

Elaboración de una metodología para el estudio experimental de la digestión anaerobia de agroresiduos en particular residuos cañeros.

Lic. Mabelin Benítez Fonseca**, Dr. José Antonio Suárez Rodríguez**,
MSc. Maikel Fernández Boizán*,
mbenitez@cies.ciges.inf.cu

Centro de Investigaciones de Energía Solar**, Centro de Estudio de Biotecnología Industrial*.

En este trabajo se realiza una exposición sobre las características y el uso de la biomasa desde el punto de vista energético y medioambiental, en particular sobre la hoja de la caña. Se recoge además los aspectos teóricos de la digestión anaerobia y las perspectivas de este proceso para la producción de biogás en Cuba.

Basado en la experiencia alcanzada en la degradación anaerobia de la hoja de la caña de azúcar desarrollada en el Centro de Investigaciones de Energía Solar y otros resultados reportados en la literatura, se propone en este trabajo una metodología que permita conducir los estudios experimentales en condiciones de laboratorio de la biodegradabilidad de agroresiduos de interés energético para el país.

Palabras claves: *agroresiduos, digestión anaerobia, caña de azúcar.*

The main characteristics and uses of biomass from of the energetic and environmental point of view are show in this work, with particular emphasis in the sugar cane straw.

The theoretical aspects of anaerobic digestion and their prospects of this process in Cuba are review, too.

Based in the experience raised in the field of the anaerobic digestion of sugar cane straw in the Research Center of Solar Energy and others result reported in the literature, a methodology in order to made experimental studies about the biodegradability of agricultural waste was proposed.

Key words: *agricultural waste, anaerobic digestion, sugar cane straw.*

INTRODUCCIÓN

La generación de energía a partir de biomasa es una de las vías con mayor potencialidades en fuentes renovables para nuestro país, con un potencial estimado en el orden de las 176 000 toneladas de combustible

equivalente anuales, 78 millones de metros cúbicos de vertimientos biodegradables, se concentran en las fábricas de azúcar, destilerías de alcohol y despulpadoras de café. (*Indicadores Socioeconómicos, 2003*).

La hoja de la caña, con un poder calórico de 17 MJ/Kg., es energéticamente similar al bagazo y representa alrededor del 3% del peso de la caña cortada. Solo algunas cantidades están siendo combustionadas en calderas de vapor y el resto se quema en el alrededores de los centros de limpieza de la caña, sin ninguna utilidad energética y creando significativos problemas medio ambientales (Suárez y Beatón, 2007).

Además de los residuos sólidos de la caña de azúcar existen otros residuos de la agricultura que tampoco son explotados energéticamente y que también son degradados al medio ambiente, provocando mal olores, la acumulación de insectos indeseados en lugares de tránsito de personas, etc. Para eliminar esta acumulación de biomasa es necesario desarrollarnos aún más en tecnologías que hoy el mundo emplea para beneficio propio y de la atmósfera terrestre. Por ejemplo la degradación anaerobia, indistintamente de la tecnología que se empleé, es una forma para garantizar que la energía que se produce espontáneamente de la degradación de la biomasa sea utilizada para generar energía en forma de biogás.

En el Centro de Investigación de energía Solar se realiza un estudio sobre la degradación anaerobia de la hoja de la caña de azúcar, el cual se encuentra ahora en fase de ensayos de laboratorio.

Como la mayoría de estos residuos, provenientes de la agricultura y de los desechos urbanos, tienen gran contenido de materia lignocelulósica por lo que su degradación es un tanto prolongada y

difícil; es necesario realizar ensayos previos que nos permita conocer el tiempo del proceso y la cantidad de energía que se puede obtener de la degradación anaerobia de un agroresiduo que se estudie.

Objetivo general

Elaborar una metodología que permita desarrollar el estudio de la degradación anaerobia de agroresiduos.

Objetivos específicos

1. Mostrar los avances y perspectivas del uso de los agroresiduos para la producción de biogás, con particular énfasis en la hoja de la caña de azúcar.

