



Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana

Use of organic waste for renewable energy production in a Colombian city

Luz Stella Cadavid-Rodríguez^{a*}, Ingrid Vanessa Bolaños-Valencia^a.

Recibido: Septiembre 08 de 2014
Recibido con revisión: Septiembre 20 de 2015
Aceptado: Diciembre 01 de 2015

^{a*}Universidad Nacional de Colombia,
Sede Palmira
Carrera 32 No. 12 – 00 Vía
Candelaria
(57-2) 2868888 Ext. 35709
lscadavidr@unal.edu.co
ivbolanosv@unal.edu.co

Energética 46, diciembre(2015), pp.23-28

ISSN 0120-9833 (impreso)
ISSN 2357 - 612X (en línea)
www.revistas.unal.edu.co/energetica
© Derechos Patrimoniales
Universidad Nacional de Colombia



RESUMEN

El potencial bioquímico de metano de residuos de frutas y verduras y de los residuos de poda de una ciudad colombiana intermedia (Palmira, Colombia), se estudiaron con el fin de analizar su potencial para producir energía renovable. En esta investigación todas las muestras fueron tomadas de forma representativa y en fresco. El potencial bioquímico de metano final de los residuos frutas y verduras fue de 0,710 m³CH₄/kg SVadicionado, el cual es 2 veces mayor al obtenido para los residuos de poda. Después de 60 días se observó una remoción de sólidos volátiles de 48% y 44% para los residuos de frutas y verduras y de residuos de poda, respectivamente. Además, para los residuos de poda se encontró una remoción importante de celulosa, baja para la hemicelulosa y muy pobre para la lignina. Si se sometieran a digestión anaerobia la totalidad de los residuos de frutas y verduras y de poda que se produce en la ciudad de Palmira al año, sería posible producir 5.489 MWh de energía térmica ó 3.295 MWh de energía eléctrica. Los resultados muestran que la digestión anaerobia podría ser una alternativa viable y sostenible para el manejo y disposición de los residuos de frutas y verduras y los de poda, en los municipios colombianos, con la posibilidad adicional de producir energía renovable para cocinar, iluminación o como combustible para vehículos.

PALABRAS CLAVE

Digestión anaerobia; potencial bioquímico de metano; residuos de frutas y verduras; residuos de poda; energía renovable.

ABSTRACT

The biochemical methane potential of fruits and vegetable waste and grass waste from a Colombian typical city (Palmira, Colombia), were studied in order to analyze their potential to produce renewable energy. In this research all the samples were taken fresh and in a representative way. It was found that the ultimate biochemical methane potential of fruits and vegetable waste is 0,710 m³CH₄/kg VSadded, two times higher than that obtained for grass waste. After 60 days it was observed a volatile solids removal of 48% and 44% for fruits and vegetable waste and grass waste, respectively. Additionally, an important removal of cellulose, low of hemicellulose and poor of lignin was found for grass waste. If anaerobic digestion is applied to all the amount of fruits and vegetable waste and grass waste that is produced in Palmira in a year, it would be possible to produce 5489 MWh of thermal energy or 3295 MWh of electricity. The results showed that anaerobic digestion might be a viable and sustainable alternative for the disposal of fruits and vegetable waste and grass waste in Colombian municipalities with the additional possibility of producing renewable energy for cooking, lighting or vehicle fuel.

KEYWORDS

Anaerobic digestion, biochemical methane potential, fruits and vegetable waste, grass waste, renewable energy.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque Colombia contribuye únicamente con el 0.37% de las emisiones mundiales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [IDEAM, 2010], es uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático debido a su posición geográfica. De hecho, el fenómeno de “La Niña” durante los años 2010-2011 causó uno de los peores desastres naturales en la historia reciente del país, dejando un total de 3.893.087 personas afectadas [Sánchez, 2011]. Actualmente y desde inicios del año 2014, el país está enfrentando el fenómeno de “El Niño”, que ya ha producido daños graves, como el desabastecimiento de agua y alimentos a más de 63.000 personas y la muerte de 47.000 reses, sólo en la Costa Caribe [WFP, 2014].

