

BIODEGRADABILIDAD DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AGRO- AZUCARERA CUBANA: CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA

BIODEGRADABILITY OF RESIDUES FROM THE SUGAR CANE INDUSTRY IN CUBA: ANAEROBIC CO-DIGESTION

Jhosané Pagés-Díaz^{1}, Lizbeth Cabrera Contreras², Ania Cabrera Díaz¹
e Ileana Pereda Reyes¹*

¹ Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), 119 # 11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao 11500, La Habana, Cuba.
² Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas (CIQ), Vía Blanca, entre Infanta y Palatino, Cerro 10600, La Habana, Cuba.

Recibido: Enero 21, 2019; Revisado: Febrero 25, 2019; Aceptado: Marzo 11, 2019

RESUMEN

La aplicación de la digestión anaerobia a residuos que actualmente no se aprovechan constituye una estrategia sustentable para el manejo de los mismos en Cuba. El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar el efecto de mezcla en la biodegradabilidad de residuos como el bagazo (B), la cachaza (C) y la vinaza (V) a partir de un diseño experimental de mezcla. Para ello se evaluó el potencial de metano y la cinética del proceso a partir de dos modelos cinéticos: primer orden y Gompertz. Los resultados demuestran que la C obtuvo el mayor valor de rendimiento (252 mLCH₄/gSV) mientras que el B obtuvo el valor más bajo (170 mLCH₄/gSV). Sin embargo, la mezcla ternaria B+C+V mostró el valor más elevado con un aumento en el rendimiento de metano de hasta un 23% en comparación con el aporte individual de los sustratos por separado debido a un efecto sinérgico positivo y significativo. Los resultados cinéticos demuestran que la V como sustrato individual obtuvo los mejores resultados.

Palabras clave: Bagazo; cachaza; co-digestión; sinergia; vinaza.

ABSTRACT

The application of anaerobic digestion, from waste streams that currently have no use, can be utilized for bioenergy production. The present work objective was to evaluate the mixing effect in the biodegradability of residues from the Cuban sugar industry such as

Copyright © 2019. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Jhosané Pagés, Email: jhosane@gmail.com

bagasse, press mud and vinasse using a mixture design. Methane yield and kinetic process were also evaluated using two different kinetic models: first order model and Gompertz model. The results showed that press mud had the higher methane yield (252 mLCH₄/gVS) mean while bagasse had the lowest value (170 mLCH₄/gVS). All substrates mix resulted an increase in methane yield up to 23% compared to the expected yield calculated as individual fractions potential methane. This behavior demonstrate a significant synergistic effect. The kinetic results showed that vinasse had the best results.

Key words: Bagasse; co-digestion; press mud; synergy; vinasse.

1. INTRODUCCIÓN

La digestión anaerobia (DA) es una tecnología mundialmente conocida e implementada a través de la cual se genera biogás a partir de la acción de diferentes grupos de microorganismos en ausencia de oxígeno. El biogás generado constituye una mezcla de gases formado principalmente por metano y dióxido de carbono, el cual es empleado para producir electricidad y calor. En países en vías de desarrollo como Cuba, es fundamentalmente empleado para cocinar. En este sentido, la política energética del país está encaminada a promover la utilización de las fuentes renovables de energía fomentando el desarrollo del biogás y diversificando sus aplicaciones (Gutiérrez y col., 2018).

La actualidad cubana exhibe un excesivo potencial de residuos sólidos biodegradables listos para ser evaluados respecto a sus potencialidades energéticas y que actualmente su único protagonismo es la contaminación del medio ambiente. En ese contexto, la industria azucarera cubana es un sector de la economía que genera continuamente residuos con carácter biodegradable. Dentro de esos residuos se destacan la cachaza, la vinaza y el bagazo; de los cuales el bagazo es el único que se utiliza hoy día como fuente de energía en el proceso agroindustrial del azúcar de caña (Gutiérrez y col., 2018). Sin embargo, existen otros residuos con elevada disponibilidad que actualmente no se aprovechan (e.j., la cachaza). La cachaza se caracteriza por su elevado contenido de materia orgánica (e.j., 157 g/kgDQO) (Baez-Smith, 2008) y de micronutrientes esenciales para los procesos biológicos de bioconversión como son el calcio, potasio, nitrógeno, fósforo, magnesio, manganeso y zinc (Rouf y col., 2010). Es empleada para la alimentación del ganado vacuno y como mejorador de suelos. Sin embargo, debido a las dificultades que implica su transportación y manejo en la mayoría de los centrales azucareros cubanos es abandonada en los campos lo que implica una descomposición espontánea de la misma, emitiendo grandes cantidades de gas metano e impidiendo por tanto el efecto positivo de la utilización de esa bioenergía. Por otra parte, la vinaza es el subproducto líquido de la destilación del mosto en la fermentación del etanol. Estos residuos son generados en grandes cantidades diariamente y las prácticas actuales de manejo de las mismas causan grandes problemas de contaminación ambiental (Christofolletti y col., 2013).