2. Proponer una metodología para el estudio de la biodegradabilidad de agroresiduos en condiciones anaerobias.

1. DESARROLLO

1.1 Aspectos generales del uso de la biomasa.

Un aspecto relevante de la conversión de la energía solar que realizan las plantas radica en la enorme variedad de productos que resultan del proceso, los que constituyen en conjunto el material denominado biomasa vegetal, propio de los diferentes organismos que integran la flora terrestre: desde las bacterias fotosintéticas y las algas microscópicas hasta los árboles gigantes.

La biomasa vegetal ha sido utilizada en gran escala con fines energéticos, sin embargo hay factores que dificultan y limitan el

Tabla 1. Composición química del bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC)

| Elementos químicos | Bagazo (%) | RAC (%) |
|--------------------|------------|---------|
| Carbono | 47,0 | 48,28 |

En la tabla 2 se puede observar el contenido de materia orgánica que tiene la hoja de la caña de azúcar, representado en la celulosa (45 %), la lignina (14 %) y las pentosanas (26 %), material que es posible degradar en un proceso de digestión anaerobia. (Padilla, J. 2006)

Tabla 2. Composición química de la hoja de la caña

aprovechamiento de una parte considerable de la misma. En Cuba se lleva a cabo un programa de desarrollo para la explotación eficiente de fuentes de energía renovable. Gran interés se le ha dedicado especialmente a la biomasa debido a la gran cantidad producida cada año, tales como, la hoja y el bagazo de la caña, la cáscara de arroz, la de café y la leña. La combustión es la forma más común de emplear estas fuentes de energía en nuestro país. Frecuentemente esta se practica en instalaciones ineficientes, causando una gran contaminación medioambiental. (Suárez y Beatón, 2000)

1.2 La caña de azúcar como acumuladora principal de biomasa.

La agroindustria cubana de la caña de azúcar es la fuente más importante de biomasa con que cuenta el país para el desarrollo de energía renovable, y actualmente constituye la única a partir de la cual se está generando electricidad. (Suárez, R. y Morín, 2005)

Hoy en Cuba existe alrededor de 50 ingenios azucareros en operación. Teniendo aproximadamente una cosecha total de caña de 11 millones de toneladas por año. La hoja de la caña, con un poder calórico de 17 MJ/Kg., es energéticamente similar al bagazo y representa alrededor del 3% del peso de la caña cortada, tiene una forma alargada, baja densidad aparente, alto contenido de cenizas de 9,3 %. (Suárez y Beatón, 2007)

Las características del bagazo y los residuos agrícolas cañeros como combustibles son las que se muestran en la tabla 1.

| | | |
|-----------|-------|-------|
| Hidrógeno | 6,50 | 5,55 |
| Oxígeno | 44,0 | 45,61 |
| Cenizas | 2,50 | 9,50 |
| Azufre | 0,02 | 0,13 |
| Nitrógeno | 0,001 | 0,43 |

| Componente | Paja integral | Paja preparada |
|--------------------|---------------|----------------|
| Celulosa | 45,13 % | 44,84 % |
| Lignina | 14,11 % | 12,73 % |
| Pentosanas | 25,56 % | 29,63 % |
| Cenizas | 8,03 % | 7,61 % |
| Pectina | 4,28 % | 4,24 % |
| Solubilidad en: | | |
| H2O fría | 9,78 % | 10,28 % |
| H2O caliente | 13,35 % | 13,49 % |
| Alcohol - benceno | 3,54 % | 3,85 % |
| Hidróxido de sodio | 49,29 % | 49,09 % |

| | | |
|---------|--------|--------|
| Humedad | 9.67 % | 9,64 % |
|---------|--------|--------|

1.3 Proceso de Digestión Anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso biológico por el cual, a través de una compleja serie de reacciones bioquímicas, la materia orgánica se descompone por la actividad metabólica de los microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo un gas con alto contenido energético (biogás) y un lodo residual que presenta en muchos casos, un alto poder fertilizante. (Paez y Baz, 1999)

La digestión anaerobia se desarrolla en tres etapas: la primera etapa, denominada etapa de hidrólisis y fermentación o acidogénesis, los organismos hidrolíticos se encargan de hidrolizar los compuestos orgánicos complejos a compuestos más simple que luego son convertidos por las bacterias fermentativas o acidogénicas en ácidos grasos de cadenas cortas, en la segunda etapa los productos de la fermentación son degradados a ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, por un grupo de bacterias denominadas bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrogeno (OHPA). En la última etapa las bacterias anaerobias metanogénicas producen metano a partir del ácido acético (bacterias acetoclásticas) y a partir de hidrógeno y el dióxido de carbono (bacterias hidrogenofílicas).

