad de ganadería vacuna y porcina cercana a la planta de secado del arroz, lo cual posibilita el uso de la codigestión del RS con estos residuos. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar el proceso de monodigestión anaerobia del RS y su codigestión con RV y RP en sistema semicontinuo.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Materiales

Para la puesta en marcha se usó como inóculo la mezcla de un lodo anaerobio (60%) y excreta porcina diluida 1:6 (40%). El lodo provino de un biodigestor tipo chino que usa aguas residuales porcinas como sustrato.

Se emplearon tres sustratos durante la experimentación: residuo del secado de arroz (RS), suministrado por la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” perteneciente al municipio La Sierpe, Sancti Spíritus, Cuba. Los RP y RV fueron colectados en granjas de la cooperativa “Hornos de cal”, Sancti Spíritus,

Cuba. Al RS se le aplicó un pretratamiento físico (molinado a 3 mm) para facilitar su homogenización en la alimentación.

Métodos analíticos

El contenido de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), cenizas, pH y nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+), se determinaron de acuerdo a las normas establecidas por los métodos estandarizados⁽¹⁵⁾. Hemicelulosa, celulosa y lignina fueron cuantificadas de acuerdo al método de Van Soest.⁽¹⁶⁾

Ensayo anaerobio en régimen semicontinuo

Los experimentos en semicontinuo se realizaron en un reactor de tanque agitado de 50 L con agitación mecánica (figura 1). La temperatura se mantuvo bajo condiciones mesofílicas a 37 °C por medio de una manta eléctrica situada alrededor del cuerpo del reactor. El reactor se alimentó manualmente una vez al día, y su contenido se mezcló a 35 min^{-1} durante 2 h, antes y después de la alimentación.

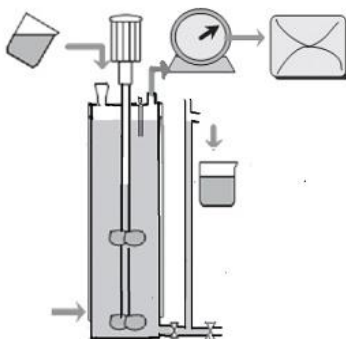


Fig. 1- Esquema del experimento en semicontinuo

El reactor se alimentó desde una COV de 0,5 hasta 3,0 g SV/Ld con RS en monodigestión, en base al porcentaje de sólidos volátiles en la mezcla. Posteriormente se mantuvo una COV de 3,0 g SV/Ld, y se fue introduciendo paulatinamente los RP y RV en la mezcla, tal y como se muestra a continuación en la tabla 1.

Tabla 1-Mezclas alimentadas al reactor semicontinuo.

	Mezcla	COV (g SV/Ld)
M0	RS ₁₀₀ :RV ₀ :RP ₀	0,5 - 3,0
M1	RS ₉₆ :RV ₂ :RP ₂	3,0
M2	RS ₉₄ :RV ₄ :RP ₂	3,0
M3	RS ₉₂ :RV ₆ :RP ₂	3,0

La COV se aumentó paulatinamente cada 7 días aproximadamente. Se alimentó agua de forma tal que se mantuviera un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 48 y 40 días para COV de 0,5 y 1,0 g SV/Ld, respectivamente, y de 30 días a partir de una COV de 1,5 g SV/Ld.

La producción de biogás se midió diariamente por medio de un medidor de volumen de gas por tambor húmedo tipo TG05/6 (Ritter, Alemania) y se corrigió a temperatura y presión normal (273,15 K y 101,325 kPa). Para la evaluación del proceso se determinaron los parámetros de rendimiento de biogás y_B (L/kgSV), y productividad biogás P_B (L_{Biogás}/L_{reactor} d).

Dos veces a la semana fueron extraídas muestras del contenido del reactor y se le determinaron pH, ST, SV y N-NH₄⁺. Muestras filtradas (20 mL) a 3000 min⁻¹ por 10 minutos se usaron para determinar la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y la alcalinidad debida al bicarbonato (AI), por valoración con H₂SO₄ 0,1 N a pH 4,4 y 5,0, respectivamente. La relación de alcalinidad (AGV/AI) entre 0,3-0,4 garantiza el funcionamiento adecuado y estable del proceso anaerobio. Valores inferiores a 0,2 a la salida de los reactores indican una adecuada degradación y agotamiento del sustrato.