Se sabe que la alteración climática global, es causada en gran medida por el aumento mundial de la demanda y del consumo energético, así como del modo de producción actual. En el caso de Colombia, aunque su huella energética es 12 veces menor que la de Estados Unidos, 5 veces menor que la de la Unión Europea y 3 veces menor que la de China [Global Footprint Network, 2009], el país ha venido aumentando su consumo *per capita* de energía eléctrica en un 7,8%, entre los años 2009 a 2011 [Banco Mundial, 2013], como consecuencia de su desarrollo económico sostenido. Bajo un escenario inercial en donde las tendencias de crecimiento y las tecnologías utilizadas por los sectores mantienen el comportamiento de los últimos diez años, en el 2030 las emisiones de GEI se habrán incrementado en más del 60% y en el 2040 se estarían emitiendo más del doble de las emisiones actuales [MADS, 2014]. Así pues, el país está enfrentando el reto de sostener su desarrollo económico manteniendo controladas sus emisiones de GEI. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, ha venido impulsando iniciativas como: el programa de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), la estrategia colombiana de desarrollo bajo en carbono, así como la Ley 1715 de 2014, que promueve el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, y el fomento de la inversión, la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias. Adicionalmente, el país se comprometió a reducir el 20% de sus emisiones de GEI para el 2030 en el marco de la COP21 de París, 2015.

Por otra parte, dado que Colombia cuenta con fuertes sectores agrícolas y pecuarios, además de haber incrementado de forma importante la urbanización del territorio en las últimas 3 décadas, actualmente está generando más de 177 millones de toneladas al año de biomasa residual [Ministerio de Minas y Energía, 2011], que tienen asociado un importante potencial energético (Tabla 1). Esto se constituye en una oportunidad para el país en cuanto a la posibilidad de producir energía renovable a partir de su biomasa residual, pues como lo refiere [Appels et al., 2011] está claro que los recursos

renovables jugarán un papel crucial en la limitación de las emisiones de CO₂.

Sector/Actividad	Cantidad anual de residuos (Ton/año)	Potencial Energético (TJ/año)
Agrícola	71.943.813,00	331.645,71
Pecuario	105.418.066,00	117.747,70
Residuos sólidos orgánicos urbanos	120.210,00	91,72
Residuos sólidos urbanos de poda	44.811,00	318,13
Total	177.526.900,00	449.803,26

Tabla 1. Potencial energético de la biomasa residual en Colombia

Fuente: Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, Ministerio de Minas y Energía, 2011.

La digestión anaerobia es la tecnología más común para producir energía a partir de biomasa [Hidaka et al., 2013], por el hecho de ser capaz de recuperar energía a partir de residuos sólidos orgánicos realizando al mismo tiempo la estabilización de los mismos.

En general, la digestión anaerobia ha sido ampliamente aplicada a diversos residuos y se han reportado distintos trabajos sobre la evaluación del potencial de metano de diferentes tipos de residuos entre los que se encuentran los urbanos, residuos de frutas y hortalizas, cárnicos, residuos agrícolas, macrófitas, y biomasa marina [Owen, 1979; Nallathambi, 1997; Madsen et al., 2011; Nizami et al., 2012]. Sin embargo, debido a que la digestión anaerobia es muy incipiente en el país, a la fecha no se encontraron publicaciones que reporten potenciales de metano de residuos orgánicos en Colombia, así como su posible aporte energético.

Por lo anterior, el objetivo de ésta investigación fue estudiar el potencial de producción de energía renovable en forma de metano, de dos residuos orgánicos producidos en ciudades Colombianas: los residuos de frutas y verduras y los residuos de la poda de pasto de zonas verdes. Además aportar a la construcción de una base de datos nacional que permita comparar la extensión de la conversión de varios residuos orgánicos en metano.

2. METODOLOGÍA

Sustratos evaluados

Los residuos de frutas y verduras (FV) fueron colectados en una plaza de Mercado y un supermercado típicos de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca. Se tomaron muestras representativas durante una semana, sin incluir alimentos cocidos, el material se tomó fresco y se refrigeró a 4°C en el laboratorio. Una vez colectado todo el material, se redujo su tamaño en un procesador de alimentos con el fin de homogenizarlo y aumentar su área superficial.