Con el objetivo de incrementar la biodegradabilidad y el rendimiento de metano en el proceso de DA, la co-digestión de residuos es un tópico de particular interés. Este proceso permite mejorar el rendimiento de biogás debido a las sinergias que se producen entre las mezclas y a la compensación de nutrientes entre los sustratos co-digeridos (Mata-Alvarez y col., 2014). Su mayor expansión se debe a la posibilidad de obtener un mejor balance en

la relación C/N, pH, alcalinidad, macro y micronutrientes. De igual forma compensa la presencia de compuestos inhibidores y tóxicos. Sin embargo, no todas las mezclas son favorables a la DA por lo que es importante realizar estudios para cada caso particular (Pagés-Díaz y col., 2014).

La co-digestión de residuos de la industria azucarera ha sido previamente reportada en la literatura. La cachaza ha sido co-digerida con otros sustratos como paja de caña y bagazo en diferentes relaciones de mezcla con un efecto significativo en la mejora del rendimiento de biogás en comparación con la digestión de la cachaza como único sustrato (Rouf y col., 2010). Sin embargo, otros estudios demostraron que cuando la relación de mezcla cachaza-bagazo (e.j., 2,33-1) fue co-digerida en régimen semi-continuo a largo plazo la producción de biogás disminuyó en un 33% en relación a la digestión únicamente de cachaza (Janke y col., 2016). Por otro lado, López-González et al., (2015) estudió la co-digestión de cachaza (pretratada y sin pretratar) con vinaza en diferentes relaciones de mezcla. Los resultados demuestran que 25% de cachaza sin pretratar con 75% de vinaza (en base a la demanda química de oxígeno) resultó ser la mejor alternativa de co-digestión para estos dos sustratos. Sin embargo, a conocimiento del autor, no se encontraron reportes en la literatura sobre el efecto sinérgico o antagónico que pudiera provocar la combinación de una mezcla ternaria de cachaza, bagazo y vinaza pura en co-digestión anaerobia. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo fundamental evaluar la co-digestión de mezclas de residuos sólidos y líquidos generados en la industria agroazucarera cubana identificando las combinaciones de mezclas con efectos positivos y negativos para el rendimiento de metano y la cinética de biodegradabilidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sustratos e inóculo

Se utilizó como sustratos sólidos: bagazo (B) y cachaza de caña (C) provenientes del central azucarero Héctor Molina en San Nicolás, Mayabeque mientras que como sustrato líquido se utilizó vinaza (V), proveniente de la destilaría anexa al propio central. Los sustratos lignocelulósicos (bagazo y cachaza de caña) fueron sometidos a 40°C en la estufa durante 24 horas con el objetivo de disminuir el contenido de humedad y facilitar el proceso de molienda y tamizado. Cada fracción sólida fue picada y molida mediante una picadora eléctrica (CUISINRT, China). Los mismos fueron posteriormente procesados hasta obtener el tamaño de partícula deseado (e.j., 2 mm para el bagazo y <0,2 mm para la cachaza). Para el caso de la vinaza esta fue almacenada a -20°C hasta su posterior utilización.

El inóculo utilizado fue obtenido de una planta piloto de producción de biogás en el Instituto de Investigaciones Porcinas que trabaja con sustrato de estiércol porcino. El mismo fue filtrado usando un tamiz de 5,6 y 10 mm para eliminar residuos orgánicos ajenos a su composición como hojas secas y caracoles. El inóculo fue posteriormente almacenado a 37 °C en la incubadora durante tres días en condiciones anaerobias con un volumen de espacio libre con el objetivo de facilitar la degradación del material aún presente en su constitución según la metodología previamente descrita en la literatura (Hansen y col., 2004).

