

**EFFECTO DE LA AGITACIÓN SOBRE EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
BIOGÁS A PARTIR DEL BAGAZO DE FIQUE A DIFERENTES ESCALAS.**

**RONALD RAFAEL CARDENAS MARTINEZ
EDWAR FABIAN FUENTES MORANTES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2011

**EFFECTO DE LA AGITACIÓN SOBRE EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE
BIOGÁS A PARTIR DEL BAGAZO DE FIQUE A DIFERENTES ESCALAS.**

**RONALD RAFAEL CARDENAS MARTINEZ
EDWAR FABIAN FUENTES MORANTES**

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

**HUMBERTO ESCALANTE HERNANDEZ
Ingeniero Químico Ph. D.**

Co-director (a)

**LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO
Estudiante de doctorado de Ing. Química
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

Al director del proyecto, PhD. Humberto Escalante Hernández, por la oportunidad de realizar este trabajo y fortalecer nuestras bases académicas.

A la codirectora, Ingeniera Química Liliana del pilar castro por su colaboración y paciencia en el desarrollo del proyecto.

A los compañeros que hicieron parte del grupo de trabajo por su apoyo y compañía.

A los bacteriólogos Alex y Mabel juliana quintero por el conocimiento transmitido además de la colaboración en el proyecto

A los técnicos del laboratorio de procesos de ingeniería química “Eduardo y Wilson” por su apoyo y colaboración desinteresados.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a Dios, por permitirme terminar este camino, por darme valor, perseverancia y fuerza para afrontarlo en los momentos difíciles, y capacidad para disfrutarlo en los momentos felices.

Mis padres, Rafael y Mery, por que cada uno, en su momento, buscó lo mejor para mí y me hizo una persona con valores y principios para toda la vida.

A mis hermanos Ferney y Viviana por su gran ejemplo de superación y valioso apoyo en todo momento desde el inicio de mis estudios universitarios.

Ronald Rafael Cárdenas Martínez.

A mi fuerza misteriosa, que me dio ese impulso día tras día para luchar y nunca acomplejarme ante las adversidades del camino.

A mi padre, por ese ejemplo que medio todos los días de esforzarme, por lo que quería y perseverar hasta alcanzarlo.

A mi madre por que fue la persona que mas me dio ánimo y apoyo cuando lo necesite nunca desfalleció en sus anhelos que yo fuera una persona de bien.

A mis hermanos por ese gran amor que me brindaron.

A mis verdaderos amigos que con sus consejos y amistad que me profesaron durante toda mi carrera me confortaron y acompañaron en esos momentos cuando más los necesite

Edwar

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. DIGESTIÓN ANAEROBIA	18
1.1 BIOGÁS	20
1.1.1 Biodigestor de alimentación continua	21
1.1.2 Biodigestor tipo plug flow	21
1.1.3 Biodigestor de balón de plástico	21
1.1.4 Biodigestor de tapón de flujo	21
1.2 ESCALADO	22
1.2.1 Sistemas de agitación	23
1.2.2 Tipos de agitadores.	23
1.2.3 Control de velocidad del motor	24
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
2.1 PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DEL BF A DIFERENTES ESCALAS.	25
2.1.1 Parámetros de operación del biodigestor	26
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	29
3.1 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL SUSTRATO (BF).	29
3.2 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL INOCULO (LR+EC).	29
4. CONCLUSIONES	40
BIBLIOGRAFIA	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Concentración de ART durante la producción de biogás.	31
Figura 2. Concentración de AGV durante la producción de biogás.	33
Figura 3. Variación del pH durante la producción de biogás	34
Figura 4. Relación AGV/ALC durante la producción de biogás.	36
Figura 5. Producción de volumen de metano normalizado.	37
Figura 6. Distribución de medias para los rendimientos sin agitación, A1 y A2.	39

LSITA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Consolidado descriptivo de las etapas de DA.	19
Tabla 2. Composición aproximada del biogás.	20
Tabla 3. Comparativo de diferentes fuentes energéticas con el biogás	20
Tabla 4. Variables del proceso para el estudio de agitación en la producción de biogás a partir de los residuos del BF.	26
Tabla 5. Variables de salida para el estudio de agitación en la producción de biogás a partir de los residuos del BF.	28
Tabla 6. Condiciones de operación de las pruebas experimentales para la agitación.	28
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica del sustrato (BF) y del inóculo (LR+EC).	30

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo

AGV = Ácidos Grasos Volátiles.

ART = Azúcares Reductores Totales.

BF = Bagazo de Fique.

