

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA BIOPRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE LOS RESIDUOS DEL PROCESO DE BENEFICIO DEL FIQUE

P. BARRERA , X. SALAS , L. CASTRO , C. ORTIZ* , H. ESCALANTE**

*Grupo de Investigación en Bioquímica e Ingeniería de Proteínas ortízc@uis.edu.co

**Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA)
Sede UIS Guatimar, Km. 2 vía el Refugio. Piedecuesta-Colombia. biohidro@uis.edu.co

Fecha Recepción: 4 de Febrero de 2009

Fecha Aceptación: 19 de Marzo de 2009

RESUMEN

Los desechos generados durante el beneficio del fique, ocasionan un problema ambiental, debido a que son descartados directamente al medio ambiente. En este trabajo se estudió la digestión anaerobia como una alternativa para el tratamiento de estos desechos llamados bagazo, los cuales se caracterizaron fisicoquímicamente; dentro de los parámetros evaluados están: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos volátiles (SSV), ácidos grasos volátiles (AGV) y análisis bromatológico. Para la cuantificación de la producción de metano se empleó un analizador de gases Bacharach. Del estudio se concluyó que el bagazo del fique es un excelente sustrato para los microorganismos productores de biogás, debido a su alta concentración de carbono necesario para el crecimiento bacteriano, lo cual se demuestra en la composición de biogás obtenido con un 25,2% de CH₄, 14,5% CO₂ y 1,7% O₂, indicando que hubo crecimiento de suficientes poblaciones metanogénicas en el reactor anaerobio.

Palabras claves: Bagazo de Fique, Digestión Anaerobia, Fermentación, Actividad Metanogénica Específica, Biogás.

ABSTRACT

The waste generated during the benefit of the sisal, cause an environmental problem, due to the fact that they are rejected directly to the environment. In this work the anaerobic digestion is studied as an alternative for the treatment of this waste called bagasse, which was characterized physico-chemically, The parameters evaluated were: chemical oxygen demand (COD), Solid Suspended Volatile (SSV), Volatile fatty acid (VFA) and Bromatological Analysis. The methane quantification was made using an gas analyzer (Bacharach). The results of this study let concluded that the bagasse of the sisal is an excellent substratum for the producer microorganisms of biogas, due to his high concentration of carbon necessary for the bacterial growth, which is demonstrated in the composition of biogas obtained with 25,2% of CH₄, 14,5% CO₂ and 1,7% O₂, indicating that there was growth of sufficient methanogenic population in the anaerobic reactor.

Keywords: Sisal Bagasse, Anaerobic Digestion, Fermentation, Specific Methanogenic Activity, Biogas

INTRODUCCIÓN

La planta de fique (Género *Furcraea* sp.) pertenece a la familia *Agavaceae*, es tropical y crece en la mayoría de climas del país. La fibra del fique se utiliza industrialmente para elaborar hamacas, redes, empaques, artesanías, sogas, cordeles, agromantos y geotextiles [1].

El departamento de Santander es el segundo productor de fique a nivel nacional [2], con una área cultivada de 4.446 ha y una productividad de 1060 kg/ha al año [3]. El beneficio del fique se realiza en tres (3) fases: a) *las hojas* se cortan y se desorillan para eliminar las espinas; b) *Se extrae la fibra*, la cual constituye el 3 al 5% del peso de la hoja, c) *Procesamiento de la fibra*: contempla las etapas de

fermentación, lavado, secado y empaquetamiento para comercialización [4]. Cada kilo de fique extraído produce aproximadamente 8 litros de jugo. En el Departamento de Santander se genera aproximadamente 3,33 kg de biomasa residual al mes [5]. La pulpa del desfibrado está conformada por un 30% de fibrillas y un 70% de pulpa vegetal. Los residuos están constituidos por jugos y bagazo. El bagazo contiene celulosa, compuestos orgánicos, sacarosa, glucosa y fructuosa [1], los cuales se convierten en excelente sustrato para microorganismos productores de biogás. En el proceso productivo, el bagazo y el jugo son descartados directamente al medio, o en algunos casos los agricultores los utilizan como abono. Sin embargo, su acumulación sobre el suelo los convierte en contaminantes del medio ambiente y de las corrientes de agua por lixiviación.