En este proceso de digestión anaerobia influyen varios factores como:

1. La temperatura

- El rango óptimo es el mesofílico (30-45 °C),

2. El efecto del pH.

- El pH óptimo para mantener el equilibrio ecológico se sitúa entre 6.8 y 7.2. (Rozzi, 1984)

3. Nutrientes.

Se requieren ciertos nutrientes como el nitrógeno, fósforo, azufre y elementos trazas como el níquel, cobre, hierro y molibdeno. La relación C/N influye sobre la producción de biogás; esta será óptima cuando oscile entre 20:1 y 30:1.

4. Sustancias tóxicas.

Compuestos cuya toxicidad esta relacionada con el pH como el amoníaco, el ácido sulfúrico y los ácidos grasos volátiles, AGV. Compuestos de toxicidad inmediata: los clorados del metano, hidrocarburos aromáticos, el oxígeno, etc. Compuestos que

con un pequeño aumento de la concentración pueden volverse tóxicos: iones metálicos, en particular los metales pesados.

1.4 Perspectivas de la producción de biogás en Cuba.

La tecnología del biogás fue introducida en Cuba a principios del 1940 en una fábrica de cerveza del Cotorro, en la Habana; y un programa para introducción de esta tecnología fue iniciado por el Movimiento Nacional del Biogás en 1990. En el siglo XXI, tiene unas 500 instalaciones de biogás, principalmente los diseños chinos e hindúes. (Suárez J. y Beatón, 2007)

La mayor planta de biogás en Cuba está localizada en la destilería "Heriberto Duquesne", en la ciudad de Remedios, en la provincia de Villa Clara. (Gonzales O., 2007)

En la Ciudad de la Habana hay un total de 13 plantas de biogás en funcionamiento las cuales tienen gran impacto social y ambiental. Se construyó también el primer relleno sanitario, pues los desechos sólidos urbanos incluyen también una vía de contaminación en el mundo.

En el territorio Tunero con un total de 49 digestores de biogás de ellos 23 estaban en funcionamiento, se piensa echar a funcionar los que están parados y la construcción de varios digestores más. (Díaz M. y col., X Taller Nacional, 2006)

En la provincia de Matanzas hay un total de 181 plantas de biogás de ellas 19 plantas pertenecen al sector estatal y 162 plantas al sector privados. (ARINSEMA, 2004)

En la provincia de Sancti Spíritus actualmente se cuenta con un total de 6 plantas en el sector privado y estatal con diferentes diseños. (Savran V., X Taller Nacional, 2006)

En la provincia de Santiago de Cuba en el 2006 existían un total de 13 digestores, la mayoría particulares, en la actualidad se trabaja en la construcción de otros como la edificación de un biodigestor chino en el Brujo con estiércol porcino. Además se está llevando a cavo un proyecto de construcción de un relleno sanitario en el reparto distrito José Martí.

En muchas provincias de Cuba se explota grandemente la energía del biogás, sin embargo aún existen lugares que se tiene poca cultura en este tema y en otros usos de la biomasa como fuente de energía renovable, es por esto que se han creado 14 grupos de trabajo del sector energético dentro de los cuales están inmersos varios de ellos, los que tienen la misión del desarrollo y generalización de estas tecnologías para la obtención de energía renovable.

Es de interés conocer que existe una cantidad enorme de esta biomasa sobre la cuál se están estudiando diferentes formas de uso como energía. Por ejemplo la industria de madera aserrada produce aproximadamente 70 000 m³ de residuos cada año, en la industria cafetalera se producen cada año 5 600 t de cascarilla solamente, anualmente también se producen 3000 t de cascarilla de arroz, etc. En general estos residuos son combustionados para la generación de energía directamente.