DNS = Ácido Dinitrosalicílico.

EC = Estiércol de Cerdo.

LR = Líquido Ruminal.

ST = Sólidos Totales.

STV = Sólidos Totales Volátiles.

SSV = Sólidos Suspendidos Volátiles.

SV = Sólidos Volátiles.

MIX = Mezcla de Líquido Ruminal y Estiércol de Cerdo

RIS = Relación Inoculo Sustrato

DA = Digestión Anaerobia

ALC= Alcalinidad

RESUMEN

TITULO: EFECTO DE LA AGITACIÓN SOBRE EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DEL BAGAZO DE FIQUE A DIFERENTES ESCALAS*.

AUTORES RONALD RAFAEL CARDENAS MARTINEZ
EDWAR FABIAN FUENTES MORANTES**

PALABRAS CLAVES: Bagazo de fique, agitación, residuo lignocelulósico, digestión anaerobia, biogás.

CONTENIDO:

En Colombia el proceso de beneficio del fique genera por cada 1000 kg de hoja, 40 kg de fibra y 960 kg de residuos (bagazo y jugo). Parte de estos residuos se emplean en la producción de abonos orgánicos y otros productos industriales. Sin embargo los grandes volúmenes de bagazo y jugo son desechados directamente al medio, generando problemas ambientales. La caracterización fisicoquímica del bagazo indica que es un residuo lignocelulósico con una adecuada relación carbono nitrógeno particularidad que lo hace idóneo como fuente de carbono para la producción de biogás. Una de las alternativas tecnológicas para la producción de biogás es la de digestión anaerobia. Todos los ensayos se realizaron en biodigestores batch de 50, 500, 3500 ml. Se alimentaron con Bagazo de Fique (BF), Líquido Ruminante (LR), Estiércol de Cerdo (EC). Para cada reactor se aplicó agitación de 0, 80 y 160 rpm en corridas de 10 días y a temperatura ambiente. De acuerdo a los resultados obtenidos los ensayos que tenían agitación aumentaron en un 15 % sus rendimientos con respecto a los que no tenían. Los rendimientos de producción de biogás se mantuvieron dentro del intervalo de 0,36 a 0,51 m³/kg SV. La agitación es una variable de operación que incidió favorablemente en la producción de metano a partir de BF y mediante DA. La estabilidad del proceso se sustentó en los valores de pH obtenidos, los cuales estuvieron dentro del rango óptimo para digestores anaeróbicos.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández. Codirector: Ing. Liliana del Pilar Castro Molano.

ABSTRACT

TITLE: STIRRING EFFECT ON BIOGAS PRODUCTION FROM FIQUES BAGASSE AT DIFFERENT SCALES*

AUTHORS: RONALD RAFAEL CARDENAS MARTINEZ
EDWAR FABIAN FUENTES MORANTES**

KEYWORDS: Fique's bagasse, stirring, lignocellulosic residue, anaerobic digestion, biogas.

CONTENTS:

In Colombia the benefits by fique's generates by each 1000 kg of leaf, 40 kg of fiber and 960 kg of waste (bagasse and juice). Part of this waste is used in the production of organic fertilizers and other industrial products. However, the large volumes of bagasse and juice are discarded directly to the environment, creating environmental problems. The physicochemical characterization indicates that bagasse is a lignocellulosic residue with proper carbon nitrogen ratio, feature that makes it suitable as a carbon source for production of biogas. One of the technological alternatives for biogas production is anaerobic digestion. All trials were conducted in batch biodigesters 50, 500, 3500 ml. It were fed with Fique's Bagasse (FB), Rumen Liquid (RL), Pig manure (PM). For each reactor stirring were applied 0, 80 and 160 rpm on runs of 10 days at room temperature. According to the results obtained from tests that had stirring, increased by 15% its yields regarding to those without. The biogas yields productions were within the range from 0.36 to 0.51 m³/kg SV. Stirring is a variable of operation that had a positive impact on the methane production from BF and by DA. The stability of the process is based on the values of pH obtained, which were within the optimum range for anaerobic digesters.

* Working Grade. Research mode.

** Physicochemical Engineering Faculty. School of Chemical Engineering.

Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández. Co-director: Ing. Liliana del Pilar Castro Molano.