2.2. Ensayo anaerobio en sistema discontinuo

El montaje de los reactores se realizó según el método previamente descrito (VDI-4630, 2006). Para ello se utilizaron reactores de vidrio de 500 mL de capacidad y 450 mL de volumen efectivo bajo condiciones mesofílicas ($37^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$) durante 30 días. Cada reactor fue alimentado con una proporción adecuada de sustrato para mantener la relación 1:3 ($\text{SV}_{\text{sustrato}}:\text{SV}_{\text{inóculo}}$). Se realizó el montaje de un reactor blanco conteniendo solamente inóculo para garantizar la calidad del inóculo. Cada reactor fue preparado por triplicado y los mismos fueron agitados de forma manual una vez al día a lo largo de todo el período experimental. La producción de CH_4 fue medida diariamente por desplazamiento de líquido en una solución de NaOH al 15% (p/v). La corrección de metano se realizó a 0°C y 1 atm asumiendo la ley de gas ideal (VDI-4630, 2006).

2.3. Diseño de experimento

Con el objetivo de identificar posibles efectos sinérgicos o antagónicos entre las mezclas de sustratos bajo estudio se realizó un diseño experimental de mezcla Simplex-Centroide según metodología previamente descrita por Pagés-Díaz et al., (2014). En el presente trabajo se estudió cada uno de los sustratos individuales (e.j., bagazo (B), cachaza (C) y vinaza (V)) así como las posibles combinaciones de mezclas binarias (C+V, B+V, B+C) y ternarias (B+C+V) (Tabla 1).

Tabla 1. Relaciones de mezcla estudiadas

<i>Relaciones de mezcla</i>				
<i>Mezclas</i>	<i>Sustrato^a</i>	<i>Bagazo (B)</i>	<i>Cachaza (C)</i>	<i>Vinaza (V)</i>
		<i>% SV_{total}</i>	<i>% SV_{total}</i>	<i>% SV_{total}</i>
B	4,74 g	100	0	0
C	19,25 g	0	100	0
V	81,05 mL	0	0	100
B+C	2,37g+9,62g	50	50	0
B+V	2,37g+40,52mL	50	0	50
C+V	6,62g+4052mL	0	50	50
B+C+V	1,56g+6,35g+26,74mL	33,3	33,3	33,3

^aCantidad total de sustrato en peso fresco añadido a cada reactor

La base usada para el diseño fue el porcentaje de la proporción de cada componente en base al contenido de sólidos volátiles. Las variables respuestas estudiadas fueron el rendimiento de metano (YCH_4), la constante cinética aparente de primer orden (k_0) y la velocidad específica de producción de metano (R_m) obtenidas según el modelo cinético de primer orden y el modelo de Gompertz respectivamente y previamente descrito en Pagés-Díaz (2015). Los modelos de regresión lineal (sin efecto sinérgico o antagónico) y no lineal (cuadrático y cúbico, con efecto sinérgico o antagónico) se probaron para cada variable respuesta y se evaluó por ANOVA. El nivel de confianza de los modelos evaluados fue de un 95% ($p\text{-valor} \leq 0,05$). El análisis de los resultados se realizó con el paquete estadístico STATGRAPHICS Centurion XV.II.

2.4. Métodos analíticos

La determinación de los sólidos totales (ST) y volátiles (SV) se realizó según la metodología descrita en los métodos estandarizados para el análisis de aguas y aguas residuales (APHA, 1995). En el caso del bagazo se determinó la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina (ANSI/ASTM, 1980; ANSI/ASTM, 1977b; ANSI/ASTM, 1977a). Para la vinaza se realizaron análisis de pH, DQO, nitrógeno total (NT) y contenido de Na^+ y K^+ (APHA, 1995). La demanda química de oxígeno (DQO) se determinó por el método de reflujo abierto. El contenido de Na^+ y K^+ , se definió por fotometría de emisión de llama (Corning 410) y el nitrógeno total por el método de Kjeldahl. El contenido de proteínas se determinó a partir del nitrógeno total usando un factor de conversión de 6,25 (Pagés-Díaz y col., 2014).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del sustrato

