
UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS “JOSÉ MARTÍ PÉRZ”

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

CARRERA INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



TRABAJO DE DIPLOMA

Mejoramiento de la biodegradabilidad de la paja de caña con el empleo de microorganismos eficientes para la obtención de un digestato de mejor calidad como biofertilizante.

Aspirante: Oneldy Ramos Cancio.

**TUTORES: Lic. Janet Jiménez Hernández
Lic. Edelbis López Dávila**

CURSO: (2013 - 2014)

“El futuro tiene muchos nombres. Para los débiles es lo inalcanzable. Para los temerosos, lo desconocido. Para los valientes es la oportunidad.”

Hugo, Víctor

Dedicatoria.

A mis padres, cimientos de mi formación.

A mi abuela por su amor, ternura, preocupación y sacrificio constante.

A todos aquellos que de una forma u otra han aportado su granito de arena en la investigación.

Agradecimientos.

A la Universidad “José Martí Pérez” de Sancti Spíritus, especialmente a los profesores del laboratorio de Biogás por el incondicional apoyo en los diferentes momentos del proceso de la investigación.

A mis tutores, Lic. Janet Jiménez Hernández y Lic. Edelbis López Dávila por sus orientaciones precisas, el apoyo inigualable y la confianza depositada en mí.

A los oponentes y miembros de los tribunales que dedicaron su empeño a la revisión, corrección y sugerencias de la tesis.

Índice

Resumen:	Error! Bookmark not defined.
Introducción.....	2
Capítulo 1: Revisión Bibliográfica.....	- 6 -
1. La biomasa en Cuba como fuente energética.....	- 6 -
1.1. Los residuos agroindustriales.....	- 8 -
1.2. Recursos Agropecuarios.....	Error! Bookmark not defined.
1.3. Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética	- 10 -
1.4. Producción de biomasa.....	- 11 -
1.5. Caracterización de la biomasa como combustible	- 11 -
1.6. Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera ..	- 12 -
Soluciones a tener en cuenta.....	- 13 -
Solución medioambiental sustentable en la cosecha de la caña	- 14 -
Requerimientos de los RAC separados	- 16 -
1.7. Técnicas de tratamiento de residuos orgánicos	- 17 -
1.8. Proceso de digestión anaerobia.....	- 18 -
□ 1ra. Etapa.....	- 19 -
□ 2da. Etapa.....	- 19 -
□ 3ra. Etapa.....	- 19 -
1.9. Biogás	Error! Bookmark not defined.
1.10. Usos y aplicaciones de los subproductos del proceso de digestión anaerobia.....	- 20 -
1.11. Beneficios económicos, sociales y ambientales de la producción de biogás. - 20 -	
1.12. Proceso Químico de Fermentación del EM.....	- 21 -
1.13. EL USO DE MICROORGANISMOS EN EL MANEJO DE DESECHOS ..	- 22 -
1.13.1 Bacterias Fototróficas:.....	- 22 -
1.13.2. Bacterias Ácido lácticas:	- 23 -
1.13.3. Levadura:	- 23 -
1.13.4. Actinomicetos.	- 23 -
1.13.5. Hongos de fermentación	- 24 -
1.14. Proceso de ensilaje.....	- 24 -

1.15. Herramienta de análisis empleada (Diagrama Causa-Efecto)	- 25 -
Capítulo 2: Materiales y Métodos	- 26 -
2.1. Reactivos Empleados.	- 26 -
2.2 Equipos:.....	- 27 -
2.3. Preparación de la Muestra de Paja de caña.	- 27 -
2.4. Preparación del M.E	Error! Bookmark not defined.
Preparación del fermentado líquido.	Error! Bookmark not defined.
2.5. Preparación de Disoluciones:	- 27 -
2.6. Caracterización de los residuos cañeros como sustratos	- 28 -
2.7. Descripción del ensayo para la biodegradabilidad de la paja de caña con M.E	- 28 -
2.8. Procedimiento para determinar los azúcares (método del ácido 3,5 Dinitrosalicílico).....	- 29 -
2.9. Procedimiento para determinar la DQO (método del reflujo cerrado).....	- 29 -
2.10. Descripción del ensayo para la determinación del potencial de biogás -	30 -
2.11. Técnicas analíticas.	- 31 -
2.12. Potencial de biogás.....	- 31 -
Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados	- 33 -
Caracterización de la paja de caña como sustrato	- 34 -
Resultados del ensayo para la biodegradabilidad de la paja de caña con M.E -	34 -
-	
Determinación de los azúcares.	- 34 -
Determinación de los azúcares.	- 35 -
Resultados al final de la producción de biogás.....	- 37 -
3.4. Aprovechamiento energético de los residuos. Estimación de la energía eléctrica y calorífica que puede generarse.....	- 39 -
Conclusiones.....	Error! Bookmark not defined.
Recomendaciones.....	Error! Bookmark not defined.
Bibliografía	Error! Bookmark not defined.
Anexos	Error! Bookmark not defined.

Resumen

Resumen

Actualmente la paja de caña en los centros de limpieza de la Empresa Agroindustrial Azucarera "Uruguay", de Sancti Spiritus, están teniendo una inadecuada disposición la cual se quema en dicho centro, causando daños ambientales. El objetivo de este trabajo fue: mejorar la biodegradabilidad de la paja de caña con el empleo de microorganismos eficientes para la obtención de un digestato de mejor calidad como biofertilizante. Primeramente se realizó un diagnóstico acerca de la disposición actual de la paja de caña en la empresa mediante un diagrama Causa- Efecto (diagrama de Ishikawa). Se caracterizó la paja de caña desde el punto de vista físico-químico. Se evaluó un pretratamiento de la paja utilizando microorganismos eficientes a diferentes concentraciones de este y 5 tiempos de incubación, además se evaluó la digestión anaerobia de paja de caña con y sin pretratamiento en ensayos a batch, en condiciones mesofílicas a 35°C durante 25 días caracterizando finalmente el digestato obtenido para conocer su capacidad como fertilizante.

La caracterización de la paja de caña mostró la presencia de macro y micronutrientes (C, N, P, K) que permiten catalogarlo como un fertilizante orgánico, sin embargo su alto contenido de lignina, limita la disponibilidad de estos nutrientes. El empleo del pretratamiento biológico de la paja utilizando microorganismos eficientes al 20% por 48 horas resultó efectivo para liberar la mayor cantidad de azúcares (1,34 g/L). A la vez que la digestión anaerobia de la paja de caña con pretratamiento biológico mejoró la conversión de biomasa en metano, 3,7 veces, ya que permite una mayor disponibilidad de compuestos biodegradables. La determinación de macroelementos en el efluente como el N, P, K, permitió definir las propiedades biofertilizante mejoradas que se logran con el empleo del pretratamiento biológico y en general con la digestión anaerobia de paja de caña.

Abstrac

Currently cane straw cleaning centers Agroindustrial Company Sugar "Uruguay" in Sancti Spiritus, are having an improperly set which is burned in the center, causing environmental damage. The aim of this study was: to improve the biodegradability of cane straw with efficient use of microorganisms for the production of a better quality digestate as biofertilizer. First, a diagnosis was made on the current provision of cane straw in the company through a cause-effect diagram (Ishikawa diagram). Cane straw was characterized in terms of physico-chemically. Pretreatment of straw using efficient microorganisms at different concentrations, and 5 of this incubation times was assessed, anaerobic digestion of cane straw was evaluated with and without pretreatment in batch tests, in mesophilic conditions at 35 ° C for 25 days characterizing finally obtained for digestate as fertilizer capacity.

Characterization of cane straw showed the presence of macro and micro nutrients (C, N, P, K) that allow cataloged as an organic fertilizer, but its high lignin content, limits the availability of these nutrients. The use of biological pretreatment using effective microorganisms straw 20% for 48 hours was effective to release most amounts of sugars (1,34 g/L). While anaerobic digestion of rice straw with biological pretreatment improved the conversion of biomass to methane, 3.7 times, allowing greater availability of biodegradable compounds. Determination of macroelements in the effluent as N, P, K, allowed defining biofertilizer improved properties are achieved with the use of biological pretreatment and generally anaerobic digestion of cane straw.

Introducción

Introducción

El mundo sufre una doble crisis: la energética, dada por el creciente consumo de recursos energéticos fósiles, y la climática, Aunque se estima que el sector energético es el responsable de más de la mitad del calentamiento global por el predominio en el consumo de energía de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), otros sectores socioeconómicos como el transporte, la agricultura y el manejo de desechos, también contribuyen al cambio climático a través de emisiones de gases de efecto invernadero (Pichs, 2008).

La humanidad cuenta con algunas vías para minimizar los problemas energéticos y ambientales, Donde un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía renovables se encuentra dentro de las estrategias a seguir, destacándose el uso de la biomasa.

La biomasa está considerada como una de las principales fuentes de energía renovable en el futuro. El interés en esta forma de energía está creciendo cada vez más, como lo demuestran los frecuentes congresos y programas internacionales sobre el tema (Chaviano, 2011)

En la actualidad más del 99 % de la generación eléctrica del SEN (Sistema Eléctrico Nacional) se realiza a partir de combustibles fósiles líquidos (Fuel oil, crudo nacional y diesel), por lo que reviste especial importancia buscar vías para la disminución de su uso, empleándolos de forma más eficientes y aumentando la participación de otras fuentes energéticas que contribuyan a su sustitución. (Palmero, 2006)

En Cuba esto adquiere un significado mucho mayor, pues nuestro país no dispone de grandes reservas de combustibles convencionales, y para cubrir sus necesidades tiene que importarlo. Se han realizado varios estudios en lo referido a fuentes de energía renovable y en específico al biogás. (López González, 2006)

La economía de la provincia de Sancti Spíritus está sustentada fundamentalmente por el desarrollo de la actividad agropecuaria, generándose considerables volúmenes de residuos que pueden ser transformados en energía (García, 2011).

Entre los principales problemas que se presentan en la provincia se encuentran; la escasez de combustible de uso doméstico para la cocción de alimentos, la inexistencia de infraestructuras para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, el incremento de la carga contaminante que se vierte al medio ambiente, y los relacionados con la deforestación y la pérdida de fertilidad de los suelos, por el arrastre de la capa vegetal y el uso de productos químicos que los acidifica. (Chaviano, 2011)

El uso de los residuos agroindustrial en la obtención de biogás ha originado un proceso que permite dar una opción de manejo a los desechos productivos. Este uso de los desechos o remanente degradables agroindustriales ha resultado ser una excelente opción, y se han generado muchos estudios para la búsqueda de la implementación de la digestión anaerobia para la obtención de biogás a partir de estos residuos. (Intriago, 2000).

Entre las nuevas fuentes energéticas y de materias primas, y las nuevas tecnologías que se deben considerar en la solución de los problemas más apremiantes relacionados con el medio ambiente, la producción de energía y de los alimentos, están las denominadas limpias, como es el caso de la biomasa, completamente limpia en CO₂ dado el ciclo natural del carbono; sin embargo, actualmente sólo representa 10% de la producción energética mundial, aún cuando se halla entre las de mayores perspectivas.

En Cuba, desde los primeros años de la década del sesenta, el aprovechamiento de este recurso energético es parte importante del programa de desarrollo del Ministerio del Azúcar (MINAZ), de gran interés para el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), y de la Comisión Nacional de Biomasa. Los resultados fundamentales se basan en la disponibilidad de un sistema de cosecha de la caña con magníficas posibilidades para la utilización de toda la biomasa cañera [Aguilar, 2001].

Las principales investigaciones del uso de la paja de caña encontradas en la literatura consultada se centraron en su conversión termoenergética en

turbogeneradores, para la producción de vapor y electricidad en dependencia del poder calórico de esta, la cual varía de acuerdo a su porcentaje de humedad (Aguilar, 2007). Otro uso es la producción de compost como fertilizante agrícola.

En la literatura consultada se encontraron muy pocos reportes del uso la paja de caña sola como posibles sustratos para producir biogás y que evalúen el potencial de estos, como única fuente de carbono en la fermentación anaerobia, se aborda más el uso de otras biomásas y la codigestión de la paja de caña junto a otros residuos de cosechas (Carrillo, 2003).