INTRODUCCIÓN

En Colombia el proceso de beneficio del fique genera por cada 1000 kg de hoja, 40 kg de fibra y 960 kg de residuos (bagazo y jugo). Parte de estos residuos se emplean en la producción de abonos orgánicos y otros productos industriales. Sin embargo, los grandes volúmenes de bagazo y jugo son desechados directamente al medio, generando problemas ambientales [1]. La caracterización fisicoquímica del Bagazo de Fique (BF) indica que este residuo es lignocelulósico con una adecuada relación carbono/nitrógeno; particularidad que lo hace idóneo como fuente de carbono para la producción de biogás [2,3].

Una de las alternativas tecnológicas para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos es la bioconversión anaerobia en procesos convencionales [4]. La Digestión Anaerobia (DA) es el metabolismo en el cual diferentes grupos bacterianos cooperan para convertir la materia orgánica en biogás en ausencia de oxígeno [5]. La degradación eficiente de la materia orgánica mediante DA depende de la acción combinada de una población microbiana heterogénea, consistente en diversos géneros anaeróbicos estrictos y facultativos [6].

La agitación el pH y la temperatura afectan las condiciones en las que son llevadas a cabo los bioprocesos. En un biorreactor la agitación produce una mezcla homogénea y mejora la conversión de materia orgánica, ayuda a eliminar los gradientes de concentración en torno a los sólidos hidrolizados, mejora el contacto entre la biomasa y el sustrato que posteriormente es traducido en mayores rendimientos de biogás [5,7].

En un bioproceso el rendimiento global del reactor biológico está determinado por la interacción de la física (hidrodinámica de fluidos) y depende de los parámetros biológicos (factores de crecimiento y la demanda de nutrientes) [7].

El tiempo de la degradación de la materia orgánica se ve influenciado por la agitación [8]. Según estudios reportados sobre la influencia de la agitación, en sistemas anaerobios en donde se utilizaron granos de residuos sólidos de cervecería para convertirlos en biogás, una agitación de 120 ± 20 rpm y un volumen de 10-100 L de operación permitieron obtener rendimientos de $0,3 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ [8]. Otros autores lograron mejorar el rendimiento utilizando una mezcla de estiércol porcino y lodo anaerobio con residuos sólidos urbanos pasando de una escala de 0,5 L a 20 L con agitaciones variables incrementando la temperatura 10 a 15°C [9].

El efecto del tipo de flujo y la velocidad del rotor se investigó en un reactor de fondo redondo con 5 L de volumen útil que contiene 2 L de biomasa granular, utilizando como inóculo el manto de lodos anaerobios de aguas residuales, los resultados mostraron que al variar el tipo de impulsor (agitador) y la velocidad de rotor afectan significativamente la estabilidad del sistema y el rendimiento [10].

El escalado de un biorreactor es realizado mediante variables que representan una razón entre dos parámetros con las mismas dimensiones (variables adimensionales). De esta forma, es posible escalar (es decir cambiar de dimensión o tamaño) el biorreactor y adaptarlo a otra nivel del proceso [11]. La literatura recomienda que las principales relaciones adimensionales que se utilizan en tanques agitados son: la razón de la altura de trabajo (H) y el diámetro del tanque (Dt) [11,12].

Magaña J. *et al*, diseñaron un biodigestor empleando como sustrato estiércol de cabra y agua; este biodigestor fue dimensionado teniendo en cuenta variables como agitación (150 rpm), y temperatura posteriormente lo llevaron a una escala piloto partiendo de un nivel de laboratorio de 9 L y manteniendo un rendimiento de $0.27 \text{ m}^3 / \text{kg SV}$ en el proceso [7].

Actualmente el proceso de DA de BF empleando como inóculo una mezcla de Líquido Ruminante (LR) y Lodo de Cerdo (LC) es llevado a cabo en reactores batch

de 500 ml de operación sin agitación, generando $0,36 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$ de Sólidos Volátiles (SV) durante la bioconversión [4]. Diferentes sustratos han sido tratados en bioprocesos con agitación para producir metano por ejemplo los residuos de frutas y vegetales que al utilizar como inóculo un lodo activo residual se obtiene un rendimiento de $0,37 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ [13]. Concluyendo así que la variable agitación para tratamientos anaerobios mejora las etapas de la digestión y por ende los rendimientos esperados para volúmenes a escala mayor.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo de investigación fue evaluar el efecto de la agitación sobre el proceso de producción de biogás a partir del BF a diferentes escalas volumétricas.

1. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La DA es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o “biogás” (CH₄, CO₂, H₂, H₂S, etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación [14].

La DA es un proceso adecuado para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica. Los tratamientos anaerobios presentan las ventajas de no necesitar aireación y de generar un producto que puede ser recuperado y utilizado en la misma planta con finalidades energéticas, permitiendo en muchos casos la autonomía o autosuficiencia de las plantas de tratamiento [15].