Resultados y su discusión

Caracterización de los sustratos utilizados en el proceso de digestión anaerobia

La tabla 2 presenta los parámetros analizados al RS, RP y RV. El RS tiene un alto contenido de materia orgánica, expresado en términos de SV, con un valor de 77% Materia fresca (MF), superior al RP y RV con 7%MF y 10%MF.

Tabla 2. Caracterización de los sustratos utilizados en el ensayo anaerobio

Parámetros	Unidades	RS	RV	RP
pH		6,07	7,57	7,85
ST	%MF	83,12	12,36	9,27
SV	%ST	92,83	84,47	77,99
Cenizas	%ST	7,17	15,53	22,31
N-NH ₄ ⁺	g/kg	0,071	0,255	1,714
Hemicelulosa	%ST	18,31	n.a	n.a
Celulosa	%ST	19,08	n.a	n.a
Lignina	%ST	6,96	n.a	n.a

n.a: No analizado

Sin embargo, el alto contenido de fibra del RS (44,35%ST), dado por los componentes lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) que forman su estructura, le aporta resistencia a este material, y puede afectar su degradación biológica.

Comportamiento del reactor en el ensayo en semicontinuo

El comportamiento del reactor en semicontinuo durante 70 días de operación fue evaluado a través de los ST, SV, pH, FOS/TAC, N-NH₄⁺, y_B y P_B (figura 2 y tabla 3).

Durante el periodo de monodigestión del RS se obtuvo un incremento en el y_B de 371,47 a 550,36 L/kgSV a medida que la COV se incrementó de 0,5 a 3 gSV/L/d. Sin embargo, el mejor y_B de 705,48 L/kgSV para una COV de 3gSV/L/d fue en codigestión con la mezcla RS₉₂:RV₆:RP₂, valor que superó en un 22% el y_B en monodigestión. De la misma forma la P_B aumentó sucesivamente hasta 1,89 L/(L_{Reactor}d) en monodigestión, mientras que alcanzó su máximo valor de 2,42 L/(L_{Reactor}d) en codigestión para la mezcla RS₉₂:RV₆:RP₂(figura 2).