En el mundo se están desarrollando tecnologías para la producción del biogás a partir de estos tipos de residuos lignocelulósicos, incluso en algunas partes se siembra el pasto para luego llevarlo a la generación de energía produciendo biogás. En nuestro país se están haciendo estudios para el aprovechamiento de estos residuos en la generación de biogás. Para facilitar estos estudios es necesario seguir una metodología apropiada para tener una producción eficiente cuando se lleve a cabo un proyecto en el que se tenga como objetivo la producción de energía en forma de biogás partiendo de residuos lignocelulósico.

2. METODOLOGÍA PARA LA DEGRADACIÓN ANAEROBIA DE AGRORESIDUOS.

Los materiales de origen lignocelulósico, puede utilizarse como sustrato para la producción de biogás su descomposición se prolonga más que la de otros materiales, debido al componente lignocelulósico que presentan en la estructura de sus tejidos.

2.1 Cálculo del rendimiento teórico de biogás.

La relación entre los compuestos orgánicos de los agroresiduos y su productividad es un factor importante para determinar el rendimiento de biogás del proceso, en la tabla 3 podemos encontrar estos

rendimientos calculados por 1 g de material seco. (Thi Thanh Hai, 2005)

Tabla 3. Rendimientos de CH₄ y CO₂ de 1g de material seco.

| Compuesto | CH ₄ (mL/g ST) | CO ₂ (mL/g ST) |
|---------------|---------------------------|---------------------------|
| carbohidratos | 0,37 | 0,37 |
| proteínas | 0,49 | 0,49 |
| lípidos | 1,04 | 0,36 |

Aunque los materiales de descomposición son generalmente abundantes en materia orgánica, sus principales componentes son carbohidratos, proteínas y lípidos. Por esta razón, la ecuación aplicada para el cálculo del rendimiento teórico está basada en estos compuestos. (Thi Thanh Hai, 2005)

$$E = 0,37 \cdot A + 0,49 \cdot B + 1,04 \cdot C \quad \text{y}$$

$$D = 0,37 \cdot A + 0,49 \cdot B + 0,36 \cdot C$$

Leyenda:

E → Rendimiento teórico de metano, D → Rendimiento teórico de dióxido de carbono, A → Cantidad de carbohidratos, B → Cantidad de proteína. C → Cantidad de lípido que contiene 1g del material de descomposición.

Para evaluar la viabilidad de la aplicación de sistemas de tratamiento anaerobios de un residuo sólido es preciso conocer detalladamente sus características fisicoquímicas (sólidos totales, componentes orgánicos, celulosa, lignina, cenizas, etc. Además es necesario tener en cuenta los factores biológicos dentro de un digestor y las condiciones degradativas del sustrato por lo que es necesario realizar algunos ensayos biológicos importantes, los cuales son:

1. Ensayo de actividad metanogénica del inóculo.
2. Ensayo de toxicidad de los componentes del sustrato.
3. Ensayo de biodegradabilidad anaerobia del sustrato.

2.2 Ensayo de actividad metanogénica

El ensayo de actividad metanogénica se realiza en experimentos batch, en los cuales se usa como sustrato una determinada fuente de carbono (glucosa, ácidos grasos volátiles (AGV), entre otros) para la producción de metano.