Lo anterior se corrobora con estudios donde se utilizaron fangos como materia orgánica con el fin de minimizar los costos de operación en el tratamiento de aguas residuales [15]. Además, la principal ventaja de la co-digestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas, y compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado afirma en su estudio de optimización de DA de purines de cerdo Campos A [16].

La DA se realiza en cuatro etapas simultáneas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [5]. En la hidrólisis ocurre el rompimiento de las macromoléculas para facilitar la disponibilidad de sustratos menos complejos a otros microorganismos; dando como producto celobiosa, glucosa, pentosa y hexosas [17]. En la acidogénesis ocurre la despolimerización, solubilización y conversión de la materia orgánica en un lixiviado (efluente) rico en Ácidos Grasos Volátiles (AGV), hidrogeno y dióxido de carbono [17, 18, 19]. Estas reacciones son llevadas a cabo por bacterias anaerobias facultativas cuyos géneros más frecuentes son presentados en la Tabla 1. En la acetogénesis las bacterias

acetogénicas transforman la glucosa en ácido acético y alcoholes [17]. Finalmente las bacterias metanogénica que se caracterizan por tener un metabolismo lento producen metano y dióxido de carbono.

Tabla 1. Consolidado descriptivo de las etapas de DA.

Etapa	Reacción	Tipo de población microbiana	pH	Producto
Hidrólisis	Fermentación de glucosa a acetato, butirato	Enterobacteriaceae, Bacillus, Peptostreptococcus, Propionibacterium, Bacteroides, Micrococcus,	5 - 6,5	Celobiosa, glucosa, pentosa
Acidogénesis	Fermentación de propionato a acetato	Ruminococcus albus, Clostridium, Acetovibrio, Bacteroides	5 - 6,5	Acido (acético, butírico, propiónico)
Acetogénesis	Acetogénesis a partir de CO ₂ y H ₂	Clostridium, Acetobacterium, Butyribacterium	7-8,5	Acetato, hidrogeno, CO ₂
Metanogénesis	Metanogénesis a partir del acetato	Methanobacterium, Methanosarcina, Methanosaeta	7-8,5	CH ₄ , CO ₂

Fuente: AYMERICH D. Alternativas de Co-tratamiento biológico de residuos agroindustriales. Valorización agronómica del producto final universidad de Navarra pamplona España oct, pp. 65-80,2007.

Los beneficios asociados a la DA son:

- Reducción significativa de malos olores.
- Mineralización.
- Producción de energía renovable si el gas se aprovecha energéticamente y sustituye a una fuente de energía fósil.
- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la reducción de emisiones incontroladas de CH₄, (que produce un efecto invernadero 20 veces superior al CO₂), y reducción del CO₂ ahorrado por sustitución de energía fósil [20].

1.1 BIOGÁS

El biogás es el producto gaseoso de la DA de compuestos orgánicos. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada. Su composición aproximada se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Composición aproximada del biogás.

Composición de biogás	% Volumen
Metano CH ₄	40-70
Dióxido de carbono CO ₂	30-60
Sulfuro de Hidrogeno H ₂ S	0-3
Hidrogeno H ₂	0-1

Fuente: A. M. Sc. Jorge A. Hilbert, manual del biogás, Instituto de Ingeniería Rural.

El poder calórico del biogás depende de su contenido de metano. Un biogás con un contenido en metano del 60% tiene un poder calórico aproximado de 5,500 kcal/Nm³ [20]. El biogás, salvo por el contenido en H₂S, es un combustible ideal con las siguientes equivalencias:

Tabla 3. Comparativo de diferentes fuentes energéticas con el biogás

1 m³ de biogás → 70% CH₄ + 30% CO₂ → 6.000 kcal

Fuentes	Valor	Unidades
Biogas	1	m ³
Electricidad	6,8	kw/h
Gas Natural	0,6	m ³
Gasolina	0,8	L
Alcohol Combustible	1,2	L
Carbón	0,3	kg
Fuel-Oil	0,71	L
Madera	1,5	kg

Fuente: A. M. Sc. Jorge A. Hilbert, manual del biogás, Instituto de Ingeniería Rural.

En la fabricación de un biodigestor se han probado muchos tipos de modelos, buscando una mayor eficiencia en la producción y un menor costo de inversión [21]. Entre los diseños más utilizados se tiene los siguientes;

1.1.1 Biodigestor de alimentación continua: para este tipo la alimentación de la biomasa se efectúa en intervalos regulares; por razones prácticas, estos digestores son alimentados intermitentemente, esto se logra aprovechando la gravedad para la alimentación.