Cuando la caña es quemada para el corte, o cuando los RAC son quemados en las instalaciones de limpieza, se produce una contaminación del medio ambiente con diseminación de cenizas, humos y gases tóxicos, que amenazan a la población aledaña con enfermedades bronco respiratorias, que afectan la calidad de vida del hombre, las plantas y los animales.(Aguilar, 2007)

Se constató además que en los centros de limpiezas de la empresa agroindustrial azucarera “Uruguay no se le da un manejo adecuado a la paja de caña ya que la misma es quemada, provocando la contaminación al medio ambiental.

Como consecuencia con los aspectos antes mencionado, se asume como **problema científico**: ¿Cómo mejorar la biodegradabilidad de la paja de caña con el empleo de microorganismos eficientes para la obtención de un digestato de mejor calidad como biofertilizante?

En correspondencia con los elementos señalados, se plantea como **hipótesis**: Si se mejorar la biodegradabilidad de la paja de caña con el empleo de microorganismos eficientes se puede obtener un digestato de mejor calidad como biofertilizante.

Desde estos argumentos se plantea como **objetivo general**: Analizar el mejoramiento de la biodegradabilidad de la paja de caña de un Centro de Limpieza de la Empresa Agroindustrial Azucarera Uruguay con el empleo de

microorganismos eficientes para la obtención de un digestato de mejor calidad como biofertilizante.

Para dar cumplimiento al objetivo general es necesario alcanzar los siguientes **objetivos específicos**:

1. Diagnosticar la disposición actual de la paja de caña y su reutilización en la Empresa Agroindustrial Azucarera Uruguay de Sancti Spíritus.
 2. Determinar el potencial de biogás a partir de la digestión anaerobia de la paja de caña, con y sin empleo de pre-tratamiento biológico.
 3. Determinar las características agronómicas del biofertilizante resultante de la digestión anaerobia de la paja de caña, con y sin empleo de pre-tratamiento biológico.
-

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

En el presente capítulo se expone las bases conceptuales e identifica las brechas epistemológicas sobre la utilización de los residuos de caña para la producción de energía por conversión a biogás y biofertilizante. Se realiza un esbozo de la biomasa en Cuba como fuente energética, solución medioambiental sustentable en la cosecha de la caña, los procesos de tratamiento de la digestión anaerobia con y sin la utilización de pre-tratamiento con ME, así como las herramientas empleadas en el diagnóstico como el diagrama de causa-efecto, que nos llevó a la investigación.

1.1. La biomasa en Cuba como fuente energética.

La energía es algo que utilizamos constantemente, pero raramente pensamos en cómo administrarla no sólo para ahorrar dinero, sino también para ayudar al medio ambiente. Debemos tener claro que es la propia naturaleza la que más caro pagará todos nuestros derroches energéticos por lo tanto resulta prioritario, reducir esta dependencia económica de fuentes que poco a poco se agotan: petróleo, combustibles fósiles y para ello hay dos soluciones primordiales la primera potenciar el uso de fuentes alternativas y renovables; aún más importante aprender a usar eficientemente la energía, cuestión en la que todos tenemos igual responsabilidad. (García, 2011)

Los cambios socioeconómicos de las últimas décadas, altas concentraciones de población en núcleos urbanos, desarrollo de la industria agroalimentaria, intensificación de las explotaciones ganaderas, prácticas consumistas, entre otras, han propiciado la producción de grandes cantidades de residuos orgánicos que ocasionan graves problemas ambientales.

Una primera clasificación de los residuos se puede realizar en función de su origen, distinguiendo los que proceden del sector primario, agrícolas, animales y forestales, los procedentes del sector secundario, residuos industriales (agroalimentarios, textiles, etc.) y finalmente los procedentes del sector terciario o

de servicios, constituidos por residuos sólidos urbanos (RSU) y lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales (Campos, 2001).

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone unas ventajas medioambientales de primer orden, como son:

- Disminución de las emisiones de azufre.
- Disminución de las emisiones de partículas.
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX.
- Ciclo neutro de CO₂, sin contribución al efecto invernadero.
- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en las casas.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.
- Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos.
- Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.

Estas ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales.

La biomasa es la principal fuente de energía renovable en Cuba por el hecho de que carece de grandes ríos y zonas con altas velocidades del viento. Si bien el mayor potencial energético lo tiene la biomasa cañera, existen otras fuentes de importancia social o que su aprovechamiento es conveniente desde el punto de vista ambiental. Ese es el caso de las plantaciones energéticas en desarrollo, los residuos agroindustriales (arroz, frijoles, maíz) y los urbanos. Su utilización en la generación de electricidad está muy vinculada al desarrollo de tecnologías eficientes que permitan que la producción sea competitiva con el uso de los combustibles convencionales en las condiciones específicas de las naciones subdesarrolladas (Torres, 2007).

En Cuba, los principales residuales provienen de la industria azucarera, las destilerías de alcohol y las entidades de cría de cerdos. Los principales proyectos para producir electricidad a partir de la biomasa están encaminados hacia regiones aisladas y la utilización de residuos agroindustriales, cuyo aprovechamiento implica la solución de problemas de contaminación ambiental y la disminución de los costos. En la mayoría de los casos, la potencia eléctrica que puede instalarse es de unos cuantos mega-watts (MW), por lo que la utilización de plantas térmicas es muy costosa, debido al factor de escala (Villegas, 2005). Por esa razón, el sistema de gas de biomasa -motor de combustión interna- es la tecnología más adecuada para ese propósito (Villegas, 2005). La principal dificultad en su empleo es la presencia de contaminantes en el gas combustible, lo que exige un eficiente sistema de limpieza. También puede emplearse con esos fines los residuales de la madera aserrada y los del arroz, tras el proceso de secado y molinado, en particular la cáscara que permite el aprovechamiento de las cenizas de su combustión (Palmero, 2006).

Estimados preliminares refieren que la utilización del potencial disponible de desechos orgánicos de la producción agropecuaria y cañero – azucarera posibilitaría la generación de 179.8 GWh de energía eléctrica y 267.9 GWh de energía térmica. Sin embargo existen otras fuentes no estudiadas como son los desechos orgánicos urbanos, o los provenientes de la producción agropecuaria, forestal, cañero – azucarera e industrial, los cuales son un potencial apreciable para la obtención de energía a gran escala y por tanto una perspectiva para la mejora de las condiciones energéticas de Sancti Spiritus. (López González, 2006)

1.2.2. Los residuos agroindustriales y agropecuario.

Entre los residuos agrícolas e industriales hay un grupo importante que puede ser utilizado como fuente de energía para la generación de electricidad por medio de la producción de biogás (Valentina, 2010). En este campo existen en Europa experiencias positivas en plantas de mediana y gran escala, que para lograr ser rentables se caracterizan por la utilización de una alta tecnología (López-Dávila,

2013). En Cuba los principales residuos para aplicaciones de este tipo, son los provenientes de la industria azucarera, las destilerías de alcohol y las empresas de producción porcina (López González, 2006). En el país existe una amplia experiencia en el diseño y construcción de pequeños digestores y se realizan trabajos de investigación y desarrollo dirigidos a posibilitar el diseño y explotación de plantas de segunda generación. En este campo se siguen con mucho interés los trabajos que se realizan para evaluar la aplicación de turbinas aereoderivativas que utilicen biogás como combustible.

- Los residuos agropecuarios

Los residuos agropecuarios están representados por las deyecciones de los animales (residuos pecuarios) y los desechos de campo y de proceso (residuos agrícolas).

Entre los residuos agrícolas más representativos en la Provincia se incluyen los provenientes de la cosecha de la caña de azúcar (RAC); la paja de la caña, arroz (paja), tabaco (tallo, venas y residuos de hojas), Boniato (Bejuco de Boniato), Maíz (rastrojo), Plátano (Hojas, cepa) ver Anexo 1.

El retorno de los residuos de cosechas, al suelo, tiene un notable efecto sobre las propiedades y los procesos de los mismos, induciendo cambios en sus propiedades físicas y químicas; retorna nutrientes, incrementa el contenido de materia orgánica, mejora la estructura del suelo e influye sobre los regímenes hídricos y térmicos del suelo, los cuales tienen un efecto positivo sobre la productividad y sostenibilidad de los mismos. Según este mismo autor la mayoría de los residuos de cosechas producidos deben ser retornados directamente como cobertura muerta o indirectamente como compost al suelo (Lal, 2000)

Por otra parte el efecto de la aplicación directa de los residuos en el suelo para residuos fácilmente biodegradable ha sido estudiado por diferentes investigadores. En este sentido (Restrepo, 1994) señala que la agricultura en los trópicos no debería jamás calentar u oxidar químicamente el suelo, dado que las temperaturas medidas en los suelos tropicales, fácilmente alcanzan hasta 70 °C, sino que al contrario se debe dar al suelo las condiciones para enfriarlo, reducirlo

químicamente y retardar o disminuir las reacciones químicas y bioquímicas. Estas reacciones producen diferentes gases que son emitidos a la atmósfera.

La digestión anaerobia puede ser una buena opción para la revalorización económica de estos residuos. La cantidad y calidad de residuos producida varía mucho (López-Dávila, 2012).

1.2.2. Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Si tomamos en cuenta sólo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacena alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que pueda producirse. 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 (Aguilar, 2014).

Durante los últimos veinte años se han desarrollado tecnologías que hacen posible introducir saltos importantes en la eficiencia de los procesos basados en combustibles renovables, como el bagazo y la paja de caña. Hoy existen instalaciones capaces de elevar la eficiencia entre 10 y 15 %; al mismo tiempo, se desarrollan otras tecnologías más avanzadas aún, como las turbinas de gas integradas con gasificadores de biomasa, que podrían entonces elevar los valores en veinte o treinta veces (Pérez, 1997).

Esos avances tecnológicos hacen competitiva la generación de electricidad a partir de la biomasa, si se la compara con la obtenida a partir de combustibles fósiles.

La combustión de la biomasa tiene además una ventaja ambiental: no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque sólo devuelve a la atmósfera el carbono que fijó la planta durante su crecimiento (Aguilar, 2014).

• Producción de biomasa

En zafras promedios anuales en nuestro país, de molidas de 70 millones de toneladas de caña, se producen unos 20,5 millones de toneladas de bagazo y una cantidad similar de residuos agrícolas (paja, cogollo y hojas) (Torres, 2007)

Históricamente la producción de energía eléctrica en nuestro país ha tenido como soporte principal la utilización de centrales termoeléctricas que consumen actualmente alrededor de 40 % de los combustibles derivados del petróleo, para generar más de 80 % de la electricidad total producida en el país. Esta situación implica que la producción de energía eléctrica depende de la capacidad para la importación de combustible, para lo cual se destina una parte importante de las divisas disponibles. La única alternativa viable para cambiar esta dependencia de los necesarios combustibles importados es logrando el aprovechamiento de las fuentes nacionales de energía (Torres, 2007)

El uso de los residuos agrícolas cañeros como combustible depende ante todo de la posibilidad de su recolección. En Cuba se cosecha 70 % de la caña en forma mecanizada por medio de cosechadoras que reintegran 50 % de los residuos agrícolas cañeros al campo; posteriormente, en centros de acopio y limpieza de la caña cosechada se separa 50 % de los residuos agrícolas que vienen del campo. Como promedio es posible recolectar 3,75 t de residuos agrícolas cañeros por hectárea de caña cosechada, equivalentes a 0,62 de toneladas de combustible equivalente ($tce = 37,5 \text{ MJ/kg}$) (Torres, 2007).

• Caracterización de la biomasa como combustible

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

Elementos químicos	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Azufre	Nitrógeno
Bagazo (%)	47,00	6,50	44,00	0,00	-----
RAC (%)	48,28	5,55	45,6	0,13	0,43

RAC: residuos agrícolas de cosecha

Calor específico de combustión.

Bagazo: Calor específico de combustión superior (CECS). 19 000-19 900 kJ/kg

Calor específico de combustión inferior (CECI): 17500-18900 kJ/kg

RAC: Si se considera como humedad promedio de los residuos agrícolas cañeros 25 %, después de haber transcurrido tres días de secado natural, se puede tener un valor aproximado de su calor de combustión, el cual es: CECI = 11 825 (kJ/Kg) (Villegas, 2005).

Contenido de cenizas

El bagazo de la caña aporta alrededor de 2,8 % de cenizas; y los residuos agrícolas cañeros, 9,5 aproximadamente.

Se plantea que el porcentaje de cenizas fluctúa entre 0,78 y 3,22, en dependencia del tipo de suelo, forma de alza y recolección. Los constituyentes de la ceniza varían en cantidad dentro de estrechos límites, de acuerdo con la cantidad de terreno, tipo de abono y variedad de la caña (Villegas, 2005).