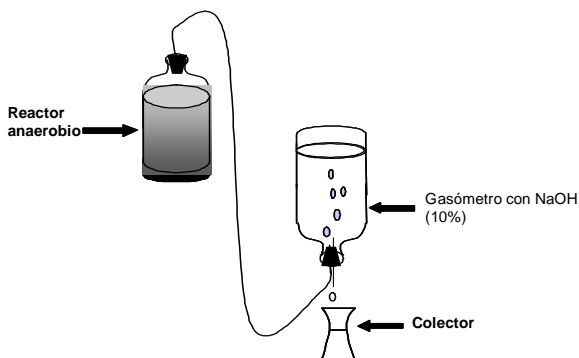
Antes de realizar el ensayo es necesario determinar los sólidos volátiles (SV) que contiene el inóculo para poder estimar la cantidad de microorganismos presentes en el mismo. Durante el ensayo se mide la producción de metano acumulada, por el método de desplazamiento de líquido de una solución alcalina (figura 2). El experimento no debe durar más de 3 días ya que este es precisamente el tiempo de duplicación de las bacterias metanogénicas. La solución alcalina (NaOH al 5 %) absorbe el CO₂ producido midiéndose solamente el metano. Como bioreactor se pueden emplear botellas serológicas o cualquier otro recipiente de vidrio con tapón de goma que cierre hermético al cual se le añade una cantidad de inóculo que alcance una concentración de sólidos volátiles de 1 a 5 g SV/L en el reactor y se completa con la solución del sustrato a una concentración entre 2 y 4,5 g DQO/L, en dependencia si el medio es agitado o no.

2.2.1 Condiciones experimentales

Para realizar el ensayo de actividad metanogénica con precisión es necesario asegurar las condiciones óptimas y constantes.

- La temperatura debe de ser constante y preferiblemente en el rango mesofílico (35-40°C) durante el ensayo.
- Mantener el pH cercano a 7.
- El medio también necesita algunos nutrientes para el desarrollo de los microorganismos, su composición la encontramos en Méndez (1997), este medio se puede reemplazar con solo utilizar agua común y no agua destilada.
- Para asegurar condiciones anaerobias del medio se adicionan 2,5 ml de una solución de 10 g/L de Na₂S*39H₂O. (Méndez, 1997)

Figura № 2 Sistema de cuantificación de metano.



2.2.2 Cálculo de la actividad metanogénica.

Cuando se tienen todas las mediciones se grafican los valores de producción acumulada de metano contra tiempo, permitiendo calcular la pendiente (m) de esta curva: (Méndez, 1997)

$$m = \Delta \text{prod. acum. CH}_4 \text{ (ml)} / \Delta t \text{ (d)}$$

donde:

$\Delta \text{prod. acum. CH}_4$ es la variación de la producción acumulada de metano.

$\Delta t \text{ (d)}$ es la variación del tiempo en día.

Con este valor de la pendiente y los gramos de sólidos volátiles g(SV) del inóculo utilizados se puede calcular la actividad metanogénica (AME) por la fórmula siguiente: (Méndez, 1997)

$$\text{AME} = m / 0,34 \times \text{g(SV)} \quad \text{se expresa g DQO}_{\text{CH}_4} / \text{g SV} \times \text{d}$$

donde:

- Los g(SV) se obtienen a partir de la concentración de los sólidos volátiles y el volumen del inóculo que se añade.

- El factor 0,34 indica que por cada gramo de DQO (demanda química de oxígeno) que se degrada se obtiene esta cantidad de metano se expresa en mL de CH₄/g DQO.

2.3 Ensayo de toxicidad.

El objetivo de este ensayo es la determinación del porcentaje de actividad metanogénica que pierde el inóculo en presencia de un compuesto inhibitorio.

La metodología de este ensayo es prácticamente la misma empleada en la determinación de la actividad metanogénica. (Méndez, 1997)

2.4 Ensayo de biodegradabilidad anaerobia.

La biodegradabilidad anaerobia se define como la fracción máxima de materia orgánica susceptible de ser eliminada por digestión anaerobia en determinadas condiciones de

operación. Este ensayo permite determinar que fracción de sólidos totales se degradada anaeróbicamente.

Para este ensayo es necesario conocer el % de sólidos volátiles dentro del digestor al inicio y al final del proceso de digestión anaerobia. En este ensayo al igual que en el de AME se mide la producción acumulada de metano para poder determinar el rendimiento.

Cuando se tiene un inóculo donde la degradación de sus sólidos volátiles es mucho mayor que la del sustrato, es necesario montar otro biodigestor como blanco o control que contenga solamente los mismos gramos de SV de la solución del inóculo empleados en los demás biodigestores. Con el propósito de ver que cantidad de materia orgánica puede ser degradada y tenerlo en cuenta a la hora de realizar los cálculos del ensayo y conocer la cantidad de materia orgánica del sustrato que se degrada.