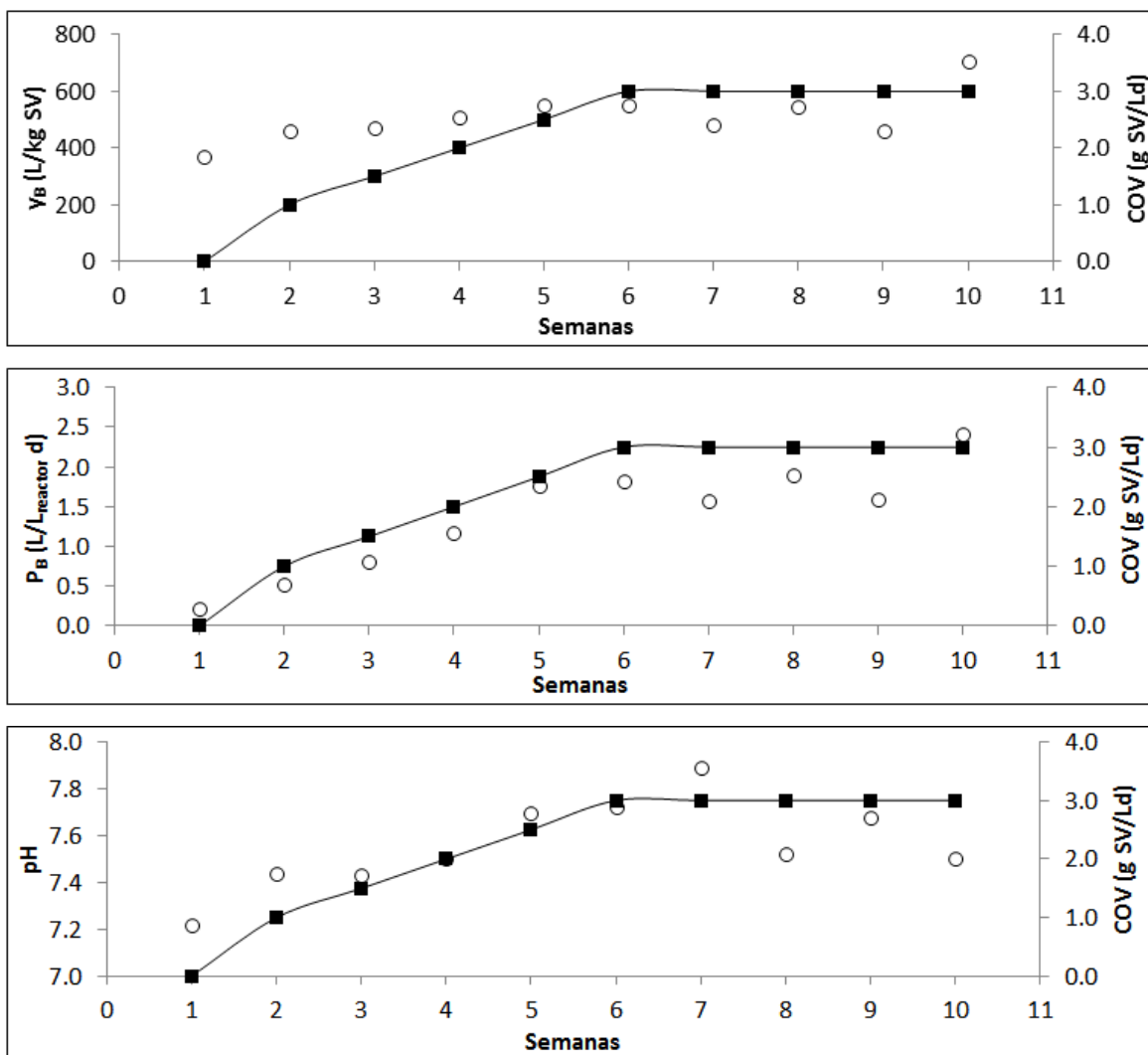


Fig. 2- Comportamiento del y_B , P_B y pH (○) en función de la COV (■).

Los valores de pH se mantuvieron en un rango entre 7,2 - 7,7 (figura 2). El intervalo óptimo de pH para la producción de metano se ha reportado entre 6,8-7,2,⁽¹⁷⁾ sin embargo la producción de biogás puede ocurrir de forma satisfactoria dentro del intervalo 6,5 – 8,5.⁽¹⁸⁾

La concentración de $N-NH_4^+$ varió entre 0,279 y 0,397 g/kg, con el valor más bajo en la semana 6 durante la monodigestión con RS, y un leve incremento luego de la incorporación en la mezcla del RP y RV (tabla 3). Los valores obtenidos son ligeramente inferiores al intervalo reportado durante la digestión anaerobia de la paja de arroz (438,7–581,4 g/kg).⁽¹⁹⁾ Concentraciones de amonio por debajo de

200 mg L⁻¹ son consideradas beneficiosas en el proceso, mientras que valores entre 1,7-5,0 g/L son inhibitorios.⁽²⁰⁾

La relación de AGV/AI se mantuvo en 0,1 durante la monodigestión del RS y su codigestión con RV y RP (semana 1-9) (tabla 3). A partir de la semana 10, con la alimentación de la mezcla con mayor proporción de RV (RS₉₂:RV₆:RP₂), bajo un régimen de mezcla en continuo esta relación se incrementó hasta 1,1. Según la literatura se recomienda mantener la relación de AGV/AI entre 0,3-0,4 y evitar la acidificación del reactor.⁽²⁾

La alcalinidad se mantuvo por encima de 2000 mg/L, excepto en la semana 9, influenciada por la acumulación de AGV, los cuales llegaron a 2166 mg/L. La alcalinidad al bicarbonato debe mantenerse por encima de 2500 mg/L para asegurar la estabilidad del digestor.⁽²¹⁾

Los AGV se mantuvieron por debajo de 300 mg/L hasta la semana 9 del experimento (tabla 3). De acuerdo a concentraciones de ácidos grasos volátiles por debajo de 50 mM, equivalente a 3000 mg acético/L, no producen ninguna disminución de la producción de metano.⁽²²⁾ El uso de excreta con alta capacidad buffer como lo son los residuos porcinos puede neutralizar los ácidos.⁽²³⁾ determinaron la concentración de AGV para la monodigestión del tallo de algodón y su codigestión con residuo porcino. Aunque la concentración de AGV durante la codigestión fue 10 veces la de la monodigestión, el sistema mantuvo su estabilidad debido a la presencia del residual porcino.