En Colombia el lavado de la cabuya del fique después del desfibrado, se efectúa en las quebradas utilizando 4 kilogramos de agua por kilogramo de fique en un período de 30 minutos; al colocar el fique en la corriente de agua desprende un tinte verde con espuma y un fuerte olor a celulosa [6].

En los países en desarrollo los residuos orgánicos se producen en grandes cantidades, y mediante digestión anaeróbica se produce biogás para abastecer parte de la demanda energética [7]. El jugo y el bagazo residual del beneficio del fique pueden ser utilizados en la producción de principios activos farmacéuticos, agentes tensoactivos, bioinsecticidas, papel y producción de Biogás [8,9]. La producción de biogás en Tanzania, es importante para la co-digestión anaerobia de

pulpa de fique y desechos de pescado con un rendimiento de 60-65% [10].

Los pre-tratamientos aeróbio-mesofílicos y la reducción del tamaño de partícula del bagazo de fique, aumentan el rendimiento del proceso anaerobio de producción de biogás en un 26% [7,11]. En la digestión anaerobia el pH y la alcalinidad constituyen dos parámetros decisivos en la viabilidad de la degradación microbiológica, para establecer y mantener el balance en las reacciones enzimáticas y bioquímicas [12]. En Colombia la fibra de fique se ha utilizado para la obtención de hormonas sintéticas y anticonceptivos [13].

En la digestión anaerobia intervienen diferentes grupos bacterianos que trabajan en simbiosis. a) *en la hidrólisis*: bacterias celulolíticas desdoblan enzimáticamente los polímeros orgánicos, b) *en la acidogénesis*: los monómeros son fermentados para generar acetatos, propionatos, butiratos, dióxido de carbono e hidrógeno; c) las bacterias acetogénicas producen ácido acético junto con dióxido de carbono e hidrógeno; d) finalmente las bacterias anaerobias actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores y los transforman en metano. Las bacterias metanogénicas denominadas *arqueobacterias* son anaerobias estrictas, no crecen a concentraciones de oxígeno mayores de 1 ppm y pierden viabilidad cuando se les expone a concentraciones de 10ppm; el uso de los sustratos es muy restringido, pues la mayoría solo puede usar como fuente de energía la reducción del CO₂ con H₂ [5]. Las principales reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en el proceso de digestión anaerobia se presentan en la Tabla 1 [14].

Tabla 1. Principales reacciones químicas que ocurren en la digestión anaerobia de la materia orgánica.

REACCIÓN	ECUACIÓN	ΔG°
Fermentación de Glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$	-207
Fermentación de la Glucosa a Butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 3\text{H}^+ + 2\text{H}_2$	-135
Fermentación del Butirato a Acetato e H ₂	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$	+48,2
Fermentación del Propionato a Acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$	+76.2
Acetogénesis a partir del H ₂ y CO ₂	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$	-105
Metanogénesis a partir del CO ₂ y H ₂	$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$	-136
Metanogénesis a partir del Acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	-31

ΔG°: kJ/mol Condiciones estándar: solutos 1 molar, gases 1 atmósfera.

El producto de la digestión anaerobia es biogás compuesto de metano, dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno [15]. La capacidad de la biomasa o sustrato para transformar la materia orgánica en metano puede ser cuantificada a través de la actividad metanogénica específica (AME). Esta se define como la masa de sustrato en forma de DQO que es convertida a metano por unidad de masa de biomasa y por unidad de tiempo [14]. Existen diferentes metodologías para realizar el ensayo de actividad metanogénica, las cuales se diferencian por la forma como se mide la cantidad de metano producido y como se realiza la adición del sustrato [16].

