

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS ARROCEROS POR BIO-CONVERSIÓN. CASO DE ESTUDIO CUBA

Luz María Contreras-Velásquez¹
Ileana Pereda-Reyes²
Osvaldo Romero-Romero¹

¹Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez" (UNISS). Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI), Profesora, Avenida De Los Mártires. N° 360, 60100 Sancti Spiritus, Cuba, 41-336118, lucy@suss.co.cu

²Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE). Calle 114. N° 11901. Marianao. Ciudad Habana, Cuba, Centro de Estudio de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Directora del CIPRO, 7-2663202

¹Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez" (UNISS). Avenida De Los Mártires. N° 360, 60100 Sancti Spiritus, Cuba, Vicerrector de Investigaciones, Postgrados y Relaciones Internacionales, 41-336155

Recibido: 25/may/2012 -- Aceptado: 2/jul/2012 - DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES1010>

ENERGETIC USE OF RICE RESIDUALS BY BIO-CONVERSION. STUDY CASE CUBA

ABSTRACT:

Rice harvesting and production generate residual biomass that at present do not possess an environmentally sustainable disposition route, although they could be an important source of carbon for energy processes. A biochemical characterization of rice residuals –rice straw, rice husk and residues from the rice drying process - from the central region of Cuba is carried out to assess their energetic potential through their bio-conversion route to biogas. Additionally, the greenhouse gas emissions (GHG) caused by the current use of those residuals were estimated, as well as the mitigation potential of these emissions in the concept of electricity generation from renewable energy sources. The study demonstrated that rice residuals, except for rice husk whose yield was low, possess a chemical composition adequate for biogas production, with limitations only in the relationship C/N. The highest biogas potential of 0.52 m³kgSV⁻¹ corresponded to rice straw as mono-substrate during 36 day digestion time, with 55% vol of methane under thermophilic conditions. The analysis of the energy use of these residuals via biogas demonstrated that in this concept it could be generated a residual generation index of 0.73 MWh⁻¹ and up to 1.5% of the electricity consumption of the country. At the same time, this use would contribute to diminish in 0.5% the net emissions of the country and up to 7.2% those of the energy sector.

Keywords: biogas, rice straw, rice husk, rice residues from the drying process, methane, GHG emissions

RESUMEN:

La cosecha y producción de arroz genera biomasa residual que actualmente no posee una ruta de disposición ambientalmente sostenible, sin embargo podrían ser una fuente importante de carbono para procesos energéticos. En el presente trabajo se realiza una caracterización bioquímica de residuos arroceros: paja de arroz, cáscara de arroz y residuo del proceso de secado, provenientes de la región central de Cuba con el objetivo de evaluar su potencial energético mediante la ruta de bio-conversión a biogás. Adicionalmente se estimaron las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que provoca el uso actual de estos residuos así como el potencial de mitigación de estas emisiones por concepto de generación de electricidad a partir de una fuente renovable de energía. El estudio demostró que los residuos arroceros, con excepción de la cáscara de arroz que mostró muy bajo rendimiento, poseen una composición química adecuada para la producción de biogás, con limitaciones solamente en la relación C/N. El mayor potencial de biogás de 0,52 m³kgSV⁻¹ correspondió a la paja de arroz como mono-sustrato durante un tiempo de digestión de 36 días, con 55% vol de metano bajo condiciones termofílicas. El análisis del uso energético de estos residuos vía biogás demostró que por este concepto se podrían generar con un índice de 0,73 MWh⁻¹ de residuo y hasta un 1,5% del consumo de electricidad de país, a la vez que se contribuiría a disminuir en un 0,5% las emisiones netas del país y hasta un 7,2% las del sector energético.

Palabras clave: biogás, paja de arroz, cáscara de arroz, residuo de secado, metano, emisiones de GEI

1.- INTRODUCCION

La creciente preocupación por un suministro de energía seguro, sumado al negativo impacto ambiental del uso de los combustibles fósiles, ha generado una presión en la sociedad en la búsqueda de alternativas renovables (Abreu et al., 2010). Un potencial energético que aún no se aprovecha en su totalidad se encuentra disponible en los residuos sólidos de la agricultura. En particular el interés en la energía de la biomasa, o llamada bioenergía, ha aumentado por ser una fuente que se puede generar a nivel local y con amplia disponibilidad; la tercera entre los recursos de energía primaria, después del carbón y el petróleo, además de ser potencialmente neutral en relación con las emisiones de CO₂ (McKendry, 2002).

Específicamente de la actividad agro-industrial del arroz se estima que a nivel mundial se tienen anualmente 731 millones de toneladas de paja arroz (Zhao et al., 2010) y más de 113 millones de toneladas métricas de cáscara (Yu et al., 2009). La producción de energía a partir de estos residuos ha sido identificada como una alternativa económicamente factible (Peterson et al., 2007). Además según la literatura el contenido energético de la paja de arroz es 14 MJkg⁻¹ (Gadde et al., 2009) y entre 13,2-14,2 MJkg⁻¹ para la cáscara de arroz (Valverde et al., 2007), por lo que es muy objetivo considerarlos como una fuente renovable para la generación de energía.