En cuanto al residuo de poda, se definió un muestreo representativo por áreas en las zonas verdes del campus principal de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. La muestra compuesta del residuo de poda se sometió a secado en campo por un día y luego se trituró en un molino de fibra hasta obtener una longitud de fibra de 2 mm de largo. Además se investigó el manejo de la poda de las zonas verdes de la ciudad de Palmira con la alcaldía municipal.

Después de la reducción de tamaño, los sustratos se caracterizaron (Tabla 2) y refrigeraron a 4°C hasta su uso.

Determinación	Residuos de FV	Residuos de poda
C (%)	43,21	31,15
H (%)	7,38	5,35
O (%)	35,31	27,22
N (%)	2,32	1,91
S (%)	0,22	0,23
Cenizas (%)	11,56	34,14
Celulosa (%)	-	31
Hemicelulosa (%)	-	29
Lignina (%)	-	10
Sólidos Totales (%)	90,3	90,5
Sólidos Volátiles (%)	85,96	78,9

Tabla 2. Caracterización de los sustratos evaluados

Fuente: Elaboración propia.

El Inóculo

El inóculo empleado fue un lodo anaerobio proveniente de un reactor UASB ubicado en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Ginebra, Valle del Cauca. El inóculo tuvo un periodo de aclimatación de 30 días y un tiempo de desgasificación de 5 días.

Diseño experimental

El potencial bioquímico de metano se llevó a cabo siguiendo la metodología estándar propuesta por [Owen et al., 1979], incluyendo modificaciones en el medio mineral de acuerdo a [Kim et al., 2003] y las recomendaciones que proponen [Agelidaki et al., 2009].

Se utilizó el diseño experimental completamente al azar, utilizando como unidad experimental reactores anaerobios que consistieron en botellas de vidrio de 500 ml de capacidad, selladas con un tapón hermético y válvulas de control para el paso del gas (Figura 1). El volumen efectivo fue de 450 ml y el volumen del espacio para la producción del gas fue de 50 ml. Los reactores se incubaron a 37 °C y fueron agitados dos veces al día.

Se utilizó la concentración de sólidos volátiles (SV) con dos niveles: 2 y 4 g SV/l, para un total de dos tratamientos, durante un periodo de 60 días. A pesar de que éstas dos concentraciones son bajas y de que en la literatura generalmente se selecciona la concentración de 2 g SV/l, cuando se lleva a cabo el test de PBM, se seleccionaron éstas dos concentraciones para estudiar si había

algún efecto de la concentración del sustrato sobre el proceso de digestión.



Figura 1. Reactores anaerobios a escala de laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Cada concentración tuvo 3 réplicas y un control al cual no se adicionó sustrato. La variable de respuesta fue la producción de biogás, la cual se determinó diariamente mediante la técnica de desplazamiento de líquido. El porcentaje de metano presente en el biogás se determinó por medio de cromatografía de gases.

Métodos Analíticos

Con el fin hacer seguimiento y control del experimento se tomaron algunas muestras durante el tiempo del proceso de digestión. Las muestras fueron centrifugadas a 3000 rpm durante 20 minutos, posteriormente se recogió el sobrenadante para determinar Alcalinidad (con el método de titulación 2320B, APHA, 1992), Ácidos Grasos Volátiles (AGV) método de destilación 5560 C, [APHA, 1992], Amoníaco (método titulométrico 4500-NH3E) y DQO soluble, método colorimétrico 5220 D de reflujo cerrado, [APHA, 1992]. La determinación de pH se realizó por el método electrométrico 4500-H+ B. Todas las determinaciones ser realizaron por duplicado.

Los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) se estimaron siguiendo los procedimientos 2540G y el Nitrógeno Total Kjeldalh (NTK) por el método titulométrico 4500-NH3E [APHA, 1992].