La caracterización química de cada uno de los sustratos individuales así como de las mezclas estudiadas se muestra en la Tabla 2. Los resultados obtenidos están en correspondencia con resultados alcanzados por otros autores que estudiaron residuos similares (Abril y col., 2012; Cabrera-Díaz, 2017; López-González, 2016). El contenido de ST de los residuales sólidos varió entre un 25% y un 71% para la cachaza y el bagazo respectivamente. En el caso de la vinaza por tratarse de un residual líquido presentó el contenido de sólidos totales más bajo (4%) en comparación con el resto de los sustratos estudiados. Este valor es común en dicho residual. Autores como López-González (2016) y Cabrera-Díaz (2017) han reportado valores de sólidos totales en la vinaza entre 4-5%. Por otra parte, el contenido de SV varió entre un 68% y un 98%. El contenido más elevado de fibras, principalmente lignina y celulosa, se encontró para el caso del bagazo con 27% y 37% respectivamente. La presencia de lignina puede resultar en bajos valores de rendimiento de metano, así como una lenta velocidad de degradación en la fase de hidrólisis. Esto se debe a que este compuesto es un polímero muy complejo que tiene la función de proteger la pared celular de las plantas y por ende actúa como barrera protectora al ataque microbiano (Barakat y col., 2012).

Tabla 2. Caracterización química de los sustratos individuales

<i>Parámetros</i>	<i>Unidad</i>	<i>Bagazo</i>	<i>Cachaza</i>	<i>Vinaza</i>
<i>Sólidos Totales</i>	%	71	25	4
<i>Sólidos Volátiles*</i>	%	98	68	75
<i>pH</i>	-	-	6,2 ^a	4,3
<i>DQO</i>	g/L	-	-	41
<i>Na⁺</i>	mg/L	-	-	175
<i>K⁺</i>	mg/L	-	-	3233,3
<i>Nitrógeno Total</i>	g/L			0,634
<i>Proteínas</i>	g/L			3,96
<i>Celulosa*</i>	%	37	11,3 ^a	-
<i>Hemicelulosa*</i>	%	35	27,1 ^a	-
<i>Lignina*</i>	%	27	9,3 ^a	-

^a Valores reportados por López-González (2016) para cachaza cubana, * Valores reportados en base a peso seco

3.2. Biodegradabilidad de los residuos agro-azucareros

3.2.1. Rendimiento de metano en mono-digestión

La figura 1 muestra el comportamiento de la producción de metano acumulada en el tiempo para cada uno de los sustratos estudiados (a- Mono-digestión y b- Co-digestión). Dentro de los sustratos individuales, la cachaza produce el mayor valor de Y_{CH_4} (252 mLCH₄/gSV) seguido de la vinaza (231 mLCH₄/gSV). Estos resultados están en correspondencia con lo obtenido por otros autores, los cuales reportan un valor de rendimiento de metano para la cachaza en el intervalo de 240-281 mLCH₄/gSV (Janke y col., 2015; López González y col., 2017; Rouf y col., 2010) y de 220-270 mLCH₄/gSV para la vinaza (Janke y col., 2015; López González y col., 2017; Siles y col., 2011).