En este sentido, el biogás, producto del tratamiento anaerobio de la biomasa orgánica: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos, residuos agro-industriales y cultivos energéticos, se considera una forma de energía limpia y renovable que puede sustituir fuentes de energía convencionales, especialmente en áreas rurales (Weiland, 2010) y una solución que abarca ambas aristas: medioambiental y energética (Lübken, 2010). Por otro lado, constituye una de las vías más eficientes de manejo y generación de energía a partir de biomasa, en término de relación de energía de salida/energía de entrada (28,8 MJMJ⁻¹), entre todas las tecnologías de producción de energía por rutas de conversión biológica o termo-química (Chandra et al., 2012).

En Cuba la producción de arroz gana cada vez más en importancia, ya que es un alimento básico para la población con una producción estimada para el 2015 de 1 086 000 t. En la región central de Cuba existe una elevada producción de arroz y concentrada en el Complejo Agro-industrial Arrocero (CAI) "Sur del Jibaro". Este cuenta con un total de 83 875 ha de tierra, de éstas 27 217 ha dedicadas al cultivo del arroz y 23 000 ha aproximadamente a la ganadería. En el año 2011 la producción fue de 112 592 t de arroz y se estima un crecimiento prospectivo de 5 000 t anuales hasta el 2016. Durante el proceso productivo (figura 1) se generan varios residuos de los cuales el salvado o polvo de arroz y la cabecilla, se consideran subproductos al utilizarse como alimento animal por el valor nutritivo que poseen, mientras que la paja de arroz o restos de la planta después de la cosecha, así como la cascarilla o cáscara de arroz, las impurezas o residuos del secado, obtenidas en el procesamiento industrial de secado y limpieza del grano, no cuentan actualmente con una disposición final ambientalmente adecuada (García Rivero, 2010).

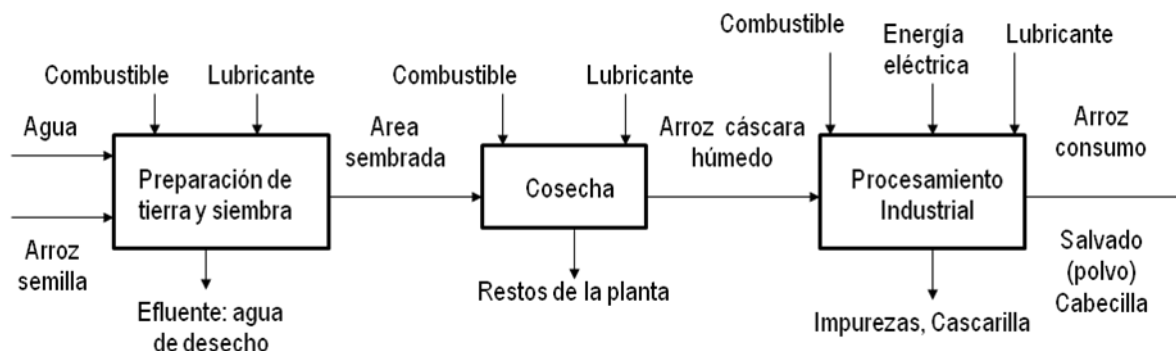


Fig. 1. Esquema energético-productivo del CAI arrocero "Sur del Jibaro" en la provincia de Sancti Spiritus. Fuente (García Rivero, 2010).

Aunque existen métodos disponibles para el uso de la paja por ejemplo: como alimento animal, combustible, fibras para pulpeado, etc., la práctica más usual es quemarla a cielo abierto, provocando contaminación atmosférica y erosión en

los suelos (Zhang R. y Zhan Z., 1999). En cuanto a la cáscara de arroz la tendencia mundial es la conversión en energía mediante procesos termo-químicos debido a su alto contenido en componentes inorgánicos (De Sousa-Santos, 1994; Brigwater, 1995; Yin et al., 2002). Sin embargo, en relación a los residuos del proceso de secado no se ha encontrado en la literatura valores de producción de energía a partir de los mismos, ni por métodos biológicos ni por procesos de conversión termoquímica.

Varios autores han investigado sobre el rendimiento en biogás por vía anaerobia de los residuos arroceros (paja y cáscara) provenientes de regiones como la India, China, California (EUA) (Lequerica, 1984; Kalra y Panwar, 1986; Somayaji, 1994; Zhang et al., 1999; Zhao et al., 2010). Chandra et al. (2012) reportan para la paja un rendimiento de metano 167 kgCH₄-t⁻¹ y estima a partir de este rendimiento un potencial energético de 8 352 MJ. Por su parte Gadde et al. (2009), concluyen que el potencial de energía de la paja de arroz como combustible renovable en países altos productores de arroz como la India, Tailandia y Filipinas es de 311,6-141,8 PJ, con una posible generación de electricidad de hasta 10,8 TWh considerando solamente un 50% de eficiencia de recolección del residuo.

Es necesario considerar que el uso de los residuos de la producción de arroz para producir biogás y generar energía debe tener una incidencia directa en la reducción del consumo de combustibles fósiles para la generación energética y en consecuencia tendrá un efecto económico positivo en el sistema energético al evitar importaciones. A su vez contribuirá a mitigar los efectos del cambio climático al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en primer lugar por los que se generan durante la fermentación anaerobia espontánea de estos residuos cuando se dejan en el campo o cuando se queman al aire libre y en segundo lugar por las emisiones evitadas al sistema energético nacional por no generar energía eléctrica con combustibles fósiles.

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el potencial de biogás en Cuba mediante la utilización de residuos en la producción de arroz y en consecuencia estimar el aporte energético, económico y de minimización de la emisión de gases de efecto invernadero por el uso energético de estos residuales, en comparación con el uso actual.