1.1.2 Biodigestor tipo plug flow: estos se construyen en forma de canal horizontal con concreto reforzado en el que se depositan los residuos con alto contenido de sólidos, cuenta con agitadores, que trabajan varias veces al día.

1.1.3 Biodigestor de balón de plástico: Está compuesto de una bolsa de plástico, caucho polietileno o geomembrana de PVC, completamente sellada, la parte inferior de la bolsa (75% de volumen) se rellena con la carga, mientras que la parte superior de la bolsa (25%) se deja como espacio para captar el biogás que se produce, el cual posteriormente es enviado a un almacén de gas fabricado también con algunos de los materiales mencionados.

1.1.4 Biodigestor de tapón de flujo: Consiste en una zanja construida con concreto o con una membrana impermeable. El digestor se cubre con una cubierta flexible anclada al suelo, al concreto o al acero galvanizado, estos tanques especiales son rectangulares y tratan residuos que contengan de 11 % a 13 % total de sólidos.

A nivel laboratorio o de planta piloto se han desarrollado biodigestores pequeños que permiten a investigadores analizar y evaluar con precisión el comportamiento de gran cantidad de variables involucradas en el proceso de biodigestion. Tal es el caso del biodigestor utilizado en el estudio de producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabra [22].

1.2 ESCALADO

El desarrollo de un producto requiere de una metodología adecuada para pasarlo de su etapa inicial en el laboratorio al nivel de producción, pues los equipos y sistemas no se comportan de igual forma a diferentes volúmenes sin embargo los parámetros deben tener la misma eficiencia a escala mayor [23]. Por lo general el escalamiento se basa en la experiencia y en una serie de estudios de ensayo y error, llegando en ocasiones a la necesidad de modificar la formulación inicial del producto.

Criterios a tener en cuenta para pasar a escala mayor

- Requerimientos de potencia (P/V).
- Número de Reynolds.
- Caudal de alimentación del líquido
- Coeficiente de transferencia de oxígeno (KLa).
- Similitud geométrica.
- Tiempo de mezcla

El primer paso en el diseño de cualquier biorreactor es dimensionar el tamaño del tanque o del cuerpo del biorreactor; la práctica común es hacerlo, a través de variables adimensionales: variables que representan una razón entre dos parámetros con las mismas dimensiones. De esta forma es posible adaptar el biorreactor a otra escala del proceso. Una de las principales relaciones adimensionales es la razón de la altura (H) al Diámetro del tanque (Dt) esta relación se encuentra en el intervalo $3 \leq H/Dt \leq 1$, la razón del Dt al Diámetro de la hojas o aspas (Da): $\frac{1}{2} \leq Da/Dt \leq \frac{1}{4}$ cuando el régimen de agitación es laminar y las revoluciones del motor menores a 160 rpm, en turbinas axiales y hojas planas esta relación aumenta de 2 – 4; la razón entre el ancho de la hoja o aspa (L) y el espesor o grosor de esta (W): $4 \leq L/W \leq 1$ en turbinas axiales y hojas planas esta

relación se invierte $\frac{1}{4} \leq L/W \leq 1/16$. Para amortiguar la turbulencia se recomienda el uso de baffles los cuales el ancho de estos oscilan entre $1/12-1/16$.

Una dimensión a tener en cuenta es el espacio libre que se deja entre la superficie libre del líquido y el techo o tapa del biorreactor, para facilitar la operación del sistema esta debe ser como mínimo de un 10 % de la altura total del tanque y como máximo del 50 %, finalmente la distancia a tener en cuenta entre el piso del reactor y el agitador es de $1/3$ de la altura del tanque [11,12].

1.2.1 Sistemas de agitación; tiene la función de generar la potencia necesaria para producir una mezcla perfecta para el sistema de cultivo y producir un régimen de agitación adecuado que maximice la difusión de gases en el líquido minimizando la producción de esfuerzos cortantes, la presión hidrodinámica local y global, para optimizar los fenómenos de transferencia de momentum, calor y masa [10]. Un sistema de agitación cuenta con cuatro partes mecánicas el motor impulsor, eje de transmisión de la potencia, acople del eje transmisor y los acoples al tipo de aspa a usar en la agitación [21].

1.2.2 Tipos de agitadores. Los agitadores se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del agitador y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros se llaman agitadores de flujo axial y los segundos agitadores de flujo radial [10].