1.2.2. Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera

En particular, la caña de azúcar exhibe índices más ventajosos que otros cultivos en cuanto al almacenamiento de energía proveniente de la radiación solar, como se aprecia en los aspectos siguientes:

- Es capaz de almacenar 1,7 % de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales, y 1,1 % en campos bien atendidos con regadío.
- Tiene un rendimiento potencial genético que se encuentra entre 200 y 300 t/ha, con un máximo teórico de 233 kg, que compara ventajosamente con otros cultivos.
- Para un valor calórico de 17 476 MJ/kg de materia seca (MS), con un contenido de materia seca de 30 % y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es veinte veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla al ingenio.
- Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja 30 % de humedad: 11,7 MJ/kg). (Aguilar, 2001)

▪ Soluciones a tener en cuenta

A pesar de que la industria azucarera produce anualmente una cantidad de biomasa renovable equivalente a 5,2 millones de tce, su utilización en la generación de electricidad es sólo equivalente al consumo de 0,4 millones de tce en las centrales termoeléctricas del país. Este hecho está relacionado, ante todo, con el aprovechamiento de la capacidad instalada y con la obsolescencia tecnológica de la base energética de la industria. (Pérez, 1997)

Un aumento significativo de la generación de electricidad en la industria azucarera se puede alcanzar mediante la introducción de generadores de vapor a alta presión (80 kg/cm²), lo cual requiere el uso de esquemas de generación similares a los utilizados en las centrales termoeléctricas. En este caso, debido al monto de la inversión, es necesario que la generación de electricidad se realice durante todo el año para lograr que la misma sea económicamente ventajosa. En Cuba el combustible más apropiado para lograr estos propósitos son los RAC, de los que como ya se indicó se recolectan anualmente alrededor de un millón de toneladas de combustible equivalente; el principal problema tecnológico por resolver resulta el de su compactación y conservación durante un tiempo prolongado. En estas condiciones es posible producir 120 kW/h/t de caña durante la zafra y 300 kW/h/t de RAC fuera de zafra. Estudios realizados demuestran la posibilidad de instalar en los centrales azucareros del país 1,675 MW, en centrales termoeléctricas con 41 unidades de 25 MW y 11 de 50 MW, con la posibilidad de producir hasta 9,648 GW/h anualmente. (Pérez, 1997)

Sin embargo, si esta biomasa no es convertida de manera eficiente y limpia en una forma de energía secundaria, los beneficios medioambientales sólo se comprenden parcialmente. Por esta razón debe favorecerse la utilización de la biomasa de una manera moderna y eficaz, por encima de las aplicaciones tradicionales.

1.4.3. Solución medioambiental sustentable en la cosecha de la caña

La preparación de la biomasa agrícola cañera o residuos agrícolas de la caña (RAC) es una operación que puede resultar muy compleja debido a la poca uniformidad, el tamaño de las partículas, la alta humedad y el alto contenido de tierra cuando la recolección no es adecuada, siendo generalmente indispensable en el esquema tecnológico de transformación energética (Pérez y Aguilar, 2002). Los equipos destinados a la preparación de esa biomasa reciben un material de muy baja densidad con tamaño de partículas de hasta un metro de longitud, las cuales deben ser reducidas en el menor de los casos a alrededor de 50 mm (clase 11,64 mm) (Aguilar, 2001).

Posibilidades de la biomasa en la industria de la caña de azúcar

La potencialidad de la biomasa en la industria de la caña de azúcar permite disminuir los costos de producción actual del azúcar y los derivados, si se emplea racionalmente toda la biomasa creada por la energía solar durante el cultivo de la caña, considerando el bagazo y los RAC, lo cual representa más de 50% de la materia prima que llega a la industria.

Los residuos agrícolas de la caña (RAC) representan un potencial de biomasa equivalente a 30% de toda la materia seca aprovechable en la cosecha de la caña, con un valor calórico que fluctúa entre 1 700-4 500 kCal/kg, en dependencia del contenido de humedad. De esto se deriva que, en términos energéticos, por cada mil toneladas de RAC pueden ser sustituidas 310 toneladas de petróleo combustible, cuyo valor asciende a 155 000 USD, según los precios del fuel oil en el mercado internacional en los últimos años. Los resultados son aún mayores cuando se consideran también la alimentación animal, los fertilizantes y los beneficios del medio ambiente. (Aguilar, 2014)

Esto ofrece oportunidades al desarrollo de tecnologías rentables que permiten disminuir los costos de producción en el sector de la industria azucarera y en otros de la economía nacional.

Capítulo 1: Revisión Bibliográfica

Por ejemplo, en una zafra de 6 MMt de azúcar con rendimientos industriales y agrícolas de 11% y 80 t/ha, respectivamente, en la que es necesario cortar 687 500 ha de caña (55 MMt de caña), los RAC producidos pueden ser utilizados racionalmente como aparece en la tabla 2, con la aplicación del sistema de cosecha cubano.

Tabla 2. Distribución de los RAC en el sistema de cosecha

Esquemas de cosecha	Total de RAC producido		Cobertura del terreno		Materia prima y combustible			
					Inst. de limpieza		Bagazo en la industria	
	MMt	%	MMt	%	MMt	%	MMt	%
Mecanizado	9,625	70	5,101	53	2,503	26	2,021	21
Manual	4,125	30	1,733	42	1,485	36	0,866	21
SCC	13,750	100	6,834	50	3,988	29	2,887	21

SCC: Sistema de cosecha cubano

Como se puede observar en la tabla 2, con la aplicación de este sistema de cosecha, 50% de los RAC quedan distribuidos en el campo como cobertura del terreno para evitar la proliferación de malas hierbas, mantener la humedad del terreno, evitar la corrosión y mantener la flora microbiana, con afectaciones mínimas en las labores de cultivo, ya que tienen tamaño de partículas entre 200-400 mm cuando el corte es mecanizado.

El 21% de los RAC es transportado hasta la industria junto con la caña, formando parte posteriormente de la masa de bagazo a la salida del tándem de molinos, la que es utilizada generalmente como combustible en la generación de energía.

Mientras que 29% de los RAC (3 988 MMt) se separan y concentran en las instalaciones de limpieza ubicadas en puntos intermedios entre el campo y la industria, que resultan fáciles de preparar para su utilización como combustible o

materia prima en la producción de energía eléctrica, alimento animal, fertilizantes, etc., en el proceso de diversificación industrial, con beneficios ambientales y económicos (Torres, 2007).

▪ **Requerimientos de los RAC separados**

Los requerimientos de los RAC para el proceso industrial pueden ser los siguientes:

- Tamaño de partículas: <50 mm (clase 11,6 mm).
- Contenido de humedad: 30 ±5%.
- Contenido de ceniza: 8 ±2%.
- Densidad aparente: 100 ±20%.
- Valor calórico neto: 2 284 kCal/kg.
- Relación fuel oil/RAC: 4,38.

Experiencias del uso directo de los RAC con estas características en la alimentación animal, muestran resultados satisfactorios [Aguilar y Arango, 2006].

• **Principales logros alcanzados por la Industria Azucarera Cubana con las fuentes renovables de energía.**

- No se consume fuel oil en la producción de azúcar, solo biomasa.
- Proyecto de recolección de RAC en el campo.
- Molinos de paja de caña en 9 centrales azucareros, reduciendo el consumo de fuel oil en 80 Kgs/tm de azúcar refino producido.
- Utilización de los RAC en las arrancadas y paradas de los centrales.

(OLADE, 2010)

• **Proyectos actuales**

- Rehabilitación de molinos de paja en 5 centrales, de ellos 3 con refinerías.
- Modernización de los centrales con tecnologías adecuadas para generar electricidad en tiempo de no zafra.
- Se estudia el montaje de una bioeléctrica para la generación de electricidad utilizando solamente biomasa.

- Introducción de tecnologías adecuadas para producir biogás, donde quiera que exista un residual contaminante con características apropiadas, logrando la sostenibilidad y la compatibilidad con el medio Ambiente (OLADE, 2010)

1.4.4. Técnicas de tratamiento de residuos orgánicos

Existen varias estrategias para el tratamiento de residuos agroindustriales, entre estas se destacan el compostaje y la fermentación en estado sólido.

El compostaje es un método muy usado en el reciclaje de basura municipal y agrícola (Chefetz et al., 1996). Consiste en una biotécnica de biodegradación aerobia en estado sólido en la cual se controlan el contenido de humedad, nutrientes, y ciertos parámetros físico – químicos establecidos para obtener como producto final compost que es usado como enmienda de suelos (Eweis et al., 1999) Las condiciones ambientales han sido un factor limitante en el desarrollo del compostaje ya que los procesos de degradación son lentos y variables según la estación lo que lleva a una calidad pobre del producto final (Benitez & Gonzales, 2003). Existen muchas deficiencias en la implementación de procesos de compostaje como la falta de control de variables, tamaño y composición de la basura, uso indiscriminado de pesticidas en los cultivos así como la formación de gases tóxicos y líquidos (Lugo et al., 2005).

El uso exitoso del compost depende de su grado de madurez y estabilidad. La descomposición de compuestos fitotóxicos producidos en las fases tempranas del proceso de compostaje y la proporción de humus estable formado están influenciados por la naturaleza del material, su estructura y composición, y la capacidad de microorganismos para degradar las macromoléculas que constituyen el residuo (Vargas et al., 2009).

La fermentación en estado sólido (Solid state fermentation - SSF) es una alternativa actualmente utilizada para la producción de enzimas y otros metabolitos secundarios a partir de residuos agroindustriales en biorreactores que resulta poco costosa y requiere mínimas actividades de laboreo (Grijalva,

2013). Varias investigaciones con este sistema han obtenido buenos resultados en un amplio rango de aplicaciones tanto en escala de laboratorio, piloto e industrial (Lee, Darah, & Ibrahim, 2010). En la investigación de Huang et al. (2010) se estudió mediante fermentación en estado sólido la degradación de residuos lignocelulósicos bajo estrés de plomo con la cepa fúngica *Phanerochaete chrysosporium* demostrando ser eficiente

- **Proceso de digestión anaerobia.**

La digestión anaerobia es uno de los procesos de tratamiento biológico más antiguos utilizado para la estabilización de residuos orgánicos, donde la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular, es convertida en una mezcla de gases (biogás) y un efluente estabilizado o lodo con propiedades biofertilizantes (Montalvo y Guerrero, 2003). El biogás está formado principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas concentraciones de otros gases como H_2 , H_2S , NH_3 , N_2 y vapor de agua.

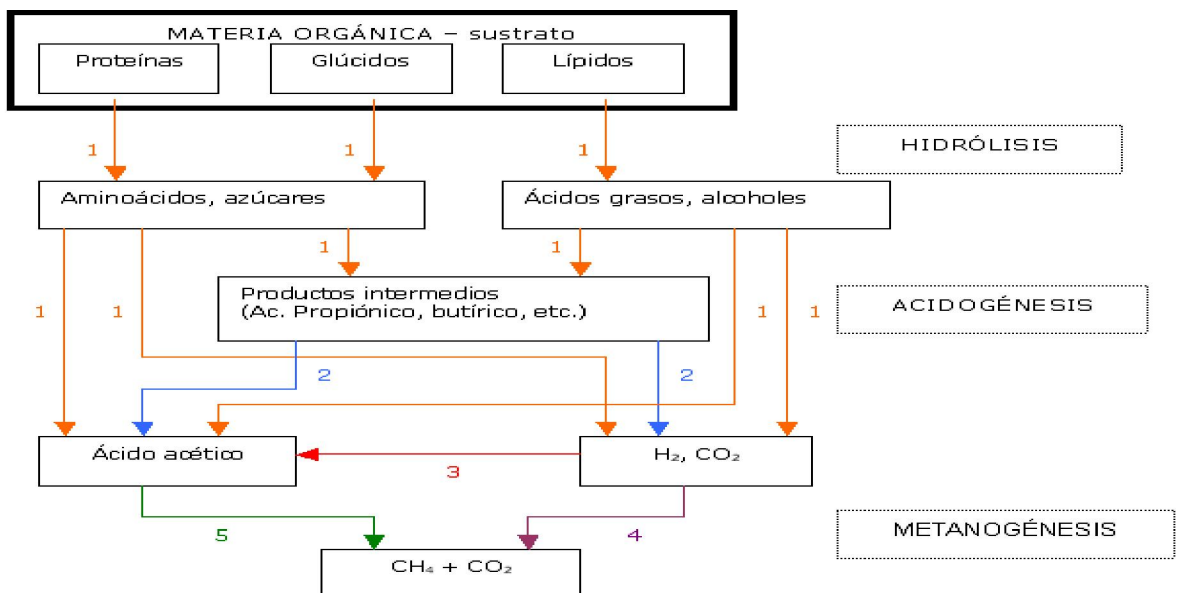


Figure 1 Etapas del proceso de producción de biogás

Se consideran tres etapas las fundamentales en el proceso de biodigestión, siendo responsables de cada una de ellas un grupo de bacterias diferentes:

- **1ra. Etapa (Hidrólisis):** En esta etapa, los carbohidratos o polisacáridos (almidón, celulosa, etc.); los lípidos o grasas y las proteínas son reducidas a moléculas más simples mediante el proceso de hidrólisis.
- **2da. Etapa (Fermentación de Ácidos ó Acidogénesis):** En esta etapa, los productos anteriores (compuestos solubles) son convertidos en Ácido Acético, Hidrógeno y CO₂.
- **3ra. Etapa (Formación de Metano o Metanogénesis):** En la III etapa los productos anteriores (ácidos orgánicos) son convertidos en metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros gases, a esta mezcla se le llama biogás.
- La etapa de **hidrólisis** es la etapa **limitante** para **residuos sólidos complejos** como la cachaza, bagazo, pajas de arroz y los RAC.