2.- MATERIALES Y METODOS

2.1 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOGÁS DE RESIDUOS ARROCEROS

Para estimar el potencial de biogás en Cuba, mediante la fermentación anaeróbica de residuos arroceros, se tomaron como base los residuos agroindustriales del arroz: paja de arroz (PA), cáscara de arroz (CA) y el residuo del proceso de secado (RS), pertenecientes a la variedad cubana J-104 y recolectados en julio del 2008 en la región central de Cuba. Estos fueron transportados en bolsas de nylon para asegurar la conservación de las muestras al Instituto Agrario de Bornim-Potsdam (ATB) en Alemania, donde se llevó a cabo todo el trabajo experimental por parte de los autores, como parte de una colaboración de varios años con dicho instituto.

Una caracterización químico-física de los residuos arroceros y de los inóculos empleados en cuanto a los parámetros: pH, sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), composición elemental (C, N, S, H), fibra cruda (FC) y lignina (L), se realizaron de acuerdo con los métodos estándar descritos en los manuales para análisis de aguas y aguas residuales (APHA-AWWA-WPCF, 1998) y para análisis de pastos y forrajes (VDULA, 1997). En el caso de la proteína cruda (PC) se calculó como N_{total}, según el método Kjeldahl, multiplicado por 6,25. Se realizó una preparación previa de las muestras por precalentamiento a 60 °C y posteriormente una disminución de tamaño hasta lograr un polvo homogéneo.

El potencial bioquímico de biogás de cada residuo arroceros se determinó según la metodología descrita en el manual VDI-4630 (2006), aplicando un pretratamiento físico y tamizado para lograr un tamaño de partícula de 1-3 mm para la cáscara y residuo de secado y de 3-5 mm en el caso la paja de arroz (figura 2).



Fig. 2. Residuos arroceros después de pretratamiento físico: paja de arroz (izquierda), residuo del proceso de secado (centro), cáscara de arroz (derecha).

Con el fin de analizar la influencia de la temperatura en el proceso de degradación, se trabajó a dos temperaturas 37 y 55°C, controladas mediante baños de agua termostatados. En el ensayo se utilizaron reactores de 2 L y a cada reactor se adicionó 1,5 kg de inóculo mesofílico o termofílico según el caso, provenientes de lodos anaerobios de plantas de biogás de la región de Brandenburg, Alemania, que operan a intervalos de temperaturas mesofílicas y termofílicas. Estos fueron previamente agotados a fin de eliminar el material orgánico biodegradable residual. Una caracterización de los inóculos se muestra en la tabla I.

Parámetro	Inóculo mesofílico	Inóculo termofílico
pH	7,6	8,3
ST (%MF)	3,6	3,1
SV (%ST)	62,3	57,3
SV(%MF)	2,2	1,8

Tabla I. Caracterización química de inóculos. (MF: masa fresca)

Posteriormente, se adicionó a cada reactor una cantidad de residuo arrocerero (sustrato) que se calcula de acuerdo a la ecuación 1 (Linke y Schelle, 2000). Donde p_i es la relación inóculo/sustrato, m_i y m_s son la masa en kg de inóculo y de sustrato y c_i , c_s los sólidos volátiles en el inóculo y el sustrato en unidades de gkg^{-1} . En este estudio se empleó una relación inóculo/sustrato igual a 2, recomendada en la literatura con el fin de reducir la fase de retardo o un fracaso en el reactor (Angelidaki *et al.*, 2009; Linke y Schelle, 2000; VDI-4630, 2006). Para cada residuo se montaron tres réplicas en cada variante de temperatura y se empleó un reactor de control (inóculo sin sustrato).

$$p_i = \frac{m_i \cdot c_i}{m_s \cdot c_s} \quad (1)$$

El volumen de biogás producido fue medido por desplazamiento de líquido (solución saturada de NaCl 26%) y se normalizó acorde con VDI-4630 (2006). La composición del biogás (CH_4 y CO_2) se analizó mediante un analizador de gases SEWERIN SR2-DO. La producción de biogás V_B se reportó como valores promedios de cada experiencia realizada en triplicado

2.2 RENDIMIENTO DE BIOGÁS

El rendimiento de biogás y_B ($\text{m}^3 \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$) se calculó como el volumen de biogás producido por unidad de peso de sustrato adicionado al reactor en término de sólidos volátiles m_s (kg_{SV}), según la ecuación 2.

$$y_B = \frac{V_B}{m_s} \quad (2)$$

Para una aproximación a la cinética de la degradación anaerobio se empleó un modelo cinético de primer orden, pues se considera uno de los modelos más sencillos aplicados a la digestión anaerobia de sustratos complejos y ha sido utilizado con éxito para cuantificar la extensión de los procesos inhibitorios (Rao y Singh, 2004), para evaluar la disponibilidad de sustratos (Lopes *et al.*, 2004), y en la determinación de la etapa limitante de la velocidad como la hidrólisis (Vavilin *et al.*, 2004). El ajuste de los datos experimentales al modelo cinético de primer orden en forma exponencial (ecuación 3) se realizó mediante un análisis de regresión no lineal utilizando el Software SPSS 15.0 para Windows, donde $y(t)$ es la producción de biogás acumulada ($\text{m}^3 \text{kg}_{\text{sv}}^{-1}$), y_{max} el rendimiento máximo de biogás ($\text{m}^3 \text{kg}_{\text{sv}}^{-1}$), k representa la constante de velocidad de la reacción (d^{-1}) y t el tiempo de digestión (d). La prueba t de Student's se utilizó para probar si existe diferencia significativa entre los parámetros cinéticos con la temperatura (Gunaseelan, 2004)