2.4.1 Condiciones experimentales.

Para realizar este ensayo se requiere de determinadas condiciones experimentales.

- La mezcla debe estar homogeneizada para que los microorganismos accedan al sustrato con facilidad.
- En el bioreactor se introduce una mezcla del sustrato y el inóculo de una concentración de sólidos volátiles de 1 a 5 %, en dependencia del tipo de sustrato, su contenido lignocelulósico y la AME del inóculo.
- La concentración de sólidos volátiles en el sustrato no debe superar un 5% para que no se produzca acumulación de AGV y el pH disminuya.
- Mantener el pH del medio constante y cercano a 7 (si es necesario añadirles soluciones de HCl ó NaOH, según corresponda).
- Después de taponar los biodigestores estos deben ser burbujeados con una mezcla de gas N₂/CO₂ 70 %: 30% durante 2 minutos y se elimina la sobre presión para que la misma inicialmente sea 1 at. (Méndez, 1997)

2.4.2 Cálculos a realizar en el ensayo de biodegradabilidad.

Una vez determinado el % de sólidos volátiles al inicio y al final del proceso dentro

del digestor, se puede calcular el % de remoción a partir de la fórmula siguiente:

$$\text{- \% remoción} = (\%SV_{inc.} - \%SV_{fin.}) / \%SV_{inc.}$$

Donde:

% SV_{inc} es el % de sólidos volátiles al inicio del proceso

% SV_{fin} es el % de sólidos volátiles al final del proceso

$$\text{- Rendimiento de metano} = V (CH_4) / g \text{ SV}$$

Donde:

V (CH₄) es el volumen de metano producido por g de sólidos volátiles degradados (g SV).

También se puede determinar:

- % de conversión del contenido de fibra por el método de fibras en detergente neutro, expresado en ingles como neutral detergent fiber (NDF). (Han-Quing y Zhen-Hu, 2004)

- Actividad enzimática de las bacterias hidrolíticas, determinando en el medio la formación de ácidos grasos volátiles (AGV) mediante un cromatógrafo de gases y determinando la reducción del contenido de carbono total ó azúcares.

- Caracterización del biogás mediante un cromatógrafo de gases para conocer el contenido de metano.

Cuando se tengan todos los resultados de los ensayos realizados al agroresiduo en estudio, se podrá entonces llevar la degradación del mismo a un proceso de escala industrial estableciendo todas condiciones estudiadas previamente.

CONCLUSIONES

1. Se puede constatar que el contenido de materia orgánica que tiene la hoja de la caña de azúcar, representado en la celulosa con un 45 %, la lignina con 14 % y las pentosanas con alrededor de un 26 %, favorece en cierta medida su degradación en un proceso de digestión anaerobia.

2. En la actualidad los agroresiduos constituyen aproximadamente el 96 % del potencial de energía renovable del país y su aprovechamiento es muy limitado debido a la poca disponibilidad de tecnologías, conocimiento de sus propiedades fisicoquímicas y recursos para su construcción, reparación y mantenimiento.

3. Con el estudio de las propiedades fisicoquímicas del agroresiduo, que se desee degradar, podemos tener un rendimiento teórico de la producción de metano y dióxido

de carbono del proceso en condiciones anaeróbicas.