1.5. Proceso de Producción de Biogás

El biogás es un compuesto de gases que principalmente se compone de CH₄ y CO₂ que se produce de la descomposición anaeróbica de materia orgánica realizado por microorganismos (Cuadro 1). El gas fue descubierto y reportado por Shirley en 1667 en los pantanos que causan los llamados “fuegos fatuos”. Luego Volta relacionó el gas con la descomposición de la vegetación en el fondo del agua (Biogas, 2005). El gas combustible del biogás es el CH₄ y éste es incoloro e inodoro. Al quemarlo se produce una llama azul y productos no contaminantes en una combustión completa (MANDUJANO, 1981).

Cuadro 1: Promedio de gases que componen el biogás (MANDUJANO, 1981).

Gas	Porcentaje
Metano (CH ₄)	54 % - 70 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	27 % - 45 %
Hidrógeno (H ₂)	1 % - 10 %
Nitrógeno (N ₂)	0,5 % - 3 %
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	0,1 %

La producción de Biogás es un proceso bioquímico, el cual consiste en la descomposición anaeróbica de la materia orgánica (desechos de animales,

vegetales, residuos de los procesos industriales, entre otros). Este proceso engloba una serie de reacciones bioquímicas y se pueden identificar dos fases principales: una fase acidogénica donde la materia orgánica se convierte en su mayoría a acetatos y una segunda fase metanogénica donde se produce CH_4 y CO_2 (Biogás, 2005).

- **Usos y aplicaciones de los subproductos del proceso de digestión anaerobia.**

Los principales subproductos del proceso de digestión lo constituyen el lodo digerido (biofertilizante) y la mezcla de gases (biogás) resultante de la descomposición anaerobia de la materia orgánica (Preston, 2005).

El lodo digerido se emplea como abono orgánico en la agricultura en diversos cultivos con resultados alentadores. Con la necesidad de una agricultura sostenible y ecológica, sin deterioro del medio ambiente, el empleo de este residuo ha cobrado una mayor importancia, no solo como abono sino también, como sustrato para la germinación y crecimiento de posturas en las conocidas casas destinadas para estos fines (Preston, 2005).

- **Beneficios económicos, sociales y ambientales de la producción de biogás.**

Los efectos económicos, sociales y ambientales de la producción de biogás ya son conocidos por la inmensa mayoría de los hombres que se dedican a esta labor a escala internacional y constituyen preocupación cada vez más alta por parte de los mismos, puesto que sería muy beneficioso para toda la humanidad, que la generación de energía partiera de este sistema. Lo anterior lo reafirma el hecho de que habría una reducción notable en la emisión de gases de efecto invernadero y la reducción de cargas contaminantes DBO_5 en más del 90 % y del DQO en un 60 – 70 %, así como la disminución de emisiones de CO_2 , que es un propósito del protocolo de Kyoto, puesto que fue valorado el efecto dañino que tiene para el medio ambiente a partir de los métodos generadores de energía predominantes en la actualidad. Es evidentes también la reducción de olores y de emisiones de

gases de efluentes aplicados al terreno en más del 75%, la reducción de la atracción de moscas y ratones, así como la mejoría de la capacidad de separación de sólidos en los residuos y se logra una disminución de más del 60-75% de sólidos volátiles como consecuencia del proceso referido (Palmero, 2006).

Los efectos constatados tiene un amplio diapasón que abarca un sin número de elementos en el que queda incluida la agricultura, pues la producción de fertilizante estable mineralizado y concentrando en nutrientes rinde importantes beneficios a este sector y de igual forma, recibe el impacto consecuente de la destrucción de semillas de malas hierbas y reducción de patógenos.

Para lograr la generalización de este proceso, que conllevará a la humanidad a nuevos horizontes energéticos, factibles a su bienestar, implica la existencia también de nuevas fuentes de empleo y, por supuesto, que la dependencia actual en cuanto al consumo energético sea sustituida por este, más económico y sobre todo renovable (Campos, 2001).

El sistema de biogás es favorable a la preservación del medio ambiente, mediante la disminución del escape de metano a la atmósfera y el decrecimiento de la tala de árboles y por consiguiente la protección de la flora y la fauna (Dinuccio, 2010).

Se obtiene un bioabono de alta calidad que se aplica para el mejoramiento de los suelos, como sustrato de organopónicos, de viveros de frutales y como base para el desarrollo de la lombricultura (Preston, 2005).

1.6. Proceso Químico de Fermentación del ME

En el proceso de fermentación las bacterias ácido lácticas generan ácidos orgánicos como resultado de su metabolismo, utilizando como sustrato los derivados de la materia orgánica producida en la hidrólisis. Luego las bacterias fototróficas se encargan de producir ácido sulfúrico para ser aprovechadas por las bacterias reductoras de sulfatos produciendo sacáridos. Estos sacáridos vuelven a ser reprocesadas junto con los demás derivados de la materia orgánica para repetir el ciclo (CHINEN, 1998).

Las bacterias fototróficas son el pivote central de la efectividad del ME que utilizan la luz solar y ácidos orgánicos para multiplicarse (Biogás technology, 2005). La

relación de cooperación y co-prosperidad del EM hace que los otros microorganismos provean de ácidos orgánicos a las bacterias fototróficas. Es así por el cual el EM funciona en ausencia de luz también (Higa, 1994).

- **Uso de microorganismos en el manejo de desechos**

Los microorganismos han sido usados a lo largo de la historia en diversas áreas como la medicina, ingeniería de alimentos, ingeniería genética y en la protección del medioambiente. Una desventaja de los mismos es su difícil reproducción de resultados. Los microorganismos requieren de condiciones adecuadas para su buen rendimiento; entre las cuales están el agua, oxígeno, sustrato, condiciones de pH, temperatura en el cual se están desarrollando (Higa y Parr, 1994).

La función de cada microorganismo es lo que determina si el microorganismo es benéfico o patógeno. Los microorganismos benéficos son aquellos que fijan nitrógeno atmosférico en el suelo, descomponen desechos y residuos orgánicos, desintoxican pesticidas, suprimen enfermedades de plantas y patógenos en el suelo, enriquecen el ciclo de nutrientes, y producen compuestos bioactivos como vitaminas, hormonas y enzimas que ayudan en el crecimiento de las plantas (Higa y Parr, 1994).

Una nueva clasificación de microorganismos fue dada por Terugo Higa, donde clasifica a ciertos microorganismos como eficientes. Este concepto se ha desarrollado una vez que se logró un cóctel de microorganismos específicos, conocido hoy en día como EM, y ha dado muy buenos resultados en diversas áreas. El EM contiene especies selectas de microorganismos y las poblaciones que más predominan son bacterias ácido lácticas y levaduras. Como población minoritaria están las bacterias Fototróficas, algunos actinomicetos y otro tipo de microorganismos. Lo importante es que estos microorganismos son compatibles uno con el otro y pueden coexistir juntos (Higa y Parr, 1994).

Las **Bacterias Fototróficas** (*Rhodopseudomonas* spp) son microorganismos autosuficientes e independientes que sintetizan sustancias beneficiosas de los desechos y consumen gases tóxicos (ejemplo el sulfato de hidrógeno) además

sintetizan las sustancias útiles producidas por la secreción de las raíces, usando la luz solar y el calor del suelo como fuentes de energía. Los productos obtenidos por estas bacterias son aminoácidos, ácidos nucleicos, sustancias bioactivas y azúcares; todas las cuales ayudan al crecimiento y desarrollo de las plantas. Estas bacterias son el soporte de todos los otros microorganismos (Higa y Parr, 1994).

Las **bacterias ácido lácticas** (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*) producen ácidos a partir de azúcares y otros carbohidratos provenientes de las bacterias fotosintética y las levaduras. Esta es la razón por la que ciertas comidas o bebidas tales como el yogurt o los quesos se fabrican utilizando estas bacterias lácticas. El ácido láctico es un potente esterilizador, que combate los microorganismos perjudiciales como *Fusarium sp* y acelera la descomposición de las materias orgánicas, ayuda a solubilizar la cal y el fosfato de roca. Por otra parte las bacterias ácido lácticas facilitan la fermentación de materiales tales como la celulosa. (Higa y 1994).

Las **levaduras** (*Saccharomyces cerevisiae*, *Candida utilis*) tienen como función de degradar proteínas complejas como los carbohidratos para sintetizar sustancias bioactivas como hormonas, vitaminas y enzimas que sirven de sustrato para estimular el crecimiento y actividad de las bacterias ácido lácticas y los actinomicetos; incrementan la actividad celular y el número de las raíces (Higa y Parr, 1994). Todos los microorganismos anteriormente mencionados coexisten y prosperan juntos. Mientras que las bacterias Fototróficas sirven de sustrato para levaduras y bacterias ácido lácticas, al mismo tiempo las levaduras junto con las bacterias ácido lácticas producen sustancias que sirven para el desarrollo de las bacterias Fototróficas (Higa y Parr, 1994).

Sus secreciones son sustratos útiles para cierto microorganismos efectivos, tales como las bacterias ácidos lácticas y los actinomicetos.

Los **actinomicetos** (*Streptomyces albus*, *Streptomyces griseus*) funcionan como antagonista de muchas bacterias y hongos patógenos de las plantas debido a

que producen antibióticos (efectos biostáticos y biocidas) benefician el crecimiento y actividad del axobacter y de las micorrizas.

Producen sustancias antimicrobianas a partir de los aminoácidos y azúcares producidos por las bacterias fotosintéticas y por la materia orgánica. Esas sustancias antimicrobianas suprimen hongos dañinos y bacterias patógenas.

Los actinomicetos pueden coexistir con la bacteria fotosintética. Así ambas especies mejoran la calidad de los suelos a través del incremento de la actividad microbiana.

Los **hongos de fermentación** (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*), el *Aspergillus* y el *Penicillium* actúan descomponiendo rápidamente la materia orgánica para producir alcohol, ésteres y sustancias antimicrobianas. Esto es lo que produce la desodorización y previene la aparición de insectos perjudiciales y gusanos.

Cada una de las especies contenidas en el ME (Bacterias fotosintéticas, ácidos lácticos, levaduras, actinomicetos y hongos de fermentación) tienen su propia importante función. Sin embargo podríamos decir que las bacterias biocinéticas es el pivote de la tecnología ME, pues soportan las actividades de los otros microorganismos. Este es el fenómeno que llamamos coexistencia y coprosperidad. (Higa y Parr, 1994).

1.7. Proceso de ensilaje

El ensilaje es una técnica muy antigua que hace posible la conservación de forraje a través de la fermentación de los azúcares y almidones disponibles en las plantas para producir ácido que ayudan a conservar el valor nutritivo de los forrajes (Gómez, 1990).

Durante el proceso de ensilaje se producen fermentación de azúcares y almidones por la acción de microorganismo anaerobios formándose principalmente ácidos láctico y acéticos a partir de los carbohidratos en el ensilado al alcanzarse un PH de 3,5 a 4 detiene la fermentación asegura la estabilidad del producto, esta alta acidez inhibe la fermentación butírica, la cual se da como consecuencia de la

descomposición del ácido láctico por bacterias del género. Para asegurar una adecuada fermentación, es necesario la total extracción del aire del ensilaje para evitar la fermentación butírica, esto se logra con una buena compactación del material al ser ensilado (García, 1979).