El objetivo de este trabajo fue plantear la viabilidad de utilizar el bagazo generado durante el beneficio del fique, como sustrato para la producción de biogás; mediante un proceso de digestión anaerobia utilizando como inóculo un lodo de PTAR, variando la relación sustrato/inóculo y manteniendo constantes las condiciones de operación (temperatura ambiente de 27°C, pH igual a 7, presión atmosférica y ciclos de agitación).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como sustrato, para la producción del biogás se escogió la pulpa de fique, por su biodegradabilidad y alto contenido de materia orgánica [18]. El bagazo de fique (pulpa semisólida) fue suministrado por la finca Guayabetal, ubicada en el municipio de Mogotes. Se delimitó la zona de desfibrado en un cuadrado de 6 m de lado, y se realizó la toma de muestras en 10 puntos diferentes de la planta, de acuerdo al protocolo en campo [19,20]. Al bagazo se le realizó una caracterización físico-química con el propósito de conocer su composición y determinar el contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable.

La evaluación de las reacciones bioquímicas del proceso de digestión anaerobia y la determinación de la capacidad de aprovechamiento de diferentes compuestos orgánicos (el propionato, el lactato, el acetato, entre otros) como fuente de energía por los microorganismos, se llevó a cabo mediante la técnica del número más probable (NMP).

El inóculo seleccionado fue un lodo de PTAR, el cual es utilizado para la digestión de residuos de plaza de mercado en un reactor semicontinuo metanogénico [17].

Los experimentos se realizaron por duplicado, a temperatura ambiente, agitación manual y pH igual a 7 utilizando reactores de vidrio de 500 ml, en un sistema cerrado libre de oxígeno y provisto de una corriente continua de nitrógeno. Se utilizó en cada experimento 200 ml de medio mineral y una muestra variable de bagazo. Cada reactor estaba comunicado con la botella de desplazamiento de líquido por una red de mangueras de plástico y agujas [14]. El biogás producido en el reactor se burbujea en una solución alcalina (NaOH) con fenoltaleína como indicador y pH mayor que 12, en la cual el CO₂ es absorbido y el volumen de gas metano desplaza un volumen igual de la solución alcalina. El volumen de solución alcalina desplazada fuera de la botella es equivalente al volumen de biogás generado por el sistema [15]. La soda (NaOH) desplazada fue colectada en unos recipientes a los cuales se les midió el volumen constantemente. La variable respuesta del proceso es la producción diaria de gas, la cual se monitoreo a partir de los datos obtenidos y se calculó AME, definida como:

$$AME = \frac{P*24}{FC*V*SSV}; \quad (1)$$

Donde:

AME = Actividad metanogénica específica.

$$\frac{g_{DQO-CH_4}}{g_{SSV.d}}$$

P = Pendiente correspondiente a la curva de AME de cada experimento, en ml/hora

FC = Factor de conversión de DQO a CH₄. Este valor depende de la temperatura

$$\frac{ml_{CH_4}}{g_{DQO}}$$

y la presión a la que se trabajó [14].

V = Volumen de lodo utilizado en el ensayo en litros.

SSV = Concentración de SSV en el lodo (g/ml).

La composición del biogás producido se determinó con un analizador de gases BACHARACH modelo GA-94. La Figura 1 muestra el montaje de la técnica utilizada [14].

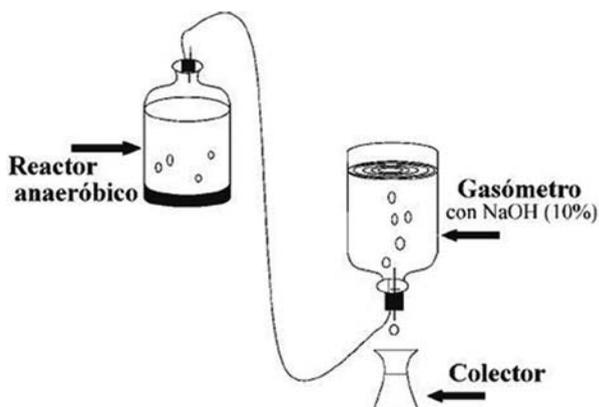


Figura 1. Medición de la actividad metanogénica en un biorreactor por desplazamiento de volumen.

Se planteó un diseño factorial de experimentos 2^2 , tomando como variables: la relación $R = \text{Cantidad de pulpa} / \text{Cantidad Medio mineral (ml)}$ y el volumen de inóculo. El análisis de los resultados se realizó con ayuda del software STATGRAPHICS. En la Tabla 2 se presentan los niveles de experimentación seleccionados para las variables de estudio.