Los propulsores de flujo radial pueden tener gran variedad de formas y diseños dentro de los cuales las hélices y las turbinas son las que más se utilizan. Un agitador de hélice, es un agitador de flujo axial, que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos. Las corrientes de flujo, que parten del agitador, se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo o las paredes del tanque. Las palas de la hélice cortan o friccionan vigorosamente el líquido. Debido a la persistencia de las corrientes de

flujo. Por su gran potencia y turbulencia que generan, las hélices no se recomiendan para cultivos de células sensibles; solo deben utilizarse para cultivos de bacterias o micóticos y a bajas velocidades de rotación [10].

Las turbinas generan un flujo axial se ha demostrado que son la forma más eficiente de diseño para reducir esfuerzos cortantes e hidrodinámicos y disminuir la turbulencia y la potencia requerida para homogenizar el mezclado; objetivo que se persigue en una mezcla perfecta. Por eso se recomienda impulsores de flujo axial para cultivar células sensibles o de membrana plasmática [10].

1.2.3 Control de velocidad del motor; los motores de inducción de corriente alterna tienen velocidades nominales de 1800 rpm o 3600 rpm. Estas velocidades son muy altas para los sistemas biológicos causando la destrucción de las células y microorganismos en cultivo. La velocidad de rotación del motor debe entonces reducirse a un máximo de 600 rpm (revoluciones por minuto) para que no cause daño celular. Usualmente se acopla a la salida del eje del rotor una caja de reducción de 1/3 o 1/6 para bajar la velocidad de rotación a 600 rpm. Adicionalmente se coloca un control de velocidad que puede ser análogo o digital al motor para un control más fino y preciso de la velocidad de rotación [10].

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DEL BF A DIFERENTES ESCALAS.

Para evaluar el efecto de la velocidad de agitación en el proceso de DA del BF se realizaron experimentos en bioreactores *batch* de 50 ml, 500ml y 3.500 ml a temperatura ambiente. Los experimentos se realizaron por duplicado durante un periodo de 10 días, según las especificaciones de sustrato e inóculos recomendados por Castro *et al* [4].

En la tabla 4 se presentan las condiciones de operación para cada uno de los ensayos. Después de alimentar cada uno de los digestores se gaseo durante 20 segundos una corriente de CO₂ para garantizar la anaerobiosis [24]. Se procedió sellando los biodigestores con tapón hermético de caucho y un ágrafe de seguridad de aluminio.

En el caso de los digestores de 50 y 500 ml se realizaron ensayos destructivos para cuantificar cada dos días la concentración de ART y AGV. Para los experimentos que requerían agitación se empleó un equipo Agitador Orbital, marca —*Orbit Shaker Lab Line*” graduado en dos niveles 80, 160 ±20 rpm.

Con respecto a la escala de 3500 ml se trabajó en un biorreactor de vidrio el cual fue puesto dentro de una malla de seguridad y sostenido por un soporte industrial. Este biorreactor cuenta con una tapa de acero inoxidable provista de un orificio para toma de muestra y una válvula de paso para la salida del biogás producido. La velocidad de agitación se controló con el equipo APPLIKON “Depedable Instruments” Shiedam-Holanda tipo paleta que tenía un rango de agitación variable entre 0-1500 rpm. En este experimento no se tiene en cuenta el mismo porcentaje de cabeza porque se observó que a mayor volumen mayor espacio de cabeza y para una buena producción de biogás fue necesario disminuir el espacio

a 21,4 % por el que ocupaba el tipo de agitador (tipo hélice) y para mejorar la presurización.

Como variables de respuesta, para cuantificar el rendimiento del proceso, se consideró: la variación de los ART, pH AGV con respecto al tiempo y la producción de metano en m³/kg SV adicionado.

2.1.1 Parámetros de operación del biodigestor

Tabla 4. Variables del proceso para el estudio de agitación en la producción de biogás a partir de los residuos del BF.