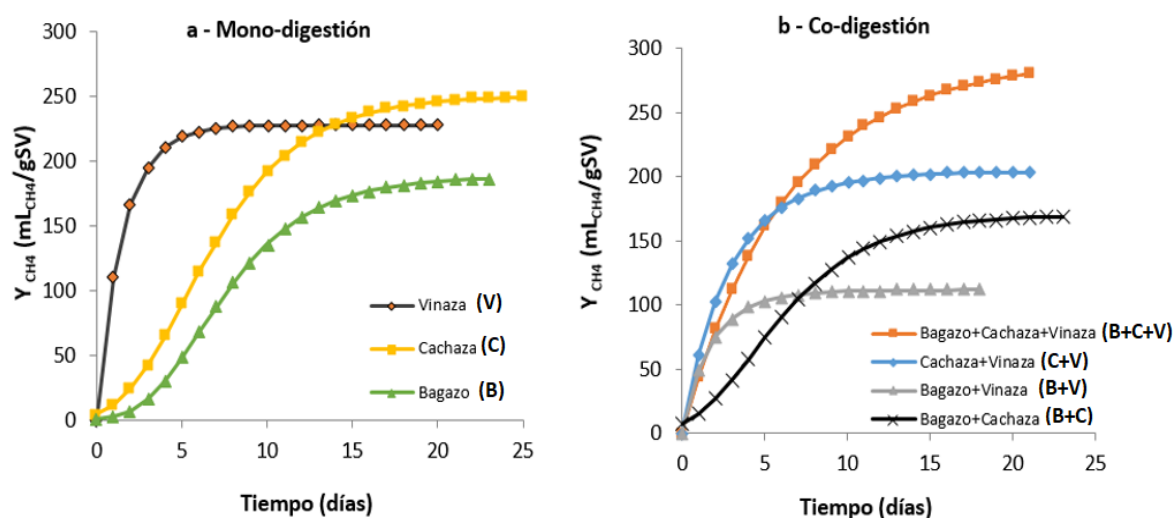


Figura 1. Rendimiento de metano acumulado en el tiempo durante la experimentación en discontinuo para los sustratos individuales (B, C, V) y para las mezclas (B+C+V, C+V, B+V, B+C)

Por otro lado, el bagazo fue el sustrato individual que obtuvo el valor más bajo de rendimiento (e.j., 170 mLCH₄/gSV). Este resultado se debe a que el elevado contenido de lignina presente en el mismo en comparación con la cachaza (un 65% superior) limita la utilización de celulosa y hemicelulosa durante la formación de biogás. Esto se demuestra además, por la fase de retardo de tres días (Figura 1-a, Tabla 2) que presenta la degradación del bagazo en comparación con la cachaza (1,4 días) y la vinaza (0,06 días). Autores como Bolado-Rodríguez et al., (2016) y Janke et al., (2015), han reportado valores de rendimiento de metano para el bagazo de 222 y 236 mLCH₄/gSV respectivamente. Sin embargo, rendimientos de 84,7 mLCH₄/gSV han sido también obtenidos (Inyang y col., 2010). Estas divergencias en los intervalos de rendimiento reportados, se deben fundamentalmente a las diferencias en la composición y variedad de la caña, a las características de la cosecha, a las condiciones del suelo, al tipo de nutrientes aplicado en los campos, a los procesos propios de clarificación, así como a otros factores ambientales (Rouf y col., 2010). En un estudio realizado por Leite et al., (2015) se demostró la influencia de los cambios estacionales en las características de estos

residuos así como su influencia en el rendimiento de metano. Estos cambios resultaron en una variación del rendimiento de un 22% para la vinaza y un 26% para la cachaza.

3.2.2. Cinética de la biodegradabilidad en mono-digestión

La tabla 3 muestra los principales resultados experimentales obtenidos para cada una de las mezclas y sustratos así como los valores predichos por los modelos cinéticos estudiados (1^{er} orden y Gompertz) en términos de Y_{CH_4} , k_0 y R_m . Los resultados cinéticos demuestran que la vinaza fue el sustrato individual que mostró los valores más altos de R_m y k_0 con 87 mLCH₄/gSVd y 0,7 d⁻¹ respectivamente. Este resultado está en correspondencia con el comportamiento exponencial de la curva que se aprecia en figura 1-a. Esto se debe a la presencia de compuestos que pueden ser biodegradados más fácilmente respecto a los residuales lignocelulósicos evaluados (B y C). López-González (2016) obtuvo un valor de k_0 de 0,38 d⁻¹ inferior al obtenido en el presente trabajo, mientras que Janke et al., (2015) obtuvieron valores de k_0 en el intervalo de 0,107 – 0,413 d⁻¹. Estas diferencias estuvieron atribuidas a la materia prima utilizada para la producción de etanol. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la k_0 depende de muchos factores como son la agitación, la temperatura, la naturaleza del sustrato, el tipo de inóculo empleado, etc. El bagazo por otra parte fue el sustrato que mostró una fase de retardo de aproximadamente 3 días y el valor más bajo de k_0 (0,04 d⁻¹) en comparación con el resto de los sustratos individuales. Este resultado está en correspondencia con el elevado contenido de lignina presente en el mismo (27 %) que influye negativamente en la biodegradabilidad de la celulosa y hemicelulosa. Normalmente sustratos con estas características son sometidos a pre tratamientos físicos, químicos o biológicos. Sin embargo, la presencia de los mismos en la co-digestión de residuos es importante para mejorar el balance de nutrientes dentro del reactor así como la capacidad tapón del sistema. Por tanto, ellos ayudan a mantener la estabilidad del reactor a largo plazo.