Luego de la semana 9, se decidió cambiar a agitación constante, debido a la acumulación de sólidos en el reactor. Una capa flotante de 16 cm, formada por cascarilla de arroz y granos partidos, se fue acumulando en el reactor, lo cual provocó tupición en la salida del gas, sobrepresión del reactor y desplazamiento entre 2-3 L del líquido contenido hacia la cubeta de recolección. Estudios previos realizados con materiales lignocelulósicos demostraron dificultades durante la DA de estos sustratos en reactores de mezcla, debido a la alta flotación en el reactor, y el bloqueo durante la salida del gas.^(24; 25)

Tabla 3- Principales parámetros durante la operación del reactor en monodigestión y codigestión

Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Parámetros del Reactor	Mono-D (M0)	Mono-D (M0)	Mono-D (M0)	Mono-D (M0)	Mono-D (M0)	Mono-D (M0)	Co-D (M1)	Co-D (M2)	Co-D (M3)	Co-D (M3)
% SV _{RS}	100	100	100	100	100	100	96	94	92	92
% SV _{RV}							2	4	6	6
% SV _{RP}							2	2	2	2
g _{RS}	29,2	58,3	87,5	116,6	145,8	175,0	168,0	164,5	161,0	161,0
g _{RV}							38,8	77,6	116,4	116,4
g _{RP}							37,3	37,3	37,3	37,3
g _{agua}	900	1050	1400	1350	1300	1250	900	875	825	750
COV (g SV/L*d)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3	3	3	3
TRH (días)	48	40	30	30	30	30	30	30	30	30
y _B (L/kg VS)	371,47	462,91	471,66	507,02	549,31	550,36	480,19	546,50	457,69	705,48
P _B (L/ Lreactor d)	0,21	0,53	0,81	1,17	1,76	1,82	1,58	1,89	1,59	2,42
pH	7,22	7,44	7,43	7,5	7,7	7,72	7,89	7,52	7,68	7,5
AGV (mg CH ₃ COOH/L)	257	257	257	257	174	174	257	298,5	257	2166
AI (mg CaCO ₃ /L)	2325	2125	2325	2325	1875	2025	2325	2750	2125	1950
AGV/AI	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5
N-NH ₄ ⁺ (g/kg)	0,358	0,295	0,336	0,374	0,320	0,279	0,362	0,340	0,387	0,397
ST (%MF)	1,73	1,62	1,65	1,73	2,06	1,81	1,55	1,74	2,13	2,05
SV (%MF)	1,04	0,97	0,98	1,16	1,32	1,17	0,86	1,05	1,50	1,81
SV (%ST)	59,9	59,9	59,6	67,1	64,2	64,5	55,8	60,1	70,3	72,4

Mono-D: Monodigestión, Co-D: Codigestión

Se decidió entonces comenzar a operar a régimen de mezcla en continuo con una velocidad de agitación de 32 rpm (velocidad fija para el motor instalado).

Durante este periodo el pH se comportó de forma estable, con un intervalo entre 7,2-7,8, debido a la capacidad buffer aportada por el bicarbonato y por el amonio formado durante la degradación de las proteínas. Sin embargo, la relación de AGV/AI, la cual es considerada un mejor indicador de estabilidad del proceso, aumentó rápidamente de 0,1 a 0,6 al cambiar el régimen de mezcla. Esto causó una concentración de AGV de 1170 mg/L. Luego siguió incrementándose hasta 1,1, con una concentración de AGV de 2166 mg/L, pero ya al tercer día el sistema se recuperó con una relación de AGV/AI de 0,51 y AGV=1087 mg/L.

Es muy probable que la alimentación de excreta vacuna en la mezcla pudo ocasionar la formación de ácido propiónico, el cual tiende a acumularse por dificultades para su degradación.⁽²⁶⁾ Esto unido al incremento del régimen de mezcla y al predominio de una microbiota con bacterias celulolíticas en el RV, incrementaron la tasa de hidrólisis lo cual ocasionó la rápida formación de AGV y su acumulación.

La inhibición de la acetogénesis del propionato es causada por la acumulación de altos niveles de hidrógeno por encima de 10 Pa, o una acumulación sustancial de acetato. Si bien el máximo nivel de ácido propiónico (HPr) tolerable en un reactor anaerobio varía de acuerdo al tipo de sustrato y al reactor utilizado, los valores típicos informados en la literatura oscilan entre 0,8 g HPr/L ⁽²⁷⁾ y 2,0 g HPr/L.⁽²⁸⁾

Conclusiones

1. La monodigestión del residuo de secadode arroz en sistema semicontinuo confirmó que posee un elevado potencial para producir biogás, con un rendimiento de biogás de 550,36 L/kgSV a una carga orgánica volumétrica de 3,0gSV/Ld.