Para el residuo de poda, los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, se determinaron mediante la prueba Van Soest, al inicio y al final del experimento

Análisis estadístico

El nivel de significancia estadística fue determinada mediante un análisis de varianza (ANOVA) usando el software SPSS (versión 20 IMB Corporation) con un valor de p- de 0,05.

3. RESULTADOS

Residuos de frutas y verduras

Durante los primeros 3 días del experimento se observó una producción de ácidos grasos volátiles (AGV) que coincidió con una ligera disminución del pH, esto es indicativo de un efectivo proceso de hidrólisis, luego de lo cual se presentó una estabilización de los AGV hacia el valor de 1000 mg AA/l y el pH se mantuvo alrededor de 7. El efecto buffer se debió a la producción del ión amonio que en promedio estuvo entre 178 y 257 mg NH₃-N/l, al inicio y al final respectivamente.

La producción de metano comenzó rápidamente y continuó aumentando hasta alrededor del día 50 (Figura 2). No se encontraron diferencias significativas del potencial de metano entre las dos concentraciones evaluadas. El valor máximo, que se registró el día 60, fue un valor de 0.710 m³CH₄/kg SV_{adicionado}, y se puede considerar como el máximo potencial de metano de éste residuo. Este valor es más alto que los valores reportados por [Davidsson et al., 2007] para la fracción orgánica de los residuos municipales (0,300 a 0,570 m³/kg SV_{adicionado}), y las que se encuentran por [Gunaseelan, 2004] para los residuos vegetales (0,19 a 0,4 m³/kg SV_{adicionado}); aunque están en el intervalo que este último autor observó para los residuos de frutas (0,18-0,732 m³/kg SV_{adicionado}). Por lo tanto, se puede inferir que la mezcla de residuos de frutas y verduras utilizado en éste estudio, estaba compuesto por una proporción importante de residuos de frutas, lo que condujo a un alto rendimiento de metano. Teniendo en cuenta que los residuos probados en este estudio son típicos del municipio de Palmira (Colombia), donde hay una variada oferta de frutas en los mercados durante todo el año, este resultado potencial de metano constituye una excelente oportunidad de convertir los residuos de frutas y verduras en energía renovable en esta ciudad.

Residuos de poda

Los parámetros de control, AGV, alcalinidad, amoníaco y pH, tuvieron un comportamiento similar al descrito para los residuos de FV, indicando que la composición del sustrato permite una amortiguación natural a la producción de AGV, durante la etapa de hidrólisis.

Al igual que para los residuos de FV, la producción de metano comenzó rápidamente, sin embargo se observó una pendiente más pronunciada entre los días 5 y 20 del experimento (Figura 3), luego de lo cual se estabilizó y después del día 40 el aumento fue poco significativo. A diferencia de los residuos de FV, se observó una diferencia entre los potenciales de metano finales para las dos concentraciones de poda evaluadas, esto se atribuye a que con una menor concentración de sustrato se favorece el área de contacto entre sustrato e inóculo,

favoreciéndose así el procesos de digestión para materiales fibrosos [Cadavid et al., 2014]. Al final se obtuvo un valor máximo del potencial de metano de 0,327 m³ de CH₄ por cada kg de SV alimentado. Este valor está en el rango reportado por otros trabajos realizados en Europa y Norte América [Yang et al., 2009; Nizami et al., 2009], los cuales reportan valores entre 0.310 y 0.360 m³/kg SV_{adicionado}, a partir de diferentes especies de pasto fresco y ensilado.

El potencial medio que se encontró se puede deber a la biodiversidad de especies gramíneas y demás hierbas [Nallathamb, 1997] que se encontraron en los residuos de poda del campus universitario, además del relativamente bajo contenido de lignina del pasto evaluado comparado con el contenido reportado para pastos de Europa del Norte [Nizami et al., 2009].

Adicionalmente, se pudo observar una remoción del 45% de celulosa, 12% de hemicelulosa y 4% de lignina para el residuo de poda, evidenciando la fortaleza del proceso de Digestión Anaerobia para degradar éste tipo de residuo.