Tabla 3. Valores experimentales y predichos por los modelos cinéticos de las variables respuesta obtenidas de los diferentes sustratos

<i>Parámetros</i>	<i>Unidad</i>	<i>Bagazo (B)</i>	<i>Cachaza (C)</i>	<i>Vinaza (V)</i>
$Y_{CH_4}^{exp}$	mLCH ₄ /gVS	170 (±37)	252 (±72)	231 (±26)
<i>Gompertz</i>				
$Y_{CH_4}^b$	mLCH ₄ /gSV	185(±8)	248(±72)	222(±22)
R_m	mLCH ₄ /gSVd	20(±3)	25(±6)	87(±8)
λ	días	3(±0,3)	1,4(±0,3)	0,06(±0,08)
R^2	%	99(±0,2)	99(±0,04)	99(±0,7)
<i>1^{er} orden</i>				
$Y_{CH_4}^b$	mLCH ₄ /gSV	202(±12)	270(±75)	227(±20)
k_0	días ⁻¹	0,04(±0,00)	0,07(±0,08)	0,7(±0,1)
R^2	%	93(±0,3)	96(±2)	99(±0,07)
<i>Parámetros</i>	<i>Unidad</i>	<i>B+C</i>	<i>B+V</i>	<i>C+V</i>
$Y_{CH_4}^{exp}$	mLCH ₄ /gSV	201 (±16)	139 (±13)	209 (±79)
<i>Gompertz</i>	mLCH ₄ /gSV	198(±21)	127(±10)	198(±81)

$Y_{CH_4}^b$				
R_m	mLCH ₄ /gSVd	20,7(±5,2)	41(±3)	49(±1,3)
λ	días	0,7(±0,5)	-0,2(±0,0)	-0,09(±0,2)
R^2	%	99(±0,9)	96(±0,5)	98(±0,9)
1^{er} orden				
$Y_{CH_4}^b$	mLCH ₄ /gSV	210(±22)	131(±12)	247(±53)
k_0	días ⁻¹	0,6(±0,3)	0,4(±0,2)	0,2(±0,04)
R^2	%	97(±0,6)	99(±1,1)	99(±0,5)

^a Valor experimental y desviación estándar de las muestras por triplicado

^b Valor predicho por el modelo y desviación estándar en cada caso

3.2.3. Efecto de mezcla. Interacciones sinérgicas y antagónicas

La presencia simultánea de varios tipos de residuos en un proceso de co-digestión anaerobia puede mejorar significativamente el proceso (Mata-Alvarez y col. , 2014) produciendo rendimientos de metano superiores a los obtenidos a partir de cada residuo de manera individual. Una mezcla de sustratos diferentes, puede suplementar nutrientes y elementos trazas necesarios para los microorganismos. Esta heterogeneidad en la composición de los sustratos conlleva a que se desarrollen y crezcan variedad de microorganismos que estimulan el proceso de digestión.

En el presente trabajo fue posible modelar las variables respuestas estudiadas (Y_{CH_4} , R_m , k_0) asumiendo que no se produce efecto de mezcla (sin sinergia o antagonismo) a través de la parte lineal del modelo cúbico especial (Y_{CH_4} , k_0) y el modelo cuadrático (R_m) que resultaron ser los modelos que mejor describen la data experimental. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos. El efecto de dos y tres factores (sustratos) se tuvo en cuenta con los términos cuadráticos y cúbicos del modelo que permite predecir el efecto de mezcla entre los factores y por tanto modelar posibles efectos sinérgicos o antagónicos.

Como se aprecia en tabla 4, la cachaza tuvo el valor más elevado de coeficiente β en el modelo cúbico especial lo que indica que es el sustrato que individualmente realiza el mayor aporte al rendimiento de metano.