$$y(t) = y_{\text{max}}(1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

Para calcular el potencial de biogás a partir de residuos arroceros en la provincia central de Sancti Spíritus se tomó la producción del Complejo agroindustrial arrocero "Sur del Jíbaro" en el año 2011, además de la prospectiva de crecimiento hasta el 2016. Para ello solo se consideró el uso energético por la ruta de la bioconversión a biogás de la paja de arroz y el residuo del proceso de secado, ya que la cáscara de arroz mostró muy bajo rendimiento de biogás, y se asumieron los índices de generación de la mencionada entidad, siendo estos de $1,3 \text{ t t}^{-1}$ de arroz para la paja y de $0,04 \text{ t t}^{-1}$ de arroz para el residuo de secadero.

2.3 POTENCIAL DE SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLE Y MITIGACIÓN DE GEI

El combustible equivalente en toneladas (ecuación 4) que puede sustituirse por la ruta de bioconversión a biogás, se estimó según el factor de conversión de 0,49 tonelada de combustible equivalente por tonelada de biogás, que reporta el Ministerio de la Industria Básica en Cuba (2012) y de forma similar se determinó la energía eléctrica en MWh (ecuación 5) que sería posible generar, teniendo en cuenta que durante el 2011 el consumo de combustible equivalente en Cuba fue de $0,3328 \text{ tMWh}^{-1}$.

$$\text{Combustible equivalente} = \text{producción biogás total} \cdot 0,49 \quad (4)$$

$$\text{Energía eléctrica} = \text{Combustible equivalente} \cdot 0,3328 \quad (5)$$

La mitigación de GEI o emisiones evitadas anuales EE en toneladas de CO_2 equivalente (tCO_2e), se estimaron al considerar que se dejan de combustionar a cielo abierto estos residuos ECCA, que es el destino actual de los mismos y según Gadde *et al.* (2009) pueden calcularse por la ecuación 6; a esto se adicionó las emisiones por evitar la generación eléctrica con combustible fósil EGE, para un factor de emisión específico del país de $0,8 \text{ tCO}_2\text{eMWh}^{-1}$ (Pérez *et al.* 2012). En el cálculo de la generación eléctrica se tuvo en cuenta además, que la generación de electricidad en Cuba tiene pérdidas por transmisión de 11,6% las que se deben adicionar a la generación total evitada, pues la generación a partir de biogás de forma descentralizada y cercana a los consumidores de EE, elimina dichas pérdidas.

$$EE = E_{\text{CCA}} + E_{\text{GE}} \quad (6)$$

Para estimar E_{CCA} (ecuación 7) se consideraron las emisiones de CH_4 como $1,2 \text{ gkg}^{-1}$ de biomasa seca y de NO_2 como $0,07 \text{ gkg}^{-1}$ de biomasa seca, mientras que las CO_2 se despreciaron pues se considera que tienen una influencia neta igual a cero (Gadde *et al.* 2009). Además se consideró un factor de combustión f_{Co} igual 0,8 como la fracción de la masa combustionada durante la quema a cielo abierto.

$$E_{CCA} = (FE_{CH_4} * Q * f_{Co}) * PCG_{CH_4} + (FE_{NO_2} * Q * f_{Co}) * PCG_{NO_2} \quad (7)$$

donde:

Q, Cantidad de residuo (ta^{-1})

PCG_{CH₄}, potencial de calentamiento global de CH₄ igual 25

PCG_{NO₂}, potencial de calentamiento global de NO₂ igual 298

3.- RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE COSECHA Y PRODUCCIÓN DE ARROZ

La tabla II presenta los resultados obtenidos de los parámetros químicos analizados a los residuos arroceros cubanos de la región central del país: paja de arroz (PA), cáscara de arroz (CA) y residuo del proceso de secado (RS). Como se puede apreciar estos materiales tienen un alto contenido en sólidos volátiles por lo que se considera que tienen un buen potencial para la producción de biogás, sin embargo, presentan un alto contenido de fibra dado por los componentes lignocelulósicos que forman su estructura (celulosa, hemicelulosa y lignina), lo que afecta la biodegradabilidad de estos residuos. En cuanto a la relación C/N, la paja de arroz y la cáscara presentan valores de 43 y 99 respectivamente, superiores al intervalo óptimo 20:1-30:1 que plantea la literatura para un buen desempeño del proceso de digestión anaeróbico (Weiland, 2010), mientras que el residuo de secadero mostró tener una mejor relación con un valor de 33. Para suplir este déficit de nitrógeno se sugiere la adición de una fuente de nitrógeno externa utilizando excretas o químicos como NH₃ o NH₄Cl (Zhang *et al.*, 1999; He *et al.*, 2008).

Parámetro	Unidad	Paja de arroz	Cáscara de arroz	Residuo de secadero
pH	-	6,46	6,60	7,39
Sólidos totales (ST)	(%)	87,81	89,23	89,30
Sólidos volátiles (SV)	(%ST)	79,55	77,78	77,54
Carbono (C)	(%ST)	37,94	37,72	36,97
Nitrógeno (N)	(%ST)	0,88	0,38	1,12
Azufre (S)	(%ST)	0,130	0,097	0,157
Hidrógeno (H)	(%ST)	5,53	N.D.	N.D.
Fibra cruda (FC)	(%ST)	33,72	46,94	33,69
Proteína cruda (CP)	(%ST)	5,5	2,4	6,9
Lignina (L)	(%ST)	8,58	18,89	10,39
C:N	-	43	99	33

Tabla II. Caracterización de los residuos arroceros.