Con una confianza del 95%, no se observaron diferencias significativas entre las concentraciones evaluadas con cada residuo, pero si se encontraron entre los dos residuos evaluados. El potencial de metano que se encontró para los residuos de FV fue de un poco de más del doble que para los residuos de poda, esto se puede explicar por la diferencia en su composición. Los residuos de FV presentan un mayor porcentaje de C, O, N, y materia orgánica en forma de carbohidratos y proteínas, los cuales son fácilmente biodegradables; mientras que los contenidos de estos elementos en el residuo de poda son menores y la materia orgánica se encuentra en forma de celulosa, hemicelulosa y lignina, que son materiales de más difícil biodegradación.

Potencia de producción energética

De acuerdo con los datos del Atlas de la biomasa residual de Colombia 2011, se puede asumir una producción de 2400 toneladas/año de residuos de FV en la ciudad de Palmira. Asumiendo una conversión del 80% en el proceso biológico, si todo este material fuera aprovechado, a través de la digestión anaerobia, se podrían generar 1.058.141 m³ de metano al año. Teniendo en cuenta que la eficiencia de conversión a energía térmica y eléctrica es de alrededor del 50% y 30%, respectivamente, esto significa que al año se podrían obtener hasta 5.258 MWh de energía térmica efectiva ó 3.155 MWh de energía eléctrica.

Para el caso de los residuos de poda, la ciudad de Palmira reporta una producción de alrededor de 217 toneladas/año. Con estos residuos se podrían generar 230 MW-h de energía térmica ó 140 MW-h de energía eléctrica.

Si se aprovechara todo el biogás para producir energía eléctrica el municipio podría aprovecharla para iluminación pública, como combustible vehicular ó como combustible para cocinar en las zonas rurales. La tabla 3 muestra el beneficio energético y económico que podría obtenerse para la ciudad de Palmira.

4. CONCLUSIONES

Se estudió el potencial para producir energía renovable en forma de metano a partir de residuos de frutas y verduras y de poda de zonas verdes, para el municipio de Palmira (Colombia). Se observó que diferencias en la composición química de los residuos orgánicos producen diferencias importantes en el potencial de metano de los mismos.

Dado que el rendimiento de metano de ambos residuos evaluados está por encima de $0.3 \text{ m}^3/\text{kg SV}_{\text{adicionado}}$, pueden considerarse como buenos sustratos para la producción comercial de metano.

El presente estudio muestra que la digestión anaerobia, le ofrece la oportunidad al municipio de Palmira de, manejar de una forma

ambientalmente segura sus residuos orgánicos y además, obtener beneficios económicos a través de la producción de energía renovable. Modelo que podría ser replicado en otros municipios del país.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Nacional de Colombia, en especial a la Vicerrectoría de Investigaciones por proporcionar el apoyo financiero. También se agradece al personal de los laboratorios de Nutrición Animal, y Análisis Ambiental por su amable colaboración en el trabajo experimental.

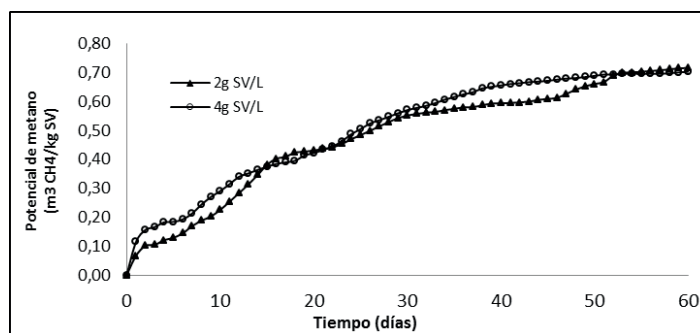


Figura 2. Potencial de metano para residuos de frutas y verduras.
Fuente: Elaboración propia.