4. Con la metodología propuesta es posible realizar estudios experimentales, sobre biodegradabilidad de agroresiduos a escala de laboratorio, obteniéndose parámetros como el rendimiento de metano, el por ciento de remoción de sólidos volátiles, el por ciento de conversión de fibras, y otras; que permiten crear una línea de opinión sobre la degradación de la materia orgánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., Hamdi, M. (2005) "Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes". *Process Biochemistry* 40, pp. 989-995.
- Censo Digestores construidos en Matanzas. ARINSEMA, III Simposio Internacional de Arquitectura e Ingeniería al Servicio del Medio Ambiente. Del 13 al 15 de Mayo, 2004, Camaguey.
- Corujo M. (2006) "Censo de los Digestores Construidos en Ciudad de La Habana". X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en cuba. Del 27 al 29 de Marzo, Sancti Spiritus. ISBM 939-203-247-1. Editorial Feijó.
- Diaz M., Yordan R., Leiva A. (2006) "Digestores de biogás en las Tunas". X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en cuba. Del 27 al 29 de Marzo, Sancti Spiritus. ISBM 939-203-247-1. Editorial Feijó.
- González O. (2007). "Construyen en destilería avileña planta de biogás". *Diario Granma*, Habana. Mayo 7, Pág. 2.
- Han-Quing, Y. and Zhen-Hu, H (2005) "Application of rumen microorganisms for enhanced anaerobic fermentation of corn stover". *Process Biochemistry* 40, pp. 2371-2377.
- Han-Quing, Y. and Zhen-Hu, H (2006) "Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures". *Waste Management* 26, pp. 1222-1228.
- Hilbert, J. A. (1992) "Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural". I.N.T.A – Castelar, pp. 30.
- Indicadores Socioeconómicos de Cuba. *Revista Panorama Económico y Social de Cuba*.
www.medioambiente.cu/download/2003/Indicadores%20socioecon%F3micos.pdf. 2003
- Padilla, J. y Correa, J. (2006). Utilización de los residuos. *Industria de los derivados de la caña de azúcar*. Editorial científico-técnica, pp. 131-146, Cuba.
- Kivaisi, A. K. Y Eliapenda, S. (1995) "Application of rumen microorganisms for enhanced anaerobic degradation of bagasse and maize bran". *Biomass and bioenergy*. Vol. 8, No 1, pp. 45-50.
- Llabrés-Luengo, P. y Mata-Alvarez, J. (1988) "Influence of temperature, buffer, composition and straw particle length on anaerobic digestion of wheat straw – pig manure mixtures". *Resources, Conservation and Recycling*, 1, pp. 27-37.
- Méndez, D. (1997) "Toxicidad y biodegradación anaerobia de formaldehído". Tesis en opción al título académico de Doctor en Ciencia. Santiago de Compostela.
- Montalvo, S y Guerrero, L. (2003). "Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de Biogás". Universidad técnica: Federico Santa María. Chile.
- Paez, O. y Baz, R. (1999). "Bioabonos. Uso alternativo de residuales orgánicos sólidos y líquidos" CID – DECAP. Ciudad de la Habana.
- Pind, P. F.; Angelidaki, I. y Ahring, B. (2003). "Dynamics of the Anaerobic Process: Effects of volatile fatty acids". *Rev. electrónica: Wiley Inter Science*.
- Rajeshwari, KV. Panth, DC. Lata, K., Kishore VVN. (1998) "Studies on biomethanation of vegetable market waste". *Biogas Forum*; 3:4-11.
- Reactores anaerobios. [http://www.transwer.cl/tratamiento de las aguas residuales.htm](http://www.transwer.cl/tratamiento_de_las_aguas_residuales.htm). 2003
- Rozzi, A. (1984). "Modelling and control of anaerobic digestion process". *Trans. Ins Meas. Control* 6 (3): 153-159.
- Savran V. (2006) "Censo Digestores Construidos en Sancti Spiritus". X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en cuba. Del 27 al 29 de Marzo, Sancti Spiritus. ISBM 939-203-247-1. Editorial Feijó.
- Speece, R. E. (1996). "Anaerobic e Biotechnology for Industrial Wastewaters". Publicado por Archea Press. Tennessee.

- Suárez, J. y Beatón, P. (2000). "Thermochemical Properties of Cuban Biomass". Energy Sources, pp. 6 -12.
- Suárez, J. y Beatón, P. (2007). "Estado y Perspectivas de las Energías Renovables en Cuba". Tecnología Química.
- Suárez, R. y Morín, R. 2005. "Caña de azúcar y sostenibilidad: Enfoques y experiencias cubanas". DESAL.
- Thi Than Hai, D. (2005). "Manual para la formación en tecnologías para el biogás". Instituto de Energía de Ha Noi, Vietnam.