Volumen de Biorreactor	Variables de operación	Valor	Unidades
50 ml (A)	Cantidad de sustrato	0,8	g SV
	Cantidad de inóculo	0,8	g SV
	Agitación	0	rpm
		80	
160			
500 ml (B)	Cantidad de sustrato	8,2	g SV
	Cantidad de inóculo	7,1	g SV
	Agitación	0	rpm
		80	
160			
3500 ml (C)	Cantidad de sustrato	57,36	g SV
	Cantidad de inóculo	59	g SV
	Agitación	0	rpm
		80	
160			

Fuente: los autores del proyecto

Sustrato

Las muestras de BF se recolectaron en una planta de beneficio localizada en el municipio de mogotes, Santander. El BF recolectado se conservó en recipientes herméticos refrigerados y se trasladaron a las instalaciones de laboratorio de ingeniería química de la UIS. A las muestras de BF se les realizó caracterización fisicoquímica para evaluar su contenido de: Sólidos Totales (ST), concentración de Sólidos Volátiles (SV), alcalinidad (ALC), concentración de Ácidos Grasos Volátiles (AGV), relación carbono/nitrógeno (C/N), celulosa, Hemicelulosa y lignina. Los análisis fisicoquímicos para el BF se realizaron de acuerdo a los procedimientos establecidos por *Van Soest y los Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* [25, 26]. En la tabla 7 se describe la caracterización del sustrato empleado.

Inoculo

Se utilizo un consorcio microbiano compuesto de la mezcla de LR y EC en proporción de 1:1 (v/v). El LR se recolecto en el frigorífico el Vijagual (Rio Negro Santander). El EC fue recolectado de la porcicola portoferrayo (Mesa de los Santos). En la tabla 7 se muestra la caracterización del inóculo empleado.

Métodos Experimentales

La tabla 5 muestra los métodos experimentales empleados para la cuantificación de las variables de salida del proceso.

Tabla 5. Variables de salida para el estudio de agitación en la producción de biogás a partir de los residuos del BF.

Variables de salida	Método Usado	Referencia
Azúcares Reductores Totales (ART)	Colorimétrico	Miller
Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	Anderson y Yang	Demirer G., Chen S. 2005, Álvarez J. <i>Et Al.</i> 2008
Volumen De Metano	Desplazamiento Alcalino	Angelidaki, Álvarez J. <i>Et Al.</i> 2008

Fuente: los autores del proyecto.

Los ensayos A1, A2 Y A3 presentan las mismas condiciones de operación durante la experimentación, para las cuales se vario la agitación. De igual forma se muestran divididas las pruebas separándolas por escalas (A, B, C).

Tabla 6. Condiciones de operación de las pruebas experimentales para la agitación.

Experimento	Volumen biorreactor (ml)	Agitación (rpm)	Parámetros de operación	Valor
A1	50	0	Volumen de operación (ml)	30
A2	50	80	Espacio de cabeza (%)	30
A3	50	160	Relación (D/H) adimensional	0,67
B1	500	0	Volumen de operación (ml)	350
B2	500	80	Espacio de cabeza (%)	30
B3	500	160	Relación (D/H) adimensional	0,43
C1	3500	0	Volumen de operación (ml)	2850
C2	3500	80	Espacio de cabeza (%)	0,21

C3	3500	160	Relación (D/H) adimensional	0,48
----	------	-----	-----------------------------	------

Fuente: los autores del proyecto.

Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de datos de la digestión anaerobia de cada experimento, se analizó con el software *StatGraphics Centurion XV, StatPoint Inc., Virginia, EE.UU.* La prueba de Fisher se utilizó para comprobar las diferencias estadísticamente significativas de los rendimientos de la producción de metano [27].

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SUSTRATO (BF).

De acuerdo con la tabla 7, la cantidad de materia orgánica, relación C/N, concentración de AGV presentes en el BF indica que este residuo es potencialmente apropiado para el arranque de un proceso anaerobio [3]. Además, el poder calorífico del BF, propio de los residuos lignocelulósicos, lo convierte en una materia prima atractiva para ser aprovechada energéticamente.

3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL INOCULO (LR+EC).

Con respecto al pH de los inóculos se puede decir que los consorcios microbianos presentan un valor propicio para el arranque del bioproceso porque compensa los efectos inhibitorios que puede causar la acidez del BF [4].

De la concentración de AGV se puede afirmar que es alta para el LR lo cual puede generar inhibiciones en el proceso de DA y por lo tanto bajas producciones de gas

metano, caso contrario ocurre el EC. En cuanto a las co-digestiones con LR se observa que la concentración de AGV se reduce, mejorando el proceso. En cuanto a los STV el LR presenta una baja concentración caso contrario en el EC éste parámetro cuantifica la concentración de materia orgánica disponible en el inóculo, por lo tanto se puede inferir que los inóculos tienen producción de biogás por si mismos por lo tanto la producción real de biogás debe ser calculada restando la producción in situ de cada inóculo.