Tabla 2. Variables del diseño de experimentos.

Variables	Niveles de Exp.	
	BAJO	ALTO
Relación de alimento	0,1125	0,225
Inóculo de lodo PTAR (ml)	75	100

En la Tabla 3 se presenta la matriz para el diseño de los experimentos.

Tabla 3. Diseño de experimentos.

No. Experimento	R	Volumen (ml) de Inóculo
1	0,1125	75
2	0,1125	100
3	0,225	75
4	0,225	100

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En las Tablas 4, 5 y 6 se presenta la caracterización bromatológica, físico-química del sustrato y su composición mineralógica respectivamente.

Tabla 4. Análisis bromatológico en base seca del bagazo del fique.

Parámetro	Unidad	Valor	Método de Análisis/Norma
Ceniza	%	9,94	Gravimétrico
Proteína	%	9,33	Kjeldahl/ NTC 1556
Grasa	%	4,73	Soxhlet/ NTC 668
Fibra	%	33,72	Gravimétrico/ NTC 668
E.N.N	%	42,25	-
Valor calórico	kcal/100g	220,9	-

Tabla 5. Caracterización físico-química del sustrato.

PARÁMETRO	UNIDAD	TÉCNICA	VALOR
AGV	mg/l	Standard Methods (APHA)	32,02
SSV	mg/l	Standard Methods (APHA)	62,0818
DENSIDAD	g/ml	Desplazamiento de líquido	1,111
DQO	mg/l O ₂	Reflujo cerrado	22577,8
MATERIA ORGÁNICA	% C	Colorimétrico	37.9

Tabla 6. Composición mineralógica de la pulpa de fique [3].

ELEMENTOS	PULPA
Nitrógeno	1,32%
Fósforo	0,49%
Potasio	7,56%
Calcio	3,58%
Magnesio	0,72%
Sodio	0,40%
Hierro	52,20 ppm
Cobre	8,10 ppm
Manganeso	45,60 ppm
Zinc	35,00 ppm

La homogeneidad de las características físicas, químicas y bacteriológicas de las muestras demostraron que el punto de muestreo, en la planta de beneficio del fique, no es importante. Por lo anterior el trabajo experimental se realizó con una única muestra, la cual garantiza que contiene los nutrientes

y minerales necesarios para los requerimientos básicos de las bacterias metanogénicas durante la producción de biogás [26].

La caracterización fisicoquímica, composición mineralógica y el análisis bromatológico realizado al bagazo muestra la presencia de carbono, compuesto requerido por las bacterias metanogénicas para su

metabolismo; por consiguiente la pulpa de fique es un excelente sustrato para los microorganismos productores de Biogás.

En la Tabla 7 y 8 se muestra el recuento de grupos de microorganismos, aplicando la técnica del NMP, realizadas al jugo de fique y al lodo PTAR, respectivamente.

Tabla 7. Grupos microorganismos relacionales con el metabolismo bacterial del jugo de fique expresado en NMP/ ml.

Grupo Metabólico	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Bacterias anaerobias estrictas BAS	15 x 10 ¹⁰	17,5 x 10 ⁸	85 x 10 ⁸	8 x 10 ¹³	45 x 10 ¹¹
Bacterias fermentadoras de lactosa BFL	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Bacterias fermentadoras de glucosa BFG	17,5 x 10 ⁹	17,5 x 10 ⁹	8 x 10 ¹¹	8 x 10 ¹²	17,5 x 10 ⁸
Bacterias sulfatoreductoras del acetato BSRAC	47,5 x 10 ⁸	15 x 10 ⁸	7 x 10 ⁹	8 x 10 ¹³	8 x 10 ¹³
Bacterias sintróficas del propionato BSP	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo

Tabla 8. Grupos microbiales relacionados con el metabolismo bacterial del lodo PTAR expresado en NMP/ ml