Para la producción de ensilaje se requiere de un sistema hermético en el cual el forraje se compacta para extraer el máximo de aire y luego se sella.

Existen fases químicas, físicas y biológicas que se dan en el ensilaje que son:

a) Respiración, donde se da el consumo residual del oxígeno por parte de las células vegetales y los microorganismos, además de la acumulación CO₂ y el aumento de la temperatura.

b) proliferación de bacterias productoras ácidos acético e inicio de la acidificación: estas bacterias son componentes naturales de las plantas.

c) proliferación del ácido láctico: que se inicia partir del tercer día después de haberse sellado el ensilado (Vélez 1997).

- Herramienta de análisis empleada (Diagrama Causa-Efecto)

El Diagrama de Ishikawa, también llamado diagrama de causa-efecto, se trata de un diagrama que por su estructura ha venido a llamarse también: diagrama de espina de pez, que consiste en una representación gráfica sencilla en la que puede verse de manera relacional una especie de espina central, que es una línea en el plano horizontal, representando el problema a analizar, que se escribe a su derecha. Es una de las diversas herramientas surgidas a lo largo del siglo XX en ámbitos de la industria y posteriormente en el de los servicios, para facilitar el análisis de problemas y sus soluciones en esferas como lo son; calidad de los procesos, los productos y servicios. Fue concebido por el licenciado en química japonés Dr. Kaoru Ishikawa en el año 1943.

El problema analizado puede provenir de diversos ámbitos. A este eje horizontal van llegando líneas oblicuas -como las espinas de un pez- que representan las causas valoradas como tales por las personas participantes en el análisis del problema. A su vez, cada una de estas líneas que representa una posible causa, recibe otras líneas perpendiculares que representan las causas secundarias. Cada

grupo formado por una posible causa primaria y las causas secundarias que se le relacionan forman un grupo de causas con naturaleza común. Este tipo de herramienta permite un análisis participativo mediante grupos de mejora o grupos de análisis, que mediante técnicas como por ejemplo la lluvia de ideas, sesiones de creatividad, y otras, facilita un resultado óptimo en el entendimiento de las causas que originan un problema, con lo que puede ser posible la solución del mismo.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

Capítulo 2: Materiales y Métodos

En el siguiente capítulo se describen los procedimientos empleados para el tratamiento de la paja de caña, así como las técnicas analíticas (Materia orgánica y azúcares totales) y los equipos y reactivos empleados para el tratamiento de la paja de caña, para evaluar el aumento de la biodegradabilidad de la paja de caña, proveniente del centro de limpieza del CAI Azucarero Uruguay, con el uso de Microorganismos eficientes.

Procedimiento para realizar el diagrama Causa- Efecto

Para empezar, se decide la característica que se quiere examinar y continuar con los siguientes pasos:

“Uso de los residuales arroceros en la producción de biogás”

1. Dibujar un diagrama en blanco.
2. Escribir de forma concisa el problema.
3. Escribir las categorías que se consideren apropiadas al problema.
4. Realizar una lluvia de ideas (brainstorming) de posibles causas y relacionarlas con cada categoría.
5. Preguntarse ¿por qué? a cada causa, no más de dos o tres veces.
6. Empezar por enfocar las variaciones en las causas seleccionadas como fácil de implementar y de alto impacto.

2.1. Equipos y reactivos empleados para el tratamiento de la paja de caña.

Reactivos:

1. Ácido Dinitrosalicílico. “Panreac (PA-ACS) 99%”
2. Hidróxido de sodio. “Panreac (PA-ACS- ISO) 99,5%”
3. D-Glucosa. “UNI-Chem (AR)”
4. Tartrato de sodio y potasio. “Panreac (PA-ACS) 99%”

5. Ácido Sulfúrico “Panreac (PA-ACS) 98%”
6. Sulfato de Amonio y Hierro (II) hexahidratado “Panreac (PA-ACS) 99,5%”
7. Sulfato de Plata “Panreac (PA-ACS) 99%”
8. Bicromato de Potasio. “Panreac (PA-ACS- ISO) 99,5%”
9. 1,10 Orto Fenantrolina “Panreac (PA-ACS) 99%”

Equipos:

1. Balanza Analítica “Sartorius” BP221S” d ± 0.1 g, Alemana
2. Espectrofotómetro. “Rayleigh” VIS-723 G rango de trabajo 320 nm – 1100 nm, China
3. Centrifugadora “JANETZKI T32A” rango de trabajo 0 – 6500 rpm, 0 – 6,5 min. Alemana
4. Thermoreactor ECO-16. VELP® Científica. T máx. 160°C, 0 – 999 min. Alemana
5. Autoclave. DSX-280. rango de trabajo T máx. 150°C, t máx. 60 min. China
6. Horno mufla. Nabertherm P30. rango de trabajo T máx. 3000°C, Alemana.
7. Estufa. Binder. rango de trabajo T máx. 230°C Alemana.

2.2. Preparación de la Muestra de Paja de caña.

Las muestras de pajas de caña primeramente se sometieron a un tratamiento físico de reducción del tamaño. Se trituraron en molino de martillo y se tamizaron a 5 mm de largo. Posteriormente la paja de caña fue sometida a esterilización en autoclave, durante 20min a 120°C. Finalmente se guardó en un sobre de nylon cerrado herméticamente para que no se contaminara hasta su uso (Manual de Laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM, 2004).

- **Preparación de las disoluciones en la preparación de los M.E.**
Los microorganismos eficientes utilizados en esta investigación son preparados y comercializados por la empresa Labiofam en la provincia de Sancti Spíritus. Estos microorganismos eficientes están constituidos principalmente por hongos de fermentación y bacterias fototróficas, sin conocerse cual es la relación existente de ellos en el producto.

- Solución de ME al 5%, 10%, 15%, 20%: para la preparación de las soluciones anteriores se parte del M.E elaborado por la técnica anterior. Se tomaron 50g, 100g, 150g, y 200g, del M.E y se vertieron en frascos volumétricos de 1000mL enrazándolos con agua destilada, para obtener las concentraciones del 5% al 20% respectivamente.

2.3. Caracterización de los residuos cañeros como sustratos

El residuo agrícola cañero objeto de estudio: paja de caña, fue recolectada en marzo de 2013 y provenía del centro de limpieza del CAI Azucarero Uruguay de la provincia de Sancti Spíritus. Estos fueron transportados al Laboratorio de Biogás e Ingeniería Ambiental de la Universidad de Sancti Spíritus, donde se llevó a cabo todo el trabajo experimental, en bolsas de nylon para asegurar la conservación de las muestras. Se le realizó a toda la muestra una esterilización por autoclave que aseguró la ausencia de plagas peligrosas.

La caracterización físico-química de estos materiales consintió en el análisis de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijo (SF) o ceniza por el método gravimétrico de acuerdo a las normas establecidas por los métodos estandarizados (APHA, 1998). La determinación del pH se realizó con un pH-metro *Hanna Instruments* 209 de fabricación Rumana, y la conductividad con un conductividad-metro DDSJ-308A de fabricación China, previa preparación de la muestra por adición de agua, en una relación 20:1 y agitación de 15 min.

- Descripción del Pre-tratamiento biológico de la paja de caña

La experimentación fue realizada a escala de laboratorio en Erlenmeyer de borosilicato de capacidad 250mL, a temperatura ambiente. Las pruebas se realizaron por triplicado, donde en cada Erlenmeyer previamente esterilizados, se depositaron 5g de paja de caña previamente tamizadas y se añadió 40mL de las soluciones de M.E al 5%, 10%, 15% y 20%, para cada lote. Además se preparó un blanco de paja de caña con igual volumen de agua y otros blanco con el volumen de los M.E al 5%, 10%, 15% y 20% solos, para evaluar la degradación de estos por separados. Finalmente este pretratamiento fue encubado durante 24h, 48h,

72h y 120h, para determinar que dilución y que tiempo de incubación son los más idóneos para obtener la mayor liberación de compuestos biodegradables. El análisis de la liberación de compuestos biodegradables, se estudiará a través del chequeo de los azúcares presentes en la solución, partiendo de que las pajas son compuestos lignocelulósicos, que en medio ácido y con presencia de microorganismos, estos pueden liberar (hidrólisis) azúcares. Y también se estudiará a través del chequeo de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) soluble en la solución, como magnitud que caracteriza la presencia de compuestos degradables, no solamente azúcares.

- **Procedimiento para determinar los azúcares (método del ácido 3,5 Dinitrosalicílico)**

Transcurrido el tiempo de tratamiento se procede a separar la parte sólida de la líquida. De la parte líquida se tomó 1 mL y se añadió en un tubo de ensayo. Se adicionan en el tubo de ensayo 2 mL de la disolución reactivo de ácido 3,5 Dinitrosalicílico preparada anteriormente. Se prepara también un blanco usando 1 mL de agua destilada en lugar de la muestra y 2mL del reactivo de ácido 3,5 Dinitrosalicílico. Se introducen las muestras en el termoreactor seco por espacio de 10 minutos a 100°C. Una vez terminado el tiempo de reacción se traspasan los tubos digestados a un baño de agua fría durante 10 minutos y se agita para parar la reacción. Se diluyen las muestras y el blanco tomando 1ml de estas y adicionándole 4 ml de agua destilada en un nuevo tubo de ensayo. Se llena la cubeta de un centímetro de paso óptico y se introduce en el espectrofotómetro, primero el blanco y posteriormente, se procede a la medida de las muestras, a la longitud de onda de 540 nm, según se describe en la técnica de Miller (DANIEL, 2006).

- **Procedimiento para determinar la DQO (método del reflujo cerrado)**

Para el análisis de la DQO se empleó la técnica descrita en (APHA, 1998). La siguiente técnica se aplica según los pasos que se describe a continuación.

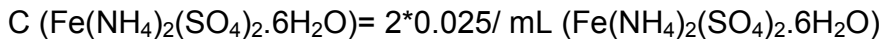
- Preparación de los viales con los reactivos para la digestión.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

Se lavaron los viales con ácido sulfúrico al 20 % y se enjuagaron perfectamente con agua desionizada, para prevenir contaminación. Se agregaron los reactivos de acuerdo a la siguiente tabla 3:

CANTIDADES DE REACTIVOS PARA VIALES		
Viales digestión	Solución de digestión (K ₂ Cr ₂ O ₇) mL	Reactivo ácido (Ag ⁺ +H ₂ SO ₄) mL
16 x 100 mm	1.5	3.5

Para la titulación del sulfato ferroso amoniacal empleamos la siguiente ecuación:



- para el cálculo de la DQO como mg O₂/L de la muestra empleamos la siguiente ecuación.

$$\text{DQO mg O}_2/\text{L} = \frac{(a - b)M \times 8000}{\text{ml de muestra}}$$

En donde:

DQO mg O₂/L = Demanda Química de Oxígeno Total.

a = mL de Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O usados para el testigo.

b = mL de Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O usados para la muestra.

M = Molaridad del Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O.

2.4. Descripción del ensayo para la determinación del potencial de biogás

La experimentación fue realizada a escala de laboratorio, en botellas serológicas de 585 mL, (pruebas en lote). Se inocularon las botellas con medio mínimo de crecimiento (K₂HPO₄ 0,50 g/L; KH₂PO₄ 0,33 g/L; NH₄Cl 0,20 g/L; MgCl₂·6H₂O 0,10 g/L; CaCl₂·2H₂O 0,15 g/L; NaCl 0,10 g/L; FeSO₄·6H₂O 0,01 g/L; Na₂S·9H₂O 0,02 g/L; NaHCO₃ 3,0 g/L; disolución de vitaminas 10 mL/L; disolución de micronutrientes 10 mL/L; Resazurina 1 mL/L; Cisteína 1 g/L y Na₂S como disolución reductora), trabajando en condiciones naturales. Con la paja pretratada

con ME al 20% durante 2 días, se evaluó su producción de biogás por digestión anaerobia a carga orgánica de 0.5gSTV/L. Se escogió esta condición por ser en la cual se obtuvieron mejores resultados en la DQO y azúcares liberados. Se trabajó por triplicado y se incubaron en condiciones mesofílicas (35 ± 2 °C) durante 28 días. El control utilizado fue: el inóculo sin paja, y la combinación inóculo-paja sin pretratar.