Al comparar estos resultados con los reportados en la literatura se observa que los valores de los parámetros analizados están en el intervalo de los reportados a nivel mundial (Kalra y Panwar, 1986; Zhang y Zhang, 1999; Valverde *et al.*, 2007 y He *et al.*, 2008). En el caso de la paja de arroz hay poca variabilidad en cuanto a los parámetros ST y SV aún cuando provienen de diferentes regiones como China, India y California, no siendo así en el caso del contenido de nitrógeno, lo que afecta consecuentemente la relación C/N. Esto puede responder a diferencias en la composición de estos residuos, dado por la incidencia de factores como la variedad y la forma de cultivo entre otros, a la vez que pueden influir de forma significativa en el rendimiento de biogás (Amon *et al.*, 2007). En cuanto al residuo del proceso de secado no se reportan estudios anteriores que analicen la composición y características químicas de este material por lo que este resultado constituye un aspecto novedoso de importancia práctica al tratarse de un material orgánico que en las condiciones de Cuba constituye una fuente contaminante y que podría ser tratado por vía anaerobia.

3.2 RENDIMIENTO DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS DE COSECHA Y PRODUCCIÓN DE ARROZ

Los resultados de rendimiento máximo de biogás para cada residuo a temperatura mesofílica y termofílica, considerando una cinética de primer orden se muestran en la figura 3.

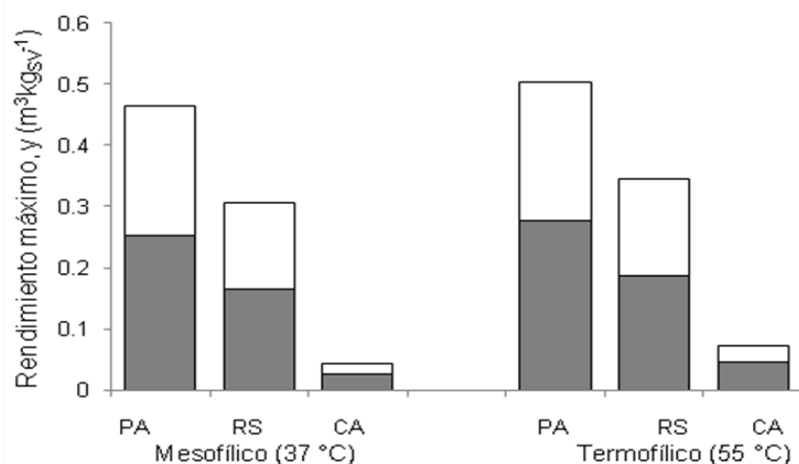


Fig. 3. Rendimiento de biogás de residuos arroceros. El área sombreada corresponde al rendimiento de metano.

Como se observa los mayores rendimientos de biogás en ambos intervalos de temperatura se obtuvieron para la paja de arroz, seguido del residuo del proceso de secado, mientras la cáscara de arroz mostró muy bajo rendimiento en ambos casos. Este comportamiento se corresponde con el contenido de lignina que presentan estos residuos, con un efecto negativo en la biodegradabilidad de estos materiales (Chandler *et al.*, 1980).

El potencial bioquímico de metano de paja de arroz en ensayos a *batch* se reporta por Chandra *et al.*, 2012 con valores de 0,241-0,367 m³ kg_{SV}⁻¹ para un tamaño de partícula de 30-1 mm. Mientras que rendimientos ligeramente superiores a los obtenidos en el presente estudio se reportan por Zhao *et al.*, (2010) y He *et al.*, (2008), cuando se aplican pretratamiento químicos y enzimáticos, facilitando la hidrólisis de los compuestos complejos, pero a la vez se encarece el proceso por el costo de los insumos. De forma similar ocurre en los estudios de Hill y Robert, (1981), Kalra *et al.* (1986) y Somayaji y Khanna (1994), que abordan la codigestión de estas biomásas con excretas vacunas con el fin de optimizar la relación C/N, mientras que los resultados del presente trabajo son obtenidos a partir de estos residuos como monosustrato, empleando solamente pretratamiento físico de reducción de tamaño de partícula y sin modificar la relación C/N original de los materiales, lo cual refleja la novedad de esta investigación a la vez que fundamenta el uso práctico de estos materiales como única fuente de carbono cuando no existe disponibilidad de otras fuentes para la codigestión.

La temperatura influyó de forma favorable en el proceso de bioconversión contribuyendo al aumento en el rendimiento de biogás, sin embargo la cinética se favorece significativamente ($\alpha < 0.05$) con el aumento de la temperatura. Los parámetros cinéticos y_{\max} y k , así como el coeficiente de correlación R^2 se muestran en la tabla III. Estos parámetros son de gran utilidad en el análisis del desempeño de digestores así como para un adecuado diseño de los mismos.

Sustrato	Mesofílico			Termofílico		
	y_{\max} ($\text{m}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$)	k (d^{-1})	R^2	y_{\max} ($\text{m}^3\text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$)	k (d^{-1})	R^2
Paja	0,463	0,078	0,99	0,503	0,168	0,99
Cáscara	0,043	0,101	0,99	0,073	0,111	0,99
Residuo de secado	0,306	0,179	0,97	0,345	0,246	0,98

Tabla III. Valores de y_{\max} y constante de velocidad de 1er orden k .