Tabla 4. Coeficientes de regresión (β) y significancia estadística (p-valor) estimados por el modelo cúbico especial (Y_{CH_4} y k_0) y por el modelo cuadrático (R_m)

Coeficiente	Sustratos	Efecto sobre Y_{CH_4}		Efecto sobre R_m		Efecto sobre k_0	
			p-valor		p-valor		p-valor
β_B	B	170	-	20	-	0,048	-
β_C	C	252	-	29	-	0,07	-
β_V	V	231	-	87	-	0,66	-
β_{BC}	BC	-41	0,802	-18	0,1573	0,129	0,7814
β_{BV}	BV	-246	0,153	-55	0,0004 ^a	1,198	0,0094 ^a
β_{CV}	CV	35	0,829	-37	0,007 ^a	0,197	0,6243
β_{BCV}	BCV	2429	0,043 ^a	-	-	-6,93	0,0302 ^a

^a p - valor < 0,05 (95% IC) Denota significancia estadística

La mezcla terciaria con la combinación de B+V+C tuvo un efecto sinérgico significativo sobre el rendimiento de metano (p-valor=0,043). Sin embargo, desde el

punto de vista cinético la misma mezcla mostró un efecto antagónico en la constante cinética de velocidad aparente lo que indica que los parámetros cinéticos son independientes del rendimiento de metano. El rendimiento de metano es una variable que define la cantidad de metano producida por una cantidad determinada de materia orgánica inicial y caracteriza la actividad metabólica de un ecosistema metanogénico.

Las mezclas binarias de B+C y de B+V resultaron antagónicas sobre el Y_{CH_4} con valores de coeficientes β negativos, sin embargo, fueron no significativas desde el punto de vista estadístico. Esto significa que bien pueden ser más antagónicas bajo otras condiciones de operación o pueden resultar sinérgicas cuando se operan a largo plazo en operación semi-continua. En un estudio realizado por Pagés-Díaz et al., (2015), se demostró que la estabilidad e inestabilidad del proceso a largo plazo, así como, el desarrollo de la comunidad microbiana, estuvo en concordancia con la sinergia y el antagonismo encontrado previamente en operación discontinua. Sin embargo, más estudios se requieren para esclarecer el origen del sinergismo y el antagonismo, así como, su influencia directa en las rutas metabólicas de formación de metano.

4. CONCLUSIONES

1. En el presente trabajo se evaluó la biodegradabilidad de residuos procedentes de la industria agro-azucarera cubana para producir biogás.
2. Los sustratos bajo estudio mostraron un elevado potencial para producir metano, siendo la cachaza el sustrato individual que mostró el mayor rendimiento (e.j., 252 NmLCH₄/gSV).
3. Desde el punto de vista cinético la vinaza mostró los mejores valores de k_0 y R_m . Sin embargo, el efecto de mezclar bagazo+cachaza+vinaza mostró tener un efecto sinérgico positivo y significativo en el rendimiento de metano con un aumento de hasta un 23% en comparación con el aporte individual de los sustratos por separado.

REFERENCIAS

- Abril, D., Medina, M., and Abril, A., Sugar cane bagasse prehydrolysis using hot water., *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 29, No. 1, 2012, pp. 31-38.
- ANSI/ASTM, Standard method for preparation of extractive-free wood, American National Standard Institute, Washington DC, 1980.
- ANSI/ASTM, Standard test methods for lignin in wood D 1106-56, American National Standard Institute. Washington DC, 1977a.
- ANSI/ASTM, Standard test methods for alpha-cellulose in wood D 1103-60, American National Standard Institute, Washington DC, 1977b.
- APHA, A., WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA, 1995, pp. 2350-3500.
- Baez-Smith, C., Production of Bioenergy Using Filter Cake Mud in Sugar Cane Mill Factories, in: Sugar Processing Research Institute, September 29-October 1st, 2008 Florida, USA.
- Barakat, A., Monlau, F., Steyer, J.P., and Carrere, H., Effect of lignin-derived and furan compounds found in lignocellulosic hydrolysates on biomethane production.,