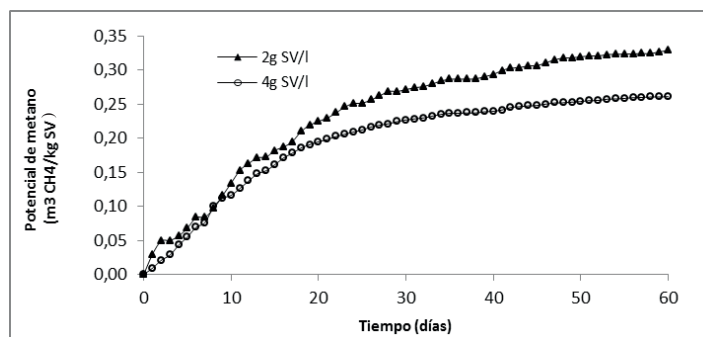


Figura 3. Potencial de metano para residuos de poda.
Fuente: Elaboración propia.

Material	Potencial de metano ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}_{\text{adicionado}}$)	Cantidad generada (Ton/año)	^a Energía térmica (MWh)	^b Energía eléctrica (MWh)	^c Valor económico (millones de pesos)
Residuos de frutas y verduras	0,710	2.400	5.259	3.155	1.050
Residuos de poda de pasto de zonas verdes	0,385	217	230	140	46
Total		2617	5489	3295	1096

^a Asumiendo que todo el metano producido se usa para producir energía térmica

^b Asumiendo que todo el metano producido se usa para producir energía eléctrica

^c Sólo de la energía eléctrica posible de producir, con los precios del KWh para Palmira.

Tabla 3. Beneficio energético para la ciudad de Palmira

Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconu, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., y Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59.5, 927 – 934.
- APHA (1992) Standard Methods for the examination of water and wastewater. Washington, D. C, American Public Health Association, Water Pollution Control Federation.
- Appels, L., Lauwera, J., Degreva, J., Helsenb, L., Willemsc, K., y Dewila, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295 – 4301.
- Banco Mundial. (2013). *Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita)*. Recuperado de <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC>.
- Cadavid-Rodríguez, L.S., Horan, N.J. (2014). Production of volatile fatty acids from wastewater screenings using a leach-bed reactor. *Water Research*. Vol 60, 242-249.
- Davidsson, A., Gruvberger, C., Christensen, T. H., Hansen, T. L. y Jansen, J. L. C. (2007). Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 27, 406-414.
- Global Footprint Network. (2009). *Ecological Footprint Atlas 2009*. Recuperado de http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/Ecological_Footprint_Atlas_2009.pdf
- Gunaseelan, V. N. (2004) Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, 26, 389-399.
- Hidaka, T., Arai, S., Okamoto, S., y Uchida, T. (2013). Anaerobic co-digestion of sewage sludge with shredded grass from public green spaces. *Bioresource Technology*. 130, 667-672.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT. (2010). Segunda comunicación nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. IDEAM, MAVDT y PNUD. Bogotá.
- Kim, H.-W., Han, S.-K., y Shin, H.-S., (2003) The optimisation of food waste addition as a co-substrate in anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Management and Research*, 21(6), 515-526.
- Madsen, M., Holm-Nielsen, J., y Esbensen, K. (2011). Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3141-3155.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS. (2014). Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono. http://www.minambiente.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=469%3Aplanta-cambio-climatico-25&catid=33%3Acambio-climatico-articulos&Itemid=436
- Ministerio de Minas y Energía. (2011). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Bogotá DC.
- Nallathambi, V. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and Bioenergy*, 13, 83-114.
- Nizami, A., Korres, N. y Murphy J. (2009). Review of the integrated process for the production of grass biomethane. *Environment Science Technol*, 43, 8496-8508.
- Nizami, A., Orozco, A., Novio, E., Dieterich, B., y Murphy J. (2012). How much gas can we get from grass? *Applied Energy*, 92, 783-790.
- Owen, W. F., Stuckey, D. C. y Healy Jr, J. B. (1979) Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, 13, 485-492.
- Sanchez, 2011. Después de la inundación. *Coyuntura Económica: Investigación Económica y social*, 41, 213 – 246.
- World Food Programme WFP. (2014). *Colombia: la sequía afecta a miles de personas en La Guajira*. Recuperado de <http://es.wfp.org/colombia-sequia-afecta-miles-personas-la-guajira>
- Yang, S., Li, J., Zheng, Z., y Meng, Z., (2009). Characterization of *Spartina alterniflora* as feedstock for anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 597-602.