Valores de la constante de velocidad k (0,027–0,031) inferiores a los alcanzados en el presente trabajo, se reportan en un estudio de la digestión de la paja de arroz empleando lodos adaptados y diferentes niveles de fosfato (Lei *et al.*, 2010) pero a una temperatura de digestión de 22°C lo que corrobora el efecto de la temperatura en la cinética del proceso (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991). Jash y Ghosh, (1996) emplearon este modelo de primer orden en régimen mesofílico (37°C) para estudiar el efecto de diferentes variables en la solubilización de diferentes materiales sólidos durante la digestión anaerobia. Obtuvieron que en el caso de la paja de arroz la constante de velocidad k varió de 0,101 d^{-1} a 0,082 d^{-1} cuando el sistema no se agitó, lo que confirma que la cinética del proceso puede ser afectada por diferentes factores como tamaño de partícula, temperatura y velocidad de agitación entre otros.

3.3 APOORTE ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

Una valoración energética en cuanto a combustible equivalente y energía eléctrica no utilizada o que se podría obtener por la ruta de bio-conversión a biogás de los residuos arroceros entre los años 2005 al 2016, sin incluir la cáscara de arroz como sustrato, se muestra en la figura 4. Se analizaron tres escenarios de acuerdo a la eficiencia de la recolección de la paja de arroz durante la cosecha. Un escenario I para un 50% de recolección de la paja de arroz, el escenario II para 100% de recolección y un escenario III para 100% de recolección de la paja más el residuo del proceso de secado. Para ello se tomaron los valores de rendimientos de biogás obtenidos experimentalmente a la temperatura termofílica.

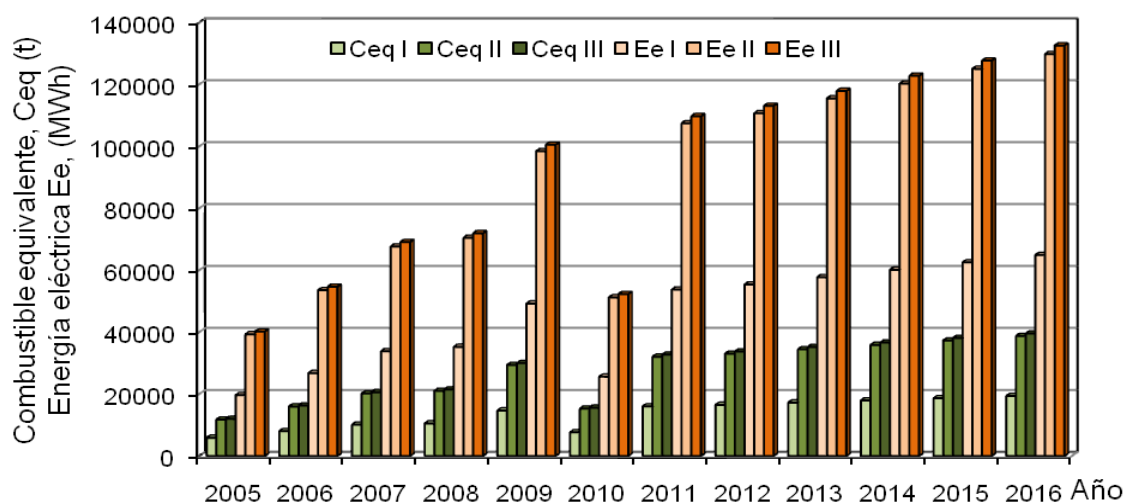


Fig. 4. Combustible equivalente y energía eléctrica sustituible por bio-conversión a biogás de residuos arroceros.

Como se observa, lograr un 100% de recolección de la paja de arroz significa duplicar la producción de biogás, mientras que el residuo del proceso de secado no tiene un aporte relevante. De este análisis se obtiene un índice energético de

0,22 tCeqt⁻¹ de residuo y en cuanto a la generación eléctrica de 0,73 MWh⁻¹ de residuo. De la misma forma, el aporte económico sobre la base del precio promedio de la tonelada de combustible (Fuel oil) importada durante el 2011 en el país de \$680.00, se ahorraría por este concepto \$148.00 por tonelada de residuo arrocero utilizado, lo que significa 22,2 millones de pesos aproximadamente para el escenario III.

3.4 MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

La figura 5 muestra el comportamiento de las emisiones estimadas de GEI referidas como toneladas de CO₂ equivalentes que pudieron ser evitadas desde el 2005 hasta la fecha, así como la tendencia hasta el 2016 para los tres escenarios analizados.