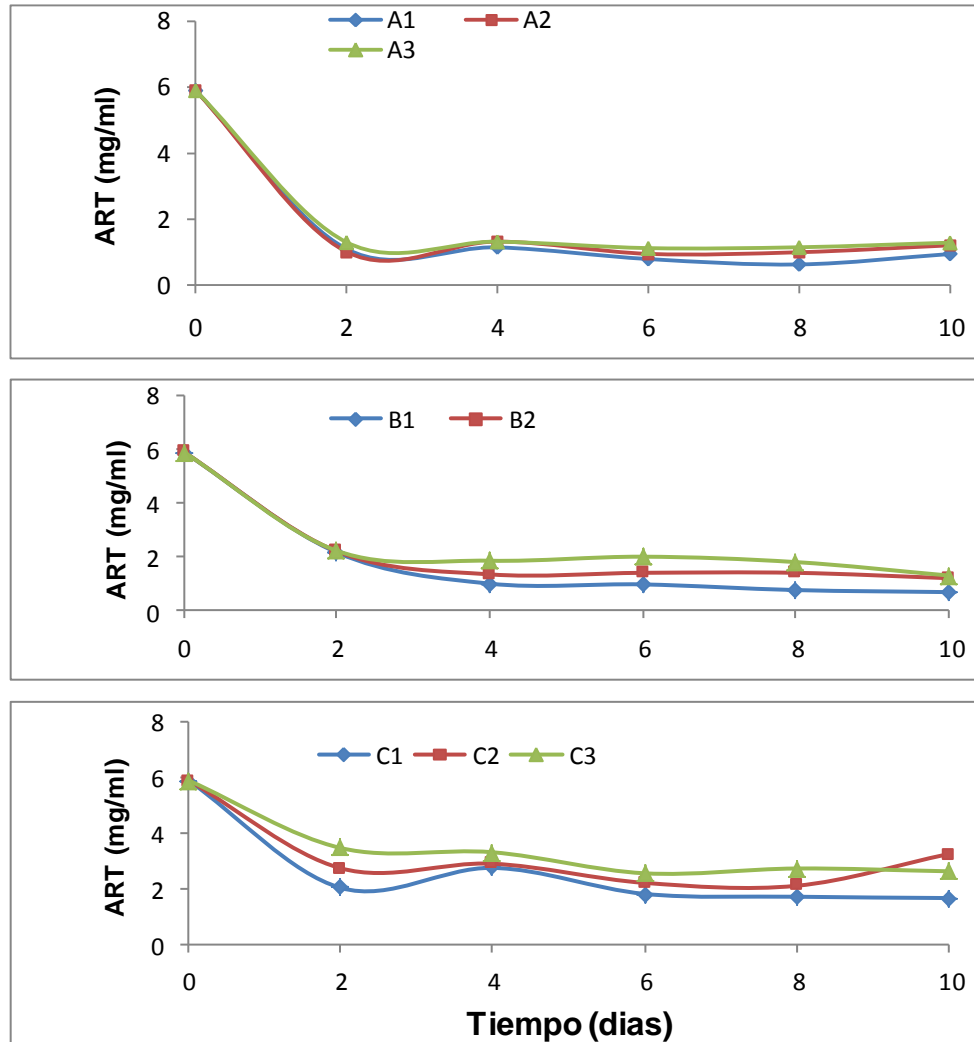
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica del sustrato (BF) y del inoculo (LR+EC).

Parámetros	BF	LR	EC	LR-EC	Unidades
pH	4	7	8	8	
ST	19,5	17,47	105,94	43,77	mg/L
STV	16,3	7,91	51,66	23,64	mg/L
C/N	63	ND	ND	ND	
ALC	3,300	4,1	1,7	3,1	mgCaCO3/L
AGV	10,800	9,36	2,52	7,2	mg/L
Celulosa	41,81	ND	ND	ND	%
Hemicelulosa	22,17	ND	ND	ND	%
Lignina	15,56	ND	ND	ND	%
Poder calorífico	3298	ND	ND	ND	kcal/kg

Fuente: los autores del proyecto.

Figura 1. Concentración de ART durante la producción de biogás.

Efecto de la agitación a diferentes escalas sobre la concentración de ART durante el tiempo de digestión.



Fuente: los autores del proyecto.

La elevada concentración de ART, al inicio del proceso, es favorable para el arranque del reactor. La concentración inicial de ART procede del aporte de proteínas y glúcidos. Durante los primeros dos días de digestión se aprecia una disminución de ART, en cada una de las escalas estudiadas, lo que significa un consumo de la materia orgánica soluble por parte de las bacterias hidrolíticas que