GRUPOS METABÓLICOS	REACTOR METANOGENICO
Bacterias fermentadoras de glucosa (BFG)	No determinado
Bacterias fermentadoras del lactato (BFL)	No determinado
Bacterias acetogénicas del propionato (BAP)	26*10 ⁵
Bacterias acetogénicas del formato (BAF)	26*10 ⁵
Bacterias acetogénicas del etanol (BAE)	11*10 ⁵
Bacterias sulfatoreductoras del acetato (BSRA)	29*10 ⁴
Bacterias sulfatoreductoras del lactato (BSRL)	74*10 ⁴
Bacterias metanogénicas del acetato (BMA)	46*10 ⁵
Bacterias metanogénicas del formato (BMF)	46*10 ⁵
Bacterias metanogénicas del metanol (BMM)	11*10 ⁵

El jugo del fique contiene mayor concentración de bacterias sulfatoreductoras, en comparación con el lodo PTAR; la presencia de concentraciones elevadas de estas bacterias inhiben el crecimiento de bacterias metanogénicas y por consiguiente la producción de metano. Lo anterior demuestra que el lodo PTAR es mejor inóculo que el jugo de fique. La Tabla 9 muestra la caracterización fisicoquímica del inóculo.

Las características fisicoquímicas del inóculo son apropiadas para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, su alta concentración de consorcios microbianos lo hace un excelente inóculo para la bioproducción de metano.

Tabla 9. Caracterización físico-química del inóculo.

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO	RESULTADO
SSV	g/ml	Standard Methods (APHA)	1
pH	-	Método Directo	7,7
DQO	mg/ml O ₂	Reflujo cerrado	80

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

A continuación se hace la representación gráfica de cada uno de los experimentos que se realizaron, con su correspondiente réplica.

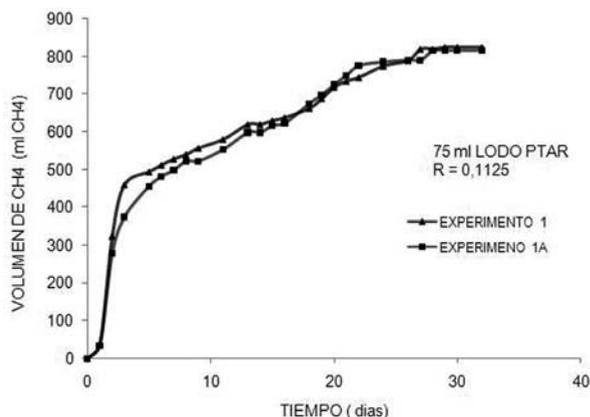


Figura 2. Curva de actividad metanogénica. Experimento 1 y 1A.

Como se observa en la Figura 2 el comportamiento del experimento 1 con su réplica es similar; esto se comprueba matemáticamente con los valores de la AME. La producción de metano correspondiente a los primeros días es mínima, debido al tiempo que requiere el inóculo en adaptarse al sustrato y medio proporcionado. Posteriormente, la producción se incrementó alcanzando su máximo valor a los 32 días de la operación del reactor.

Este experimento presentó la menor producción de metano respecto a las demás pruebas, esto podría explicarse por la deficiencia enzimática de las bacterias para la digestión de la pulpa de fique, sugiriendo un tiempo de digestión más prolongado que el de los otros experimentos.

En la Figura 3 se observa que a pesar de tener las mismas condiciones iniciales en la prueba, existen grandes diferencias en el comportamiento de degradación de la materia orgánica, se aprecia que el experimento 2 varía notablemente respecto a su réplica, posiblemente por una inhibición en el crecimiento microbiano, o un error de tipo procedimental en el montaje del ensayo. Por lo tanto la diferencia entre las actividades generadas por los reactores varía notablemente.

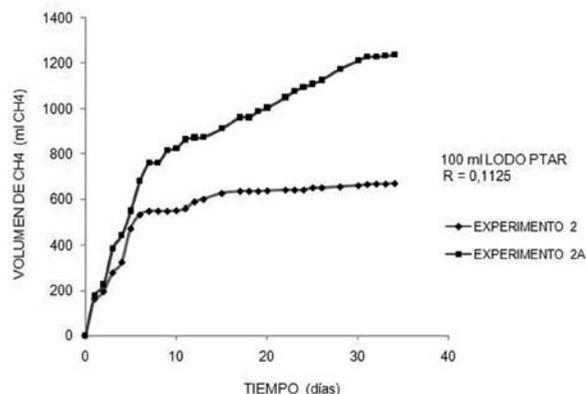


Figura 3. Curva de actividad metanogénica. Experimento 2 y 2A.