✓ **Técnicas analíticas.**

Se determinaron los sólidos totales total (STT), sólidos totales volátiles (STV) y sólidos totales fijos (STF), el pH, la alcalinidad total y el nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) según los métodos estándares del 2005, para dar seguimiento a cada experimento. También se determinó α como el cociente entre la alcalinidad parcial (debida a los carbonatos) y la alcalinidad total. Se cuantificó la concentración de ácidos grasos volátiles (AGVs) por cromatografía de gases (Cromatógrafo Focus ThermoScientific, con detector de ionización de llama FID, y columna Restek Stabilwax-DA, como gas acarreador, Hidrógeno).

✓ **Potencial de biogás.**

La producción de biogás se determinó cada 24 horas, por desplazamiento de una columna de líquido (NaCl, al 5%) con la consecuente medición de la presión y la temperatura ambiental para normalizar la medición de biogás según lo planteado por Nzila, 2010 y colaboradores. Posteriormente, para determinar el potencial de biogás se determinó el promedio de los máximos valores de rendimiento del biogás acumulado en cada botella (después de los 25 días de experimentación) definiendo así, un valor de potencial de biogás, de la paja pretratada y de esta sin tratar. Posteriormente, se investiga las cantidades de paja de caña producidas en dicha provincia para estimar, el potencial total de biogás de la provincia.

Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados

Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos del estudio del pretratamiento de la paja de caña, en la evaluación del aumento de su biodegradabilidad con el uso de microorganismos eficientes. Se interpreta el resultado obtenido al aplicar el método "Causa y Efecto", donde se identifican las principales causas que afectan e impiden el uso de los residuales agrícolas como materia prima en la obtención de energía por digestión anaerobia (D.A).

Diagrama causa-efecto

La paja de caña que queda en el centro de limpieza tiene muy bajo aprovechamiento como abono orgánico en la empresa, según se pudo conocer en el taller efectuado para establecer las causas y efectos del manejo actual y disposición de la paja de caña como abono en la Empresa Arrocera "Sur del Jibaro". La fig. 3.1 detalla las causas primarias y secundarias, así como sus efectos (en forma de diagrama de Ishikawa) que inciden en la disposición actual de la paja de caña.

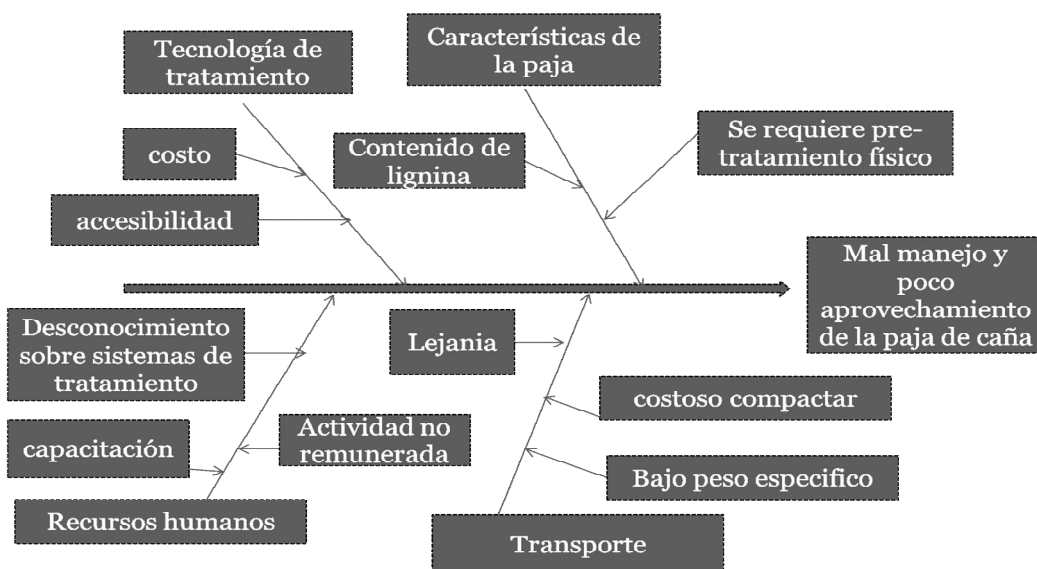


Fig. 3.1 Diagrama de causa-efecto sobre la disposición actual de la paja de caña como abono orgánico en un centro de limpieza la Empresa Azucarera "Uruguay".

3.1. Caracterización de la paja de caña como sustrato

En la tabla 1 se ilustran los parámetros químicos analizados a la paja de caña (RAC). Como se puede apreciar este material presenta un alto contenido de sólidos totales al igual que los sólidos volátiles y una pequeña fracción de minerales (cenizas). Al analizar estos parámetros se considera que potencialmente se puede producir biogás.

Tabla 4: Caracterización de la Paja de caña

Parámetros	Paja de
pH	7,24
ST (%)	90,72
SV (%ST)	87,40
Cenizas	8,2

Resultados del ensayo para la biodegradabilidad de la paja de caña con M.E

Determinación de los azúcares.

En la tabla 5 se ilustran los valores de azúcares liberados, ya restado previamente los valores aportado por los que contenía la propia paja y los presentes en los ME. Donde se observa, que la mayor liberación de azúcares ocurrió en el segundo día de forma general. Y dentro de este día el tratamiento que mejor efecto logró fue el del 15%, equivalente casi al triple del de 5% y la mitad del de 10% superior, además solo fue superior al 20% en unas pocas unidades.

En el siguiente figura 3 se aprecia los datos antes descritos. En él se puede observar como hasta el 5% de ME al segundo día provocó una mayor liberación de azúcares que el 20% de los días posteriores. Además se parecía de una forma ascendente desde el primer día hasta el segundo, la liberación de los azúcares que comenzó a decaer el tercer día, y para el 5to día ya existía muy poco. Este resultado es debido en parte a que los ME primeramente se encargaron de liberar estructuras de azúcares presentes ya que las bacterias fototróficas son las encargadas de esta función y a la vez son el soporte de otros microorganismos presentes. Pero pasado el tiempo requerido para la liberación de los azúcares por

Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados

las bacterias fototróficas comienzan a actuar las bacterias ácido lácticas y levaduras de fermentación, que a partir de los azúcares liberados, producen ácidos y otros productos de fermentación. De ahí que pasado cierto tiempo (2 días) la curva de producción de azúcares cambie, de aumentar a disminuir. Y que contrarios a la primera etapa, donde existía una mayor liberación de azúcares en donde se encontraban mayor concentración de microorganismos, en la segunda etapa es donde menos azúcares va a existir, ya que estos al estar más concentrados en microorganismos van a consumir más rápido los azúcares.

Tabla 5: Resultados de la determinación de azúcares

Muestra	1ER DÍA	2DO DÍA	3ER DÍA	5TO DÍA
	g/L azúcar	g/L azúcar	g/L azúcar	g/L azúcar
5%	0,692	0,542	0,249	0,293
10%	0,614	0,982	0,293	0,267
15%	0,301	1,522	0,331	0,354
20%	0,282	1,344	0,479	0,248

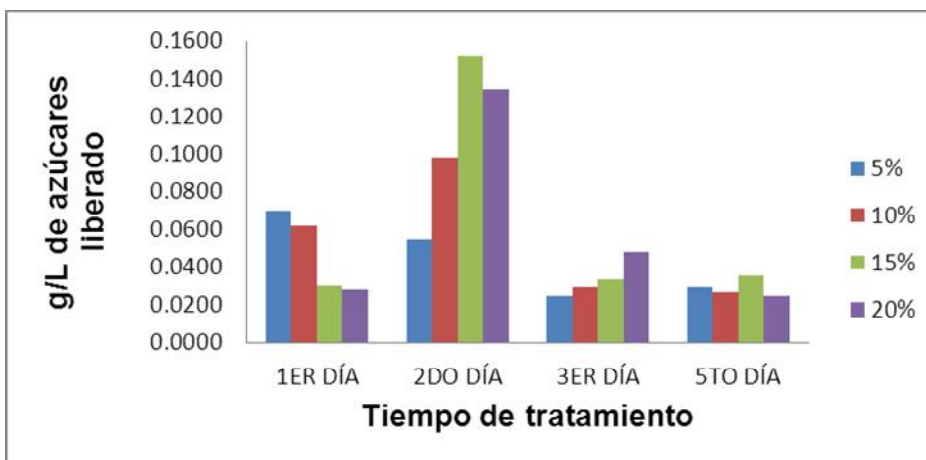


Figura 3: Gráfico de los g/L de azúcares extraídos

Determinación de la DQO.

En la tabla 6, se ilustran los valores de liberación de materia orgánica ya restado los valores aportado por la propia paja y los ME. Donde se observa, que la mayor liberación de materia orgánica en la solución concuerda con los resultados obtenidos con la liberación de azúcares presentes, siendo la mayor liberación al segundo día y la dilución del 20% la que más extrajo. Existen dos momentos, uno

Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados

inicial en los 2 primeros días de aumento de la materia liberada y posteriormente un descenso de la materia presente. Este fenómeno se explica por las mismas razones que la liberación de los azúcares. Donde en los dos primeros días los microorganismos (bacterias fototróficas) comienzan a liberar sustancias biodegradables, que posteriormente consumirán (Bacterias ácido lácticas, hongos de fermentación y levaduras), si se les brinda el tiempo de contacto suficiente con la misma. Si aprovecháramos esa capacidad de liberación de sustancias biodegradables que se logra en ese corto tiempo de 2 días, para posteriormente introducir la paja pretratada en un digestor anaerobio, estaríamos aumentando la disponibilidad de materias convertible en biogás y se aumentaría la producción del mismo, o sea aprovecharía mejor el potencial de la paja de caña.

Tabla 6: Datos de la DQO.

Muestra	DQO mgO ₂ /L			
	1ER DÍA	2DO DÍA	3ER DÍA	5TO DÍA
5%	2689,02	6133,57	759,49	589,62
10%	3010,61	5374,07	2025,32	346,26
15%	3434,83	5854,21	759,49	390,36
20%	3486,14	7301,62	1012,66	405,06

En el gráfico de la figura 4 se visualizan los datos de la tabla 6. Como se aprecia, el primer día hubo una liberación correspondiente a la concentración de ME empleado, desde 5% hasta 20% en forma ascendente, el día 2 mostró resultados similar, aunque la DQO del 5% fue superior a 10% y 15%, pero se mantuvo la muestra pretratada con 20% de ME como la que más DQO consumió. Se ha de observar que el pretratamiento el segunda día para todas las concentraciones fue superior a los resultados del primer día inclusive para su concentración más alta, 20%. Pero si fueron los resultados del primer día y del segundo superiores a los del 3er día y del 5to día, como se explicó anteriormente.

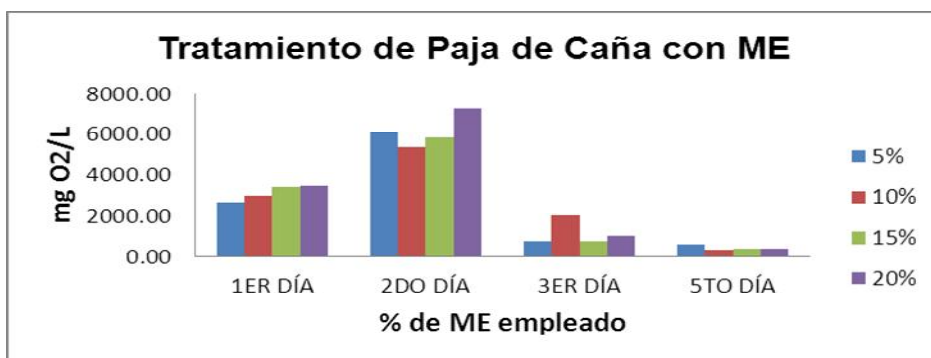


Figura 4: Gráfico de la DQO

Resultados de la producción de biogás.

Los resultados mostraron que la producción total de biogás de la digestión de la paja de caña residual pretratada, fue superior a la digestión anaerobia de la paja de caña sin pretratar. (Observar el gráfico de potencial, figura 6). Los resultados mostrados por la paja de caña sin pretratar coinciden con lo reportado en la literatura (Dinuccio, 2010; Nzila, 2010) utilizando como inóculo lodo anaerobio de estiércol vacuno.

Los demás parámetros evaluados al final de los experimentos: pH, alcalinidad, relación de alcalinidades y sólidos totales, sólidos volátiles, nitrógeno amoniacal, fueron similares, (tabla 7).