- Bioresource Technology, Vol. 104, 2012, pp. 90-99.
- Bolado-Rodríguez, S., Toquero, C., Martín-Juárez, J., Travaini, R., and García-Encina, P.A., Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, Vol. 201, 2016, pp. 182-190.
- Cabrera-Díaz, A., Propuesta integral para el tratamiento de vinaza con recuperación de productos de valor agregado., Centro de Estudios de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Tecnológica de La Habana "Jose Antonio Echeverría" (CUJAE), 2017, Cuba.
- Christofolletti, C.A., Escher, J.P., Correia, J.E., Marinho, J.F.U., and Fontanetti, C.S., Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use., *Waste Management*, Vol. 33, No. 12, 2013, pp. 2752-2761.
- Gutiérrez, A.S., Eras, C.J.J., Huisingh, D., Vandecasteele, C., and Hens, L., The current potential of low-carbon economy and biomass-based electricity in Cuba. The case of sugarcane, energy cane and marabu (*dichrostachys cinerea*) as biomass sources., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 172, 2018, pp. 2108-2122.
- Hansen, T.L., Schmidt, J.E., Angelidaki, I., Marca, E., la Cour Jansen, J., Mosbæk, H., Christensen, T.H., and Abril, A., Method for determination of methane potentials of solid organic waste., *Waste Management*, Vol. 24, No. 4, 2004, pp. 393-400.
- Inyang, M., Gao, B., Pullammanappallil, P., Ding, W., and Zimmerm, A.R., Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse., *Bioresource Technology*, Vol. 101, No. 22, 2010, pp. 8868-8872.
- Janke, L., Leite, A., Nikolausz, M., Schmidt, T., Liebetrau, J., Nelles, M., and Stinner, W., Biogas production from sugarcane waste: Assessment on kinetic challenges for process designing., *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 16, No. 9, 2015, pp. 20685-20703.
- Janke, L., Leite, A.F., Nikolausz, M., Radetski, C.M., Nelles, M., and Stinner, W., Comparison of start-up strategies and process performance during semicontinuous anaerobic digestion of sugarcane filter cake co-digested with bagasse., *Waste Management*, Vol. 48, 2016, pp. 199-208.
- Leite, A.F., Janke, L., Harms, H., Zang, J.W., Fonseca-Zang, W.A., Stinner, W., and Nikolausz, M., Assessment of the Variations in Characteristics and Methane Potential of Major Waste Products from the Brazilian Bioethanol Industry along an Operating Season., *Energy & Fuels*, Vol. 29, No. 7, 2015, pp. 4022-4029.
- López-González, L.M., Efecto del pre-tratamiento de la cachaza y su co-digestión con vinaza en la digestión anaerobia, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2016, Cuba.
- López-González, L.M., Pereda-Reyes, I., Romero Romero, O., Budde, J., Heiermann, M., and Vervaeren, H., Antagonistic Effects on the Methane Yield of Liquid Hot-Water Pretreated Press Mud Fractions Co-digested with Vinasse., *Energy Fuels*, Vol. 29, No. 11, 2015, pp. 7284-7289.
- López González, L.M., Pereda Reyes, I., and Romero Romero, O., Anaerobic co-digestion of sugarcane press mud with vinasse on methane yield., *Waste Management*, Vol. 68, 2017, pp. 139-145.

- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M., and Astals, S., A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013., *Renew. Sust. Energy Rev.*, Vol. 36, 2014, pp. 412-427.
- Pagés-Díaz, J. 2015. Biogas production from slaughterhouse waste: Mixture interactions in co-digestion., Doctoral Thesis, Ed. by University of Borås, ISSN 0280-381X, nr. 75. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hb:diva-847>.
- Pagés-Díaz, J., Pereda-Reyes, I., Taherzadeh, M.J., Sárvári-Horváth, I., and Lundin, M., Anaerobic co-digestion of solid slaughterhouse wastes with agro-residues: Synergistic and antagonistic interactions determined in batch digestion assays., *Chemical Engineering Journal*, Vol. 245, 2014, pp. 89-98.
- Pagés-Díaz, J., Westman, J., Taherzadeh, M.J., Pereda-Reyes, I., and Sárvári-Horváth, I., Semi-continuous co-digestion of solid cattle slaughterhouse wastes with other waste streams: Interactions within the mixtures and methanogenic community structure., *Chemical Engineering Journal*, Vol. 273, 2015, pp. 28-36.
- Rouf, M.A., Bajpai, P.K., and Jotshi, C.K., Optimization of biogas generation from press mud in batch reactor., *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.*, Vol. 45, No. 4, 2010, pp. 371-376.
- Siles, J.A., García-García, I., Martín, A., and Martín, M.A., Integrated ozonation and biomethanization treatments of vinasse derived from ethanol manufacturing., *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 188, No. 1, 2011, pp. 247-253.