Como se aprecia en la curva de actividad metanogénica para los primeros días de reacción la producción de metano fue lenta, sin embargo, a lo largo del proceso incrementó hasta el día 31, momento en el cual se llega a su máxima producción.

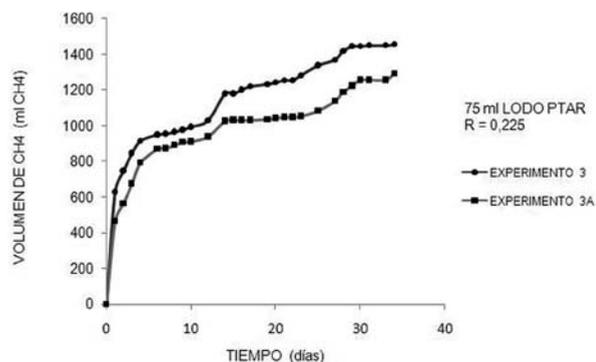


Figura 4. Curva de actividad metanogénica. Experimento 3 y 3A.

El experimento 3 y su réplica presentan una tendencia similar, como se refleja en los porcentajes obtenidos de metano para ambos casos. Como se puede observar en la Figura 4, la diferencia en volúmenes es inherente al proceso debido a que los microorganismos son seres vivos y su metabolismo es diferente.

De la Figura 4, se deduce que para los primeros días de reacción la producción de metano es lenta, el día 33 se alcanza la mayor producción. A pesar que este experimento tenía el máximo valor de R

no fue suficiente para obtener un alto porcentaje de producción de metano (Tabla 10), debido a la baja concentración de bacterias en el inóculo.

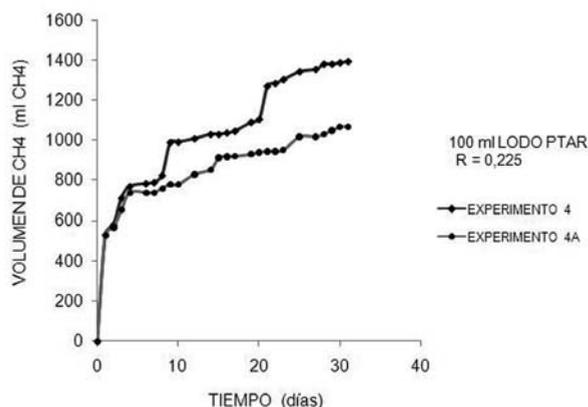


Figura 5. Curva de actividad metanogénica. Experimento 4 y 4A

En la Figura 5 correspondiente al experimento 4 y 4A, se observa un alto valor de AME, lo que indica la presencia de poblaciones metanogénicas productoras de biogás, comprobándose un alto porcentaje de producción de metano (25,2%).

La relación en el alimento y la cantidad de inóculo de cada experimento son factores importantes que intervienen en el proceso de producción de biogás. Como se observa en las curvas de actividad metanogénica, la prueba que presentó la máxima producción de biogás la contenía mayor relación R/inóculo (experimento 4), debido a la alta presencia de microbiota y suficiente materia orgánica en el biodigestor. Cuando la concentración inicial de la relación en el alimento se reduce, la inhibición se incrementa, como se observa en la prueba 2 que corresponde a igual cantidad de inóculo y menor proporción en la relación del alimento, disminuyendo la producción de metano. Lo anterior indica que la deficiencia en la digestión anaerobia no solo es función de la concentración de un compuesto tóxico, sino también de la concentración de consorcios microbianos presentes en el inóculo.

En todos los ensayos la tendencia de las gráficas se asemeja a la de una función exponencial, observando que la respuesta del lodo al sustrato es inmediata, la fase de adaptación consta de unas pocas horas que no se logran apreciar en las curvas, lo que favorecería el período de arranque de un reactor anaerobio en caso de usar este lodo

como inóculo. Así mismo, las actividades que se generan en cada experimento son semejantes, a excepción del reactor 2.