Tabla 7: Datos al final de la experimentación.

muestras	gST/ L	gSTV/ L	gSTF/ L	pH	ALC (mgCaCO ₃ /l)	g NH ₄ ⁺ N/kg muestra	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)	biogás (m ³ /tonSV)
Paja caña	9,04	5,3 (58%)	3,74	7,2	3000	0,21	2,95	6,0	0,5	397,5
Paja ME- caña	11,1	7,02 (63%)	4,11	7,0	2400	0,28	5,83	14	0,5	1334,0

A continuación se muestran en la tabla 8 la composición química del biofertilizante obtenido de la paja de caña por compostaje según Fernanda (2011), en el cual podemos comparar nuestros resultados con los obtenidos por compostaje de la paja de caña con fines agronómicos. En la figura 5 se ilustra la comparación de la composición química del digestato de la paja de caña con y sin pretratamiento, y se analiza composición citada por Fernanda (2011). Aunque en la literatura existe

Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados

muy pocos trabajos en los que se haya empleado la paja de caña para compostaje, generalmente se emplea para esta práctica la cachaza y el bagazo, solamente dejando la paja de caña para la termo-conversión en los turbogeneradores de los centrales.

Tabla 8: Composición química del biofertilizante obtenido de la paja de caña por compostaje (Fernanda, 2011).

Compostaje	materia orgánica	g NH ₄ ⁺ N/kg muestra	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)	pH
Paja de caña	38,1%	0,12 g	0,62	7,4	5,6	7,3

Estos resultados demuestran que efectivamente la paja de caña degradada por vía anaerobia con previo pretratamiento biológico puede generar un biofertilizante de alta calidad agronómica, aporta mayor cantidad de nutrientes.

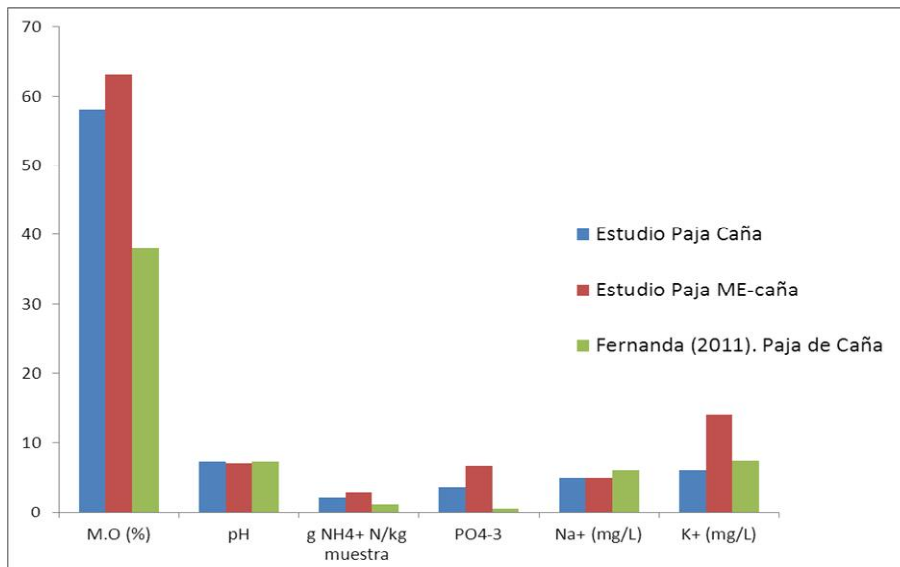


Figure 5: Composición química del digestato de la paja de caña con y sin pretratamiento, comparado con la cita bibliográfica Fernanda (2011),

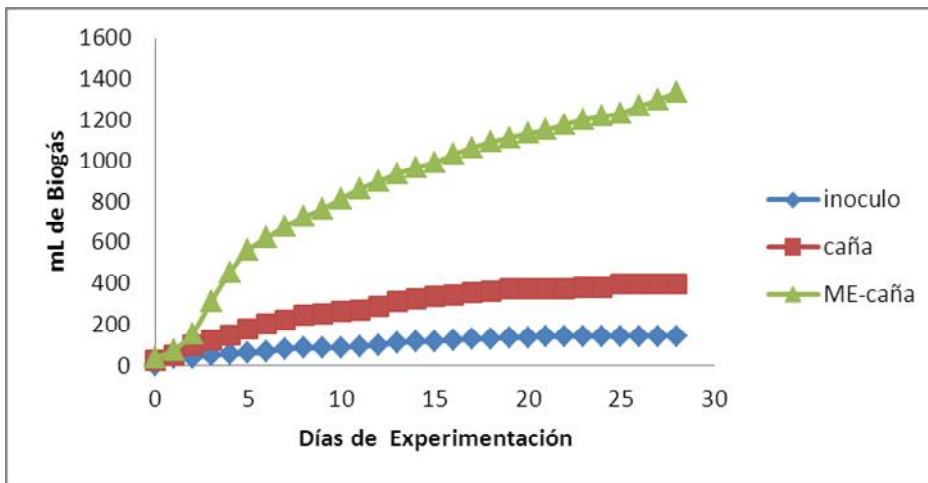


Figura 6: Gráfico del potencial de biogás

3.4. Aprovechamiento energético de los residuos. Estimación de la energía eléctrica y calorífica que puede generarse.

Los máximos valores de producción total de biogás (Fig. 6) obtenidos después de los 21 días de experimentación fueron utilizados para determinar el potencial real de estos residuos teniendo en cuenta su producción y disponibilidad en toneladas por año en la provincia de Sancti Spíritus. La tabla 10, muestra los valores del potencial total de biogás en m^3 basado en la producción total de residuo y su rendimiento de biogás obtenido en este estudio, cuyos valores resultan alentadores para fines energéticos si se considera que el poder calorífico de este oscila entre 22,5 y 25 MJ/ m^3 (Dinuccio, 2010) y que un 30 % de este produce energía eléctrica y 45 % produce energía térmica (Nzila, 2010). Los valores del rendimiento de biogás respecto a las toneladas de residuos utilizado, son comparablemente superiores con los reportados en la literatura por Nzila y colaboradores, donde reportan valores de rendimiento de biogás para el bagazo de caña de 177 m^3 /ton SV (Nzila, 2010).

A continuación se muestra la tabla 6 donde muestra los resultados obtenidos en cuanto a poder calorífico y energético si se usa el biogás proveniente de la digestión anaerobia tanto de la paja de caña sin pretratar como de la paja de caña pretratada. Los valores de energía y dinero ahorrado por concepto de compra de

Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados

petróleo son superiores a los obtenidos con el uso de la paja sin pretratar. Los datos obtenidos son en base a la cantidad de paja generada en los centros de limpieza de la campaña 2012-2013, los cuales fueron 16 587,0 (t/año)

Tabla 10: Datos de los ácidos presentes al final de la experimentación.

Residuos	Producción total biogás (m ³ /año)	GWh de electricidad ad/año	GWh de calor/año	toneladas de Petróleo equivalentes (PeT)	Barril de petróleo día-año	petróleo ahorrado/día (\$) (€)	gasto de petróleo ahorrado al año (\$) (€)
caña	5,18E+06	15,44	23,21	1327,4	27,54	\$2.478,53	\$904.662,58
ME - paja caña	1,92E+07	57,22	86,03	4920,3	102,08	\$9.187,37	\$3.353.389,52

En la zafra de la contienda pasada del central “Uruguay” en el cual se obtuvieron valores ligeramente superiores a 90 mil toneladas (t) de azúcar, en la que fue necesario cortar 990 millones de toneladas de caña, la cual generó 207, 9 millones de toneladas de paja de caña (RAC). De las cuales el 75% aproximadamente de los RAC (155.9 mil toneladas) quedan distribuidos en el campo como cobertura del terreno para evitar la proliferación de malas hierbas, mantener la humedad del terreno, evitar la corrosión y mantener la flora microbiológica, con afectaciones mínimas en las labores de cultivo, ya que tienen tamaño de partículas entre 200-400 mm. Este por de la paja de caña en el campo aumentó con respecto a las cifras reportadas de años anteriores debido a la modernización de las máquinas de corte y a que la mayor parte de la caña fue cortada mecanizada, no manual, igual sufrieron cambios en el volumen que queda en los centros de limpieza y los que van al central, siendo estos de 25% y 5% respectivamente.

El 5% de los RAC (10,4 mil toneladas) es transportado hasta la industria junto con la caña, formando parte posteriormente de la masa de bagazo a la salida del tándem de molinos, la que es utilizada generalmente como combustible en la generación de energía.

Capítulo 3: Análisis y Discusión de los resultados

Mientras que 25% de los RAC (41,58 mil toneladas) se separan y concentran en las instalaciones de limpieza ubicadas en puntos intermedios entre el campo y la industria, (Aguilar, 2014).

Conclusiones

1. El diagnóstico inicial mostró la inadecuada disposición actual del residuo paja de caña colectada en el centro de limpieza de la Empresa Agroindustrial Azucarera Uruguay, dada por la falta de gestión en los sistemas de tratamiento disponibles, las características de la paja, que dificultan su biodegradación.
2. Se obtuvo un potencial de biogás (397 m³/t SV para la paja de caña sin pretratar y 1334 m³/t SV de paja de caña pre-tratada con ME). El análisis económico de este potencial demostró la factibilidad del uso de esta biomasa como fuente de energía renovable.
3. La caracterización del lodo residual de la digestión anaerobia de la paja de caña mostró la presencia de macro y micronutrientes (C, N, P, K) que permiten catalogarlo como un fertilizante orgánico de calidad, comparados con el compostaje citado en la literatura. Esto resulta importante si se considera su uso como biofertilizante en el cultivo de la propia caña de azúcar.

Recomendaciones

Recomendaciones

1. Continuar investigando la aplicación del pretratamiento biológico a la paja de caña para optimizar su potencial de biogás y aumentar calidad del biofertilizante.
2. Realizar un balance de masa al potencial de biogás, para conocer hasta donde influyen los microorganismos eficientes en el incremento de la producción de biogás

Bibliografía

Bibliografía

1. Aguilar, A. Hernández, B. Oliva, D. (2007), Solución medioambiental sustentable en la cosecha de la caña. Informe final Proyecto de investigación. MINAZ, ICINAZ. 5 pag.
2. Aguilar, A. y J. Arango. (2014) «Especialista termoenergético del grupo provincial Azcuba, Sancti Spíritus». Informe final Cumplimiento de la Campaña. MINAZ, ICINAZ.
3. Aguilar, P. (2001) «Potencialidad energética de los residuos agrícolas de caña. Parte I Disponibilidad durante la cosecha», en Revista Cuba-Azúcar, No. 1. v. XXX.
4. ANUAR, A. y SHAHBUDDIN, M. (eds.) (1994) Effective microorganisms and their role in kyusei nature farming and sustainable agriculture. Proceedings of the 2nd Conference on Effective Microorganisms (EM). Saraburi (TH), November 1993. Atami (JP): INFRC, p. 1 – 6.
5. APHA, AWWA, WEF. (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20 th edition.
6. Benitez S. & Gonzales L. (2003). Aceleración del proceso de compostaje utilizando Azotobacter, Azospirillum, Lactobacillus, Saccharomyces y Trichoderma harianum. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Microbiología.
7. Biogas technology: an information package. 1ªed. Bombay (IN) : Tata Energy Research Institute, 2005. 189 p.
8. Campos, P. A. E. (2001). Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo, mediante co-digestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. Lérida, España. Copyright deposit: L-1212-2006. ISBN: 8469008463,
9. Carrillo, L. 2003. Microbiología Agrícola. Capítulo 5 Abonos nitrogenados. Investigación y Ciencia 252: 64–70.
10. Chaviano Hernández, M. (2011). Valorar la eficiencia de la planta de Biogás en la UEB Complejo Guayos. Trabajo de Diploma. Ingeniero Industrial. Departamento de Ingeniería. Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, 65 p.
11. Chaviano Hernández, M. (2011). Valorar la eficiencia de la planta de Biogás en la UEB Complejo Guayos. Trabajo de Diploma. Ingeniero Industrial.

Bibliografía

Departamento de Ingeniería. Universidad de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, 65 p.

12. Chefetz, B., Hatcher, P.G., Hadar, Y., Chen, Y. (1996). Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 25, 776–785.