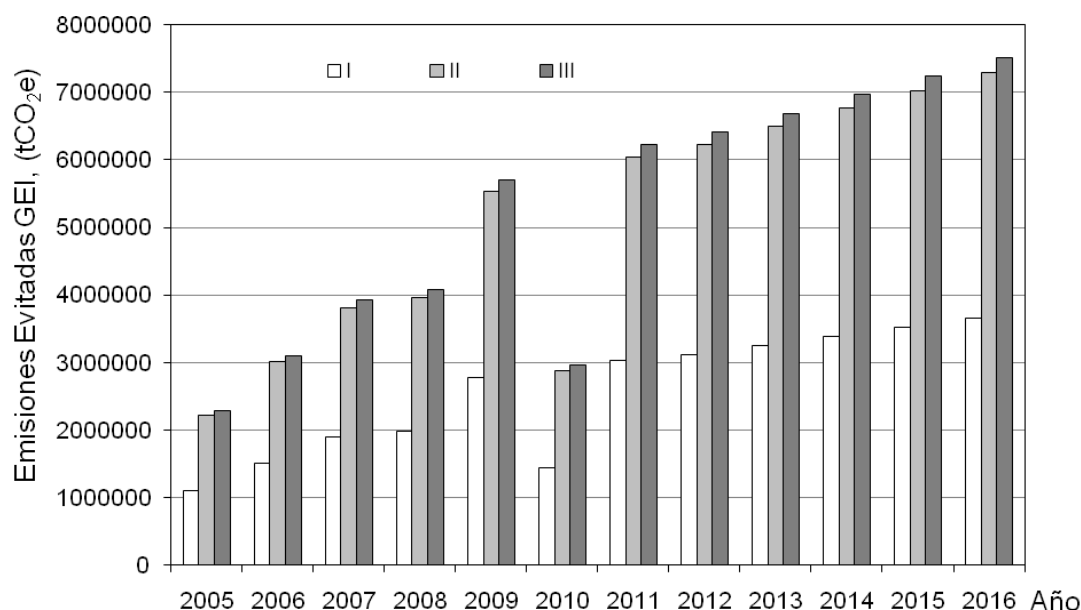


Fig. 5. Emisiones evitadas de gases de efecto invernadero de acuerdo a los escenarios.

Como se observa por este concepto de utilizar los residuos arroceros, paja y residuo del proceso de secado, para la producción de biogás con fines energéticos y según la prospectiva de crecimiento de la producción arroceras, podrían evitarse emitir a la atmósfera 7,5 millones de toneladas aproximadamente de GEI para el año 2016.

A partir de la producción de arroz de Cuba en el año 2011, de 275 millones de toneladas y asumiendo los mismos índices de generación de residuos, así como los valores de emisiones netas del país reportados en el año 2010 y específicamente del sector energético (Pérez *et al.* 2012), es posible estimar en cuanto se podrían mitigar estas emisiones por el concepto del uso actual, comparado con el empleo de estos residuos agrícolas en la producción de biogás con fines energéticos y poder sustituir por esta vía combustible fósil. De acuerdo a los escenarios analizados, si se utilizan para generar energía el biogás obtenido de los residuos arroceros solo en la provincia de Sancti Spíritus, se podría disminuir en un 0,1-0,2% las emisiones netas del país y entre 1,5-3,2% a las emisiones del sector energético, mientras que si se considera la producción de arroz de Cuba significaría entre 0,2-0,5% de las emisiones netas y en un 3,4-7,6% de las del sector energético.

4.- CONCLUSIONES

Los experimentos de biodigestión con residuos agro-industriales del arroz de la región central de Cuba, manifestaron un desempeño acorde con sus características químicas, siendo apropiados para producción de biogás como mono-sustratos la paja de arroz y el residuo de secadero a pesar de su elevada relación C/N; mientras la cáscara de arroz alcanzó producciones bajas de biogás, por lo que no parece adecuada para este uso.

El proceso de biodigestión anaerobia de la paja de arroz en el rango termofílico mejoró tanto el rendimiento de biogás como la cinética del proceso, con relación al mesofílico; la cinética de la biodegradación de estos materiales puede ser descrita eficazmente por el modelo de primer orden empleado, aunque se necesita ampliar el estudio a sistemas con alimentación semicontinua en el caso de la paja de arroz y el residuo de secado, para evaluar otros parámetros de operación y de diseño así como el desempeño de la tecnología bajo condiciones que simulen mejor la práctica industrial.

El aprovechamiento energético por la ruta de bio-conversión de los residuos arroceros equivale a $0,22 \text{ tCeqt}^{-1}$ de residuo para un índice de generación eléctrica de $0,73 \text{ MWh}^{-1}$ de residuo, a la vez es posible contribuir por este concepto a la mitigación de GEI en un 7,2% y 0,5% las emisiones del sector energético y las emisiones netas del país, respectivamente.

6.- AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado en el marco del Convenio de Colaboración Internacional y Cooperación entre el Instituto Agrario de Bornim-Potsdam (ATB) en Alemania y la Universidad “José Martí Pérez” de Sancti Spíritus, Cuba, en el área de bioenergía principalmente biogás y uso energético de biomásas. Adicionalmente, los autores desean agradecerles a Hannelore Schelle y Giovanna Rehde por el apoyo técnico brindado.

El trabajo experimental fue realizado en el Instituto Agrario de Bornim-Potsdam en Alemania, por uno de los autores del artículo, en el marco del convenio de colaboración entre las instituciones mencionadas.