Al comparar las curvas de la actividad metanogénica obtenidas en cada uno de los experimentos con datos reportados en la literatura, se observó que la tendencia es similar [22], y siempre hay un crecimiento proporcional entre el aumento de volumen de metano respecto al tiempo.

En la Tabla 10 se reportan los resultados obtenidos del análisis del biogás la y AME para cada experimento:

Tabla 10. Análisis del biogás y la AME.

EXP'	DÍAS DE REACCIÓN	%CH ₄	%CO ₂	%O ₂	AME
1	11	1	21,6	3	0,01627
	28	3	20	2,1	
1A	11	0,8	25	3,7	0,01726
	29	2,8	21	2,2	
2	9	0,9	19,4	2,7	0,00674
	33	5,3	18	1,5	
2A	4	1,2	10,5	2,6	0,01813
	33	7,7	10	1,3	
3	2	0	32,7	3,8	0,01946
	6	0,4	17,7	3,2	
	33	5,9	33	1,4	
3A	2	0	33,4	4	0,01874
	17	0,9	37,3	3,2	
	33	6,2	40,2	1,6	
4	2	0,3	40,7	3,2	0,0221
	13	0,8	14,7	2,5	
	33	25,2	14,5	1,7	
4A	2	0,2	41,7	3,3	0,01212
	28	4,5	37	2,6	
	33	19,2	32,5	0,3	

*EXP: Experimento

El experimento 3 presentó la mayor AME demostrando así la respuesta positiva del inóculo respecto a la degradación de la pulpa de fique.

De acuerdo a los resultados obtenidos el experimento que mayor porcentaje de biogás

produjo fue el 4, con una composición de: 25,2 % de CH₄, 14,5 % CO₂ y 1,7 % O₂.

Se observa que el porcentaje de oxígeno es alto para este tipo de procesos, esto se debe a que las condiciones de la atmósfera inerte no fueron controladas correctamente durante los ensayos y a posibles errores de tipo personal en la manipulación de los experimentos, lo cual afectó la AME del lodo y por consiguiente una disminución en el producto final: metano.

La Tabla 11 muestra el promedio de los porcentajes de metano obtenidos mediante el uso del analizador de gases en cada uno de los experimentos (porcentaje promedio entre el experimento y su réplica correspondiente al último día de reacción).

Tabla 11. Porcentaje de la producción de metano en los diferentes experimentos.

EXPERIMENTO	% CH ₄
1	2,9
2	6,5
3	6,05
4	22,2

CONCLUSIONES

Se descartó la utilización del jugo de fique como inóculo para la producción del biogás, debido a la elevada concentración de bacterias sulfatorreductoras (Tabla 7), que inhiben el crecimiento de las bacterias metanogénicas y por consiguiente la producción de metano.

Mediante la actividad metanogénica específica (AME) se demostró que el bagazo de fique puede ser utilizado como sustrato, en una digestión anaerobia con lodo PTAR como inóculo, para la producción de biogás; produciendo una mezcla gaseosa de 25,2 % de CH₄, 14,5 % CO₂ y 1,7 % O₂, lo cual indica que hubo crecimiento de suficientes poblaciones metanogénicas en el reactor anaerobio a las condiciones de operación empleadas y un volumen de inóculo de 100ml.

La composición de biogás obtenido de la digestión anaerobia de la pulpa de fique, depende principalmente de la relación inóculo/sustrato

y de las condiciones de operación. La máxima producción de biogás se obtuvo a una temperatura de 27°C, pH igual a 7, presión atmosférica y agitación manual discontinua.