13. CHINEN, N. y HIGA, T. (1998). EM treatments of odor, waste water and environmental problems. Okinawa (JP) : University of Ryukyus. College of Agriculture,

14. Dinuccio E., et al. (2010). Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology* 101, 3780–3783.

15. Eweis J., Ergas J., Chag D & Schoroeder E. (1999). Principios de biorrecuperación. España. Mac Graw Hill.

16. Fernanda, A. Contreras, V. Chamorro, R. Arzola, N. (2011), PROYECTO, EXPERIENCIAS DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES EN EL INGENIO ECUDOS S.A, citado en http://www.aeta.org.ec/2do%20congreso%20cana/art_campo/Alcivar,%20M%20et%20al%20Experiencias%20en%20compostaje.pdf, consultado el 27 de mayo de 2014.

17. García Valdivia, V. (2011), Ponderación de indicadores de sostenibilidad como apoyo a la selección de alternativas de producción de biogás con fines energéticos en Sancti Spíritus. Trabajo de Diploma. Ingeniero Industrial. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS “JOSÉ MARTÍ PÉRZ”, 57 p.

18. García, J. (1979). Ensilado de Forrajes. 6ta Edición. Ministerio de la Agricultura. Madrid, España. Publicaciones de Extensión Agraria. 47 p. (Serie técnica # 1)

19. Gómez, M. (1990). Cambios en las características fermentativas y digestibilidad IVMS del ensilaje de morera (*Morus alba*) y pejibaye (*Bactris gasipaes*) H.B.K. Tesis Ing. Agr. Zootecnista. UCR. San José. Costa Rica, 113 p.

20. Grijalva Vallejos, Nubia. (2013). Vegetal waste degradation by microbial strains inoculation. Enfoque UTE, V.4-N.1, Jun.2013: pp.1-13

21. Higa, T.; Parr, J. 1994. Beneficial and Effective Microorganisms for a Sustainable Agricultural and Environment. INFRC (International Nature Farming Research Center). Atami, JP. 63 p.

Bibliografía

22. Huang D., Zeng G., Feng C., Hu S., Zhao M., Lai C., Zhang Y., Jiang X., Liu H. (2010). Mycelial growth and solid-state fermentation of lignocellulosic waste by white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* under lead stress. *Chemosphere* 81: 1091 – 1097.
23. Intriago Flor, F. G; Paz Mejía, S. A. (2000) Ensilaje de cascara de plátano maduro con microorganismos eficaces como alternativa de suplemento para ganado bovino. Tesis de grado de Ingeniero Agrónomo. Universidad Earth. Costa Rica, 63p.
24. Lal, R. 2000. Soil Management in the Developing Countries. *Soil Science*. Vol. 165 No. 1: 57 – 72.
25. Lee C., Darah I., Ibrahim C. (2010). Production and Optimization of cellulase enzyme using *Aspergillus niger* USM AI 1 and comparison with *Trichoderma reesei* via solid state fermentation system. *Biotechnology Research International*.
26. Linares Morel O., Meneses Gómez C. (2011). Comunicación personal con el Director y subdirector de Industria: Complejo Agroindustrial Arrocerero CAI “Sur del Jíbaro”. Sancti Spíritus, Diciembre 2011.
27. López González, L. M; Romero Romero, O. (2006). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. Publicado en Revista Futuros No. 16, Vol. IV.P.1-2
28. López_Dávila. E, et al. (2013) Potencial de Biogás de la Fermentación Anaerobia de Residuos Sólidos de la Agroindustria Azucarera, utilizando Lodo Anaerobio de Estiércol Porcino. *Revista Centro Azúcar*, Vol. 40, Enero-Marzo, 2013. 7 p.
29. López-Dávila E., et al. (2012). Aplicación de la tecnología de digestión anaerobia para tratar residuos sólidos agroindustriales utilizando inóculo de estiércol porcino, en condiciones mesofílicas. *Tecnología Química*. Vol 32, No.3, 323-32, sept.-dic,
30. Lugo, S. y Gitscher, H. (2005) Evaluación de los proyectos de compostaje en el Ecuador. Fundación Natura – Repamar – Cepis-GTZ. Quito.

Bibliografía

31. MANDUJANO, M. et al. Biogás: energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos, manual para el promotor de la tecnología. México (MX) : OL ADE, 1981. 41 p. Serie Publicaciones Especiales, no. 6.
32. Miguel A. Pérez Méndez, Rufo Sánchez Hernández, David J. Palma López y Sergio Salgado García (2011), CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL COMPOSTAJE DE RESIDUOS DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL SURESTE DE MÉXICO. INTERCIENCIA. JAN 2011, VOL. 36 N° 1
33. Montalvo, S.J. y Guerrero, L. (2003). "Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás". Editado por la Universidad Técnica Federico de Santa María (Valparaíso, Chile). 2003.
34. Nzila Charles, et al. (2010). Biowaste energy potential in Kenya. Renewable Energy 35, 2698-2704.).
35. OLADE –IICA -FAO, 2010. ENERGIA RENOVABLE, BIOCMBUSTIBLES Y CAÑA DE AZÚCAR EN CUBA, V Seminario Latinoamericano y Caribeño de Biocombustibles, Santiago de Chile, 17-18 de agosto de 2010
36. Palmero Bravo A. M (2006). Valoración medioambiental del uso de los residuos orgánicos de la provincia Sancti Spíritus para producir biogás con fines energéticos. Trabajo de Diploma. Ingeniero Industrial. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA. CENTRO UNIVERSITARIO DE SANCTI SPÍRITUS "JOSÉ MARTÍ PÉREZ, 76 p.
37. Pérez, E. y P. Aguilar. (2002) «Estado del arte del uso energético de los RAC», en Memorias del II Congreso Internacional de Biomasa en Holanda.
38. PÉREZ, ESPERANZA. (1997). Estudio teórico experimental de la fluidodinámica del proceso de gasificación en lecho fluidizado de bagazo de caña. Técnicas de energía renovable. Tesis de Maestría. Universidad Internacional de Andalucía. Sede iberoamericana La Rábida. Santa Clara, Cuba,.
39. Pichs Madruga R. (2008). "Cambio climático. Globalización y subdesarrollo. Editorial Científico-Técnica, La Habana 2008.
40. Preston. T. R. (2005) Los biodigestores en los sistemas agrícolas ecológicos. LEISA Revista de Agroecología. junio 2005. Volumen 21, número 1.
41. Restrepo Rivera, J. 1994. Sol, Termodinámica y Agricultura. San José, Costa Rica. 13 pp.


Bibliografía

42. Torres, J. (2007) «La biomasa cañera y el tránsito en Cuba hacia una energía sostenible».
43. US-EPA. Methods for calculating efficiency. 2nd [cited 2008 23 December]; available from: www.epa.gov/chp; 2008 July.
44. Valentina Savran, 2010. Evaluación del potencial tecnológico de la biomasa no cañera al balance energético nacional. Informe técnico de biomasa Agosto 2010
45. Vargas-García M.C., Suárez-Estrella F., López M.J., Moreno J.. (2009). Effect of inoculation in composting processes: Modifications in lignocellulosic fraction. *Waste Management* 27. 1099–1107.
46. Vélez, M. (1997); Producción de Ganado Lechero en el Trópico 2a edición. Zamorano Academic Press. Zamorano Honduras. 189 p.
47. VILLEGAS, PEDRO J. (2005) Aprovechamiento de residuos fibrosos de la industria azucarera mediante procesos de conversión térmica. Tesis de doctorado. Santa Clara: Universidad Central de Las Villas.

Anexos

Anexos

Anexo # 1 Principales cultivos de la provincia Sancti Spiritus

		AGRICULTURA, GANADERÍA, SILVICULTURA Y PESCA					
		AGRICULTURE, LIVESTOCK, FORESTRY AND FISHING					
9.9 - Producción agrícola por cultivos seleccionados de la agricultura no cañera							
<i>Production of selected crops other than sugarcane</i>							
						Toneladas	
CULTIVO	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Viandas ^(a)	2.202.000	2.369.500	2.150.700	2.236.000	2.250.000	2.280.000	
Tubérculos y raíces	1.330.200	1.378.600	1.392.500	1.565.600	1.515.000	1.445.000	
De ello: Papa	286.200	143.700	196.100	278.600	191.500	165.600	
Boniato	303.000	414.000	375.000	437.100	384.743	311.900	
Malanga	175.000	207.800	240.000	199.400	137.400	132.100	
Plátano	871.800	990.900	758.200	670.400	735.000	835.000	
Fruta	339.517	385.900	280.800	245.400	249.200	250.000	
Vianda	532.283	605.000	477.400	425.000	485.800	585.000	
Hortalizas	2.672.100	2.603.000	2.439.300	2.548.800	2.141.035	2.200.000	
De ello: Tomate	636.000	627.900	575.900	750.000	517.040	601.000	
Cebolla	111.990	105.100	128.100	131.300	111.737	143.500	
Pimiento	62.141	55.807	63.677	56.672	44.545	55.057	
Cereales	739.600	808.400	761.700	868.400	778.863	920.400	
Arroz cáscara húmedo	434.200	439.600	436.000	563.600	454.400	566.400	
Maíz	305.400	368.800	325.700	304.800	324.463	354.000	
Leguminosas	70.600	97.200	97.200	110.800	80.439	133.000	
Frijoles	70.600	97.200	97.200	110.800	80.439	133.000	
Tabaco	29.700	25.600	21.500	25.200	20.500	19.900	
Cítricos	373.000	469.000	391.800	418.000	345.000	264.500	
De ello: Naranja dulce	178.357	302.800	200.400	261.000	178.263	122.900	
Toronja	169.556	140.000	166.100	121.500	137.660	112.000	
Limón	6.134	6.000	5.400	8.300	6.060	6.600	

Anexos

Otras frutas	746.500	783.800	738.500	748.000	762.045	817.000
De ello: Mango	206.662	198.000	228.700	269.300	203.595	185.000
Guayaba	101.547	113.500	126.500	84.900	71.581	85.000
Fruta bomba	90.309	89.700	89.400	95.700	135.707	135.000
Cacao	2.120	1.379	1.100	1.387	1.709	1.510

^(a) Incluye Tubérculos y raíces y Plátanos.

Anexo # 2. Residuos y residuales que han sido utilizados para la alimentación animal en Cuba.

<i>Origen</i>	<i>Residuo</i>
Caña de azúcar	Caña de demolición
“	Residuos de cosecha
“	Melazas
“	Bagazo
“	Bagacillo
“	Cachaza
Destilerías	Mostos
“	Fondajes
Arroz	Paja
“	Cabecilla
“	Polvo
Cítricos	Hollejos
“	Residuos de poda
Café	Pulpa
Molinería	Afrecho
“	Salvado
Mataderos	Sangre
“	Contenido ruminal
Industria pecuaria	Pastas proteicas
“	Excretas
Pesca	Descartes
“	Fauna acompañante
“	Residuos del procesamiento
Industria alimentaria	Residuos de cervecería
“	Barquillos
Casas, comedores y restaurantes	Restos de alimentación humana
Agricultura	Residuos de raíces y tubérculos
“	Residuos de hortalizas

Anexo #2. Alimentos producidos a partir de residuos agrícolas.

Anexos

<i>Cultivo</i>	<i>Alimento</i>	<i>Destino</i>
Arroz	Cabecilla	Todas
“	Polvo	Todas
“	Paja	Rumiantes
Cítricos	Hollejos frescos	Rumiantes y porcinos
“	Harina	Rumiantes
“	Hollejos ensilados	Rumiantes y porcinos
“	CITROUREA	Rumiantes
“	Residuos de poda	Ovinos
Café	Pulpa fresca	Rumiantes
“	Pulpa ensilada	Rumiantes
Raíces y tubérculos	Frescos	Porcino y conejos
“	Cocinados	Porcinos
Hortalizas	Frescas	Rumiantes y conejos

Anexo # 3. Composición de la paja de trigo, paja de caña y pulpa de café (mg/100g de sustrato seco).

Composición	Paja de Trigo*	Paja de Arroz **	Pulpa de Café **
Proteína	7,9	9,0	10,2
Carbono	52,5	N/D	N/D
C/N	41,0	N/D	N/D
Lignina	8,6	5,7	21,0
Celulosa	35,2	33,9	36,4
Hemicelulosa	N/D	26,8	5,1

* Gaitán-Hernández y Mata 2004

** Vega y col., 2005

N/D: datos no disponibles

Anexo # 4. Paja de cereales. A: paja de trigo, B: paja de caña.