7.- BIBLIOGRAFÍA

- Amon Thomas, Amon Barbara, Kryvoruchko Vitaliy, et al. “Biogas production from maize and dairy cattle manure-Influence of biomass composition on the methane yield”. Agriculture, Ecosystems and Environment. 2007. Vol.118 p.173-182
- Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, et al. “Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays”. Water Sci. Technol. 2009. Vol.59-5 p.927-934
- APHA-AWWA-WEF (American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation), “Standard methods for the examination of water and wastewater”. 20th Edn., Washington DC, USA. 1998.
- Brigwater, A V. “The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation”. Fuel. 1995 Vol. 74 No 5, p. 631-653
- Chandler J A, Jewell W J, Grossett J M, et al. “Predicting methane fermentation biodegradability”. In: Biotechnology and Bioengineering Symposium No. 10. 1980 p. 93-107
- Chandra R, Takeuchi H, Hasegawa T. “Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production”. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012 Vol.16 p.1462-1476
- De Sousa-Santos ML. “Application of comprehensive simulation to pressurize fluidized bed hydrorectorting of shale”. Fuel. 1994 Vol. 199 No.8 p.1459-1465
- García-Ribero Armando. “Mejoramiento de la eficiencia energética y económica en el CAI Arroceros Sur del Jibaro mediante estudio de potenciales de ahorro por aprovechamiento energético de residuos. Tesis en Opción al grado de Máster. Maestría de Eficiencia Energética. Centro Universitario “José Martí Pérez”. Sancti Spíritus, Julio, 2010.
- Gadde Butchaiah, Menke Christoph, Wassmann Reiner. “Rice straw as a renewable energy source in India, Thailand, and Philippines: Overall potential and limitations for energy contribution and greenhouse gas mitigation”. Biomass and Bioenergy. 2009 Vol. 33 p. 1532-1546
- Gunaseelan Nallathambi V. “Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks”. Biomass and Bioenergy. 2004 Vol. 26 p. 389-399
- He Yanfeng, Yunzhi Pang. “Physicochemical Characterization of Rice Straw Pretreated with Sodium Hydroxide in the Solid State for Enhancing Biogas Production”. Energy & Fuels. 2008. Vol. 22 p. 2775-2781
- Jash Tushar Ghosh D N. “Studies on the solubilization kinetics of solid Organic residues during anaerobic biomethanation”. Energy. 1996. Vol. 21-7 p. 125-730.
- Kalra M S, Panwar J S. “Anaerobic Digestion of Rice Crop Residues”. Agricultural Wastes. 1986. Vol. 17 p. 263-269
- Lei Zhongfang, Chen Jiayi, Zhang Zhenya, et al. “Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: Effect of phosphate supplementation”. Bioresour. Technol. 2010. Vol.101 p. 4343-4348
- Lequerica J L, Vallés S, Flors A. “Kinetics of rice straw methane fermentation”. Applied Microbiol Biotechnology 1984 Vol.10 p. 70-74
- Linke Bern, Schelle, Hannelore. “Solid State Anaerobic Digestion of Organic Wastes”. AgEng Warwick. EurAgEng. Paper Number 00-AP-025. 2000 p. 1-10
- Lopes W S, Leite V D, Prasad S. “Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste”. Bioresource Technology. 2004 Vol. 94 p. 261-266

- Lübken Manfred, Tito Gehring, Marc Wichern. "Microbiological fermentation of lignocellulosic biomass: current state and prospects of mathematical modelling". *Appl Microbiol Biotechnol*. 2010 Vol.85 p.1643-1652
- McKendry P. "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass". *Bioresource Technology*. 2002 Vol.83 p.37-46
- Ministerio de la Industria Básica. "Documento base para cálculos energéticos en Cuba". Año 2012.
- Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gómez, E. "Kinetics of anaerobic treatment: a critical review". *Critical reviews in environmental control*. 1991. Vol. 21-5-6 p.411-490.
- Pérez Martín D, López López I, Somoza Cabrera José, et al. "Evaluación de opciones de mitigación en el sector energético cubano". CUBAENERGIA. ISBN:978-959-7136-88-0
- Petersson Anneli, Thomsen Mette H, Hauggaard-Nielsen Henrik, et al. "Potential bioethanol and biogas production using lignocellulosic biomass from winter rye, oilseed rape and faba bean". *Biomass and Bioenergy*. 2007 Vol.31 p.812-819
- Rao M S, Singh S P. "Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetics studies and gas yield-organic loading relationships for process optimization". *Bioresource Technology* 2004 Vol.95 p.173-185
- Somayaji D, Khanna S. "Biomethanation of rice and wheat straw". *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. 1994. Vol. 10 p. 521-523
- Valverde G. A., Sarria L. B., Monteagudo Y. J. "Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz". 2007. *Scientia et Technica* Año XIII, No 37, Diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
- Vavilin V A, Lokshina L, Jokela J P, et al. "Modelling solid waste decomposition". *Bioresource Technology*. 2004. Vol.94 p.69-81
- VDI-Gesellschaft Energietechnik: Vergärung organischer Stoffe. VDI-Richtlinie 4630, VDI-Handbuch 2006 Energietechnik, Germany
- VDLUFA (1997): Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Methodenbuch - Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA-Verlag, Speyer.
- Weiland Peter. "Biogas production: current state and perspectives. MINI-REVIEW". *Appl Microbiol Biotechnol*. 2010. Vol. 85 p.849-860
- Zhang Ruihong, Zhiqin Zhang. "Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system". *Bioresource Technology* 1999. Vol.68 p. 235-245
- Zhao Rui, Zhenya Zhang, Ruiqin Zhang, et al. "Methane production from rice straw pretreated by a mixture of acetic-propionic acid". *Bioresource Technology* 2010. Vol. 101 p. 990-994
- Yadvika, Santosh, T.R. Sreekrishnan, et al. "Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review". *Bioresource Technology* 2004. Vol.95 p.1-10
- Yin L.X et al. "Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk". *Biomass and Bioenergy* 2002. Vol. 23 p.181-187.
- Yu Jun, Jibin Zhang, Jin He, et al. "Combinations of mild physical or chemical pretreatment with biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of rice hull". *Bioresource Technology* 2009. Vol.100 p.903-908