REFERENCIAS

- [1] Equipo técnico del proyecto "Prospectiva Tecnológica de la Cadena Productiva Agroindustrial del Fique del Departamento de Santander" Bucaramanga (2005).
- [2] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Acuerdo para el Fomento de la Producción Nacional de Fique y Mejora de su Competitividad. Secretaría General de la Cadena Productiva del Fique (2003).
- [3] Acuerdo Fomento de la Producción Nacional de Fique y Mejora de su Competitividad. Secretaría Técnica de la Cadena. Octubre (2003).
- [4] Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Fomento Económico. Comité Cadena Productiva del Fique. Departamento del Cauca (2002).
- [5] Acuerdo para el Fomento de la Producción y la Competitividad del Subsector del Fique, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, CORPOICA y IICA. (2004).
- [6] MAZUMDAR, (1982) Consolidation of information. Biogas Handbook. Pilot Edition. Paris. p. 195.
- [7] MSHANDETE A.; BJOINSSON L.; KIVAISI, A. K; MST RUBINDAMAYUGI; BO M. (2006) Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste. Renewable Energy. (31) p.2385-2392.
- [8] RAVEN R.P.J.M; KH GREGERSEN. (2007). Plants in Denmark: Successes and Setbacks. Renewable and Sustainable Energy Review. (11) p.116-132.
- [9] www.unperiodico.unal.edu.co
- [10] MSHANDETE A.; BJOINSSON L.; KIVAISI, A. K; MST RUBINDAMAYUGI; BO M. (2004) Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. Bioresource Technology. 95(1) p.19-24.
- [11] MSHANDETE A.; BJOINSSON L.; KIVAISI, A. K; MST RUBINDAMAYUGI; BO M. (2005)

Enhancement of anaerobic batch digestion of sisal pulp waste by mesophilic aerobic pre-treatment. *Water Research*. p. 1569-1575.

- [12]GUTIÉRREZ E.C.; FERNÁNDEZ N.; SEPÚLVEDA J.; BLANCO E.; MÁRMOL Z. Tratamiento Anaerobio de Aguas de Formación. La Universidad del Zulia. Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. (2008).
- [13]www.consumer.es
- [14]DIAZ, M., ESPITIA, V., P, MOLINA. (2002) Digestion Anaerobia. Una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Biotecnología. Bogotá.
- [15]FORERO MANCERA, W. L. y ZÚÑIGA PELÁEZ, J. M. (2003) Evaluación de la Actividad Metanogénica de Lodos. Universidad Nacional de Colombia. Tesis de Pregrado
- [16]SOTO M., MÉNDEZ R. y LEMA J.M., (1993). Methanogenic and non-Methanogenic activity test. Theory basis and experimental set up. Universidad de Santiago de Compostela, España.
- [17]SANDOVAL L. C.; CARREÑO, M.; CASTILLO M. E.; VERGARA, M. Caracterización microbiológica de los lodos que intervienen en la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Universidad Industrial de Santander (2009).
- [18]Digestión Anaerobia, Una Alternativa para el Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos. CENTRO DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES AMBIENTALES CEIAM. (2000).
- [19]Guía de prácticas de Microbiología, Departamento de microbiología. Universidad Complutense de Madrid 2004-2005.
- [20]COYNE M. (2000) Microbiología del suelo: Un enfoque exploratorio. Primera Edición. Editorial Paraninfo. Madrid.
- [21]FERRÉ J. El Diseño Factorial Completo 22. Grupo de Quimiometría y Cualimetría. Departamento de Química Analítica y Química Orgánica. Universidad Rovira Virgili. Tarragona. (2004).
- [22]SILVA LOPES W. DUARTE LEITE V.; PRASAD S. (2004) Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. *Bioresource Technology*. 94, p. 261-266.
- [23]CUN-FANG LIU A.; XING-ZHONG YUAN A.; GUANG-MING ZENG A.; WEN-WEI LI A.; JING LI B. (2007) Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste.
- [24]SIGRID KUSCH; HANS OECHSNER; THOMAS JUNGBLUTH. Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems. *Bioresource Technology*. (2008) 99(5) p. 1280-1292.
- [25]MADIGAN, M., MARTINKO J., PARKER J., BROCK. (2004) *Biología de los Microorganismos*. Octava Edición. Pearson Educación S.A. Madrid. p. 112-113.
- [26]MADIGAN, M., MARTINKO J., PARKER J., BROCK. (2004) *Biología de los Microorganismos*. Octava Edición. Pearson Educación S.A. Madrid. p. 112-113.