2. La codigestión del residuo de secado de arroz con residuo vacuno y porcino en sistema semicontinuo alcanzó un rendimiento de biogás de 705,48 L/kgSV a una carga orgánica volumétrica de 3,0 g SV/Ld, lo cual representa un incremento en un 28% en comparación con su monodigestión.

Referencias bibliográficas

- 1.SUÁREZ-HERNÁNDEZ, J., SOSA-CÁCERES, R., *et al.* "Evaluation of the biogas production potential in Cuba". *Pastos y Forrajes*. 2018, **41** (2). pp. 79-85. ISSN 08640394.
- 2.CONTRERAS, L. M. *Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arroceras cubana para la producción de biogás*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2013.
- 3.DÍAZ IGLESIA, J. A., MIRANDA CABALLERO, A., *et al.* "Metodología para obtención de biogás a partir de residuos de cosechas del arroz utilizando como inóculo aguas residuales". *Avances*. 2016, **18** (4). pp. 325-333. ISSN 1562-3297.
- 4.CONTRERAS, L. M., SCHELLE, H., *et al.* "Methane potential and biodegradability of rice straw, rice husk and rice residues from the drying process. *Water Science and Technology*". 2012, **65** (6). pp. 1142-1149. ISSN 0273-1223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122725>
- 5.NGAN, N. V. C., CHAN, F. M. S., *et al.* "Anaerobic Digestion of Rice Straw for Biogas Production". En: Cham: M. Gummert, N. V. Hung, P. Chivenge and B. Douthwaite *Sustainable Rice Straw Management*, 2020, pp. 65-92. ISBN 978-3-030-32373-8.
- 6.JABEEN, M., ZESHAN, *et al.* "High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates". *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2015, **102**. pp. 149-153. ISSN 0964-8305. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.03.023>.

7. ZHAN-JIANG, P., JIE, L., *et al.* "High-solid Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Rice Straw for Biogas Production". *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)*. 2014, **21** (4). pp. 61-66. ISSN 1006-8104. [https://doi.org/10.1016/S1006-8104\(15\)30021-0](https://doi.org/10.1016/S1006-8104(15)30021-0).
8. MEI, Z., LIU, X., *et al.* "Anaerobic Mesophilic Codigestion of Rice Straw and Chicken Manure: Effects of Organic Loading Rate on Process Stability and Performance". *Appl Biochem Biotechnol*. 2016. pp. 846–862. ISSN 1559-0291. <http://10.1007/s12010-016-2035->
9. LÓPEZ GONZÁLEZ, L. M., RUIZ MANSO, J. M., *et al.* "Codigestión anaerobia del residuo del secado del arroz y excreta porcina en sistema discontinuo". *Revista Tecnología Química*. 2019, **39** (2). pp. 286-300. ISSN 2224-6185.
10. HARYANTO, A., SUGARA, B. P., *et al.* Anaerobic Co-digestion of Cow Dung and Rice Straw to Produce Biogas using Semi-Continuous Flow Digester: Effect of Urea Addition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [en línea]. 2018, **147**. pp. 755-1307. <http://10.1088/1755-1315/147/1/012032>.
11. WANG, X., LU, X., *et al.* "Effects of Temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) Ratio on the Performance of Anaerobic Co-Digestion of Dairy Manure, Chicken Manure and Rice Straw: Focusing on Ammonia Inhibition". *PLOS ONE* [en línea]. 2014, **9** (5). pp. 97-265. [Consultado: 18/5/2019]. ISSN 1932-6203. <http://10.1371/journal.pone.0097265>.
12. KAINTHOLA, J., KALAMDHAD, A. S., *et al.* Enhanced methane production from anaerobic co-digestion of rice straw and hydrilla verticillata and its kinetic analysis. *Biomass and Bioenergy* [en línea]. 2019, **125**. pp. 8-16. [Consultado: 1/6/2019]. ISSN 0961-9534. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.011>.
13. SHEN, F., LI, H., *et al.* Effect of organic loading rate on anaerobic co-digestion of rice straw and pig manure with or without biological pretreatment. *Bioresour Technol* [en línea]. 2018, **250**. pp. 155-162. [Consultado: 5/6/2019]. ISSN 1873-2976. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.037>.
14. PRAJAPATI, K. K., PAREEK, N., *et al.* Pretreatment and Multi-Feed Anaerobic Co-digestion of Agro-Industrial Residual Biomass for Improved Biomethanation

- and Kinetic Analysis. *Frontiers in Energy Research* [en línea]. 2018, **6** (111). pp. without. [Consultado: 23/10/2018]. ISSN 2296-598X. 10.3389/fenrg.2018.00111.
15. APHA, AWWA, *et al.* *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th Edition. Washington DC, USA: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 1995. ISBN 78-0875532233.
16. VAN SOEST, P., ROBERTSON, J., *et al.* Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* [en línea]. 1991, **74**. pp. 3583–3597. [Consultado: 18/11/2019]. ISSN 0022-0302. [http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2).
17. YADVIKA, SANTOSH, *et al.* Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. *Bioresour Technol* [en línea]. 2004, **95** (1). pp. 1-10. [Consultado: 5/11/2019]. ISSN 0960-8524. <https://doi:10.1016/j.biortech.2004.02.010>.
18. WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* [en línea]. 2010, **85** (4). pp. 849-860. [Consultado: 5/11/2019]. ISSN 0175-7598. <https://10.1007/s00253-009-2246-7>.
19. ZHOU, J., YANG, J., *et al.* Different organic loading rates on the biogas production during the anaerobic digestion of rice straw: A pilot study. *Bioresource Technology* [en línea]. 2017, **244**. pp. 865-871. [Consultado: 20/10/2019]. ISSN 0960-8524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.146>.
20. CHEN, Y., CHENG, J. J., *et al.* Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour Technol* [en línea]. 2008, **99** (10). pp. 4044-4064. [Consultado: 20/10/2019]. ISSN 0960-8524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>.
21. LEITÃO, R. C., VAN HAANDEL, A. C., *et al.* The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. *Bioresour Technol* [en línea]. 2006, **97**. pp. 1105-1118. [Consultado: 10/10/2019]. ISSN 0960-8524. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2004.12.007>.
22. AHRING, B. K., SANDBERG, M., *et al.* Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors *Appl. Microbiol. Biotechnol.* [en línea].

- 1995, **43** (3). pp. 559-565. [Consultado: 10/10/2019]. ISSN 1432-0614. <http://doi.org/10.1007/BF00218466>.
23. CHENG, X.-Y. y ZHONG, C. Effects of feed to inoculum ratio, co-digestion, and pretreatment on biogas production from anaerobic digestion of cotton stalk. *Energy Fuels* [en línea]. 2014, **28**. pp. 3157-3166. [Consultado: 15/10/2019]. ISSN 0140-6701. <http://doi.org/10.1021/ef402562z>.
24. MUSTAFA, A. M., POULSEN, T. G., *et al.* Fungal pretreatment of rice straw with *Pleurotus ostreatus* and *Trichoderma reesei* to enhance methane production under solid-state anaerobic digestion. *Applied Energy* [en línea]. 2016, **180**. pp. 661-671. [Consultado: 5/10/2019]. ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.135>.
25. LI, D., LIU, S., *et al.* Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and pig manure. *Bioresour Technol* [en línea]. 2015, **187**. pp. 120-127. [Consultado: 22/10/2019]. ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.040>.
26. PALMQVIST, E. y HAHN-HAGERDAL., B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. *Bioresour Technol* [en línea]. 2000, **74** (1). pp. 25-33. [Consultado: 5/11/2019]. ISSN 0960-8524. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00161-3](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00161-3).
27. MOSCHE, M. y JORDENING, H. Detection of very low saturation constants in anaerobic digestion: influences of calcium carbonate precipitation and pH. *Applied Microbiology & Biotechnology* [en línea]. 1998, **49** (6). pp. 793-799. [Consultado: 25/11/2020]. ISSN 1432-0614. <http://doi.org/10.1007/s002530051248>
28. BARREDO, M. y EVISON, L. Effect of propionate toxicity on methanogen-enriched sludge, *Methanobrevibacter smithii*, and *Methanospirillum hungatii* at different pH values. *Applied & Environmental Microbiology* [en línea]. 1991, **57** (6). pp. 1764-1769. [Consultado: 20/10/2019]. ISSN 1098-5336. <http://10.1128/AEM.57.6.1764-1769>

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Lisbet Mailin López González: diseño de la investigación y elaboración del informe final.

Mildre Zayas González: proceso experimental.

Julio Pedraza Garciga: revisión y corrección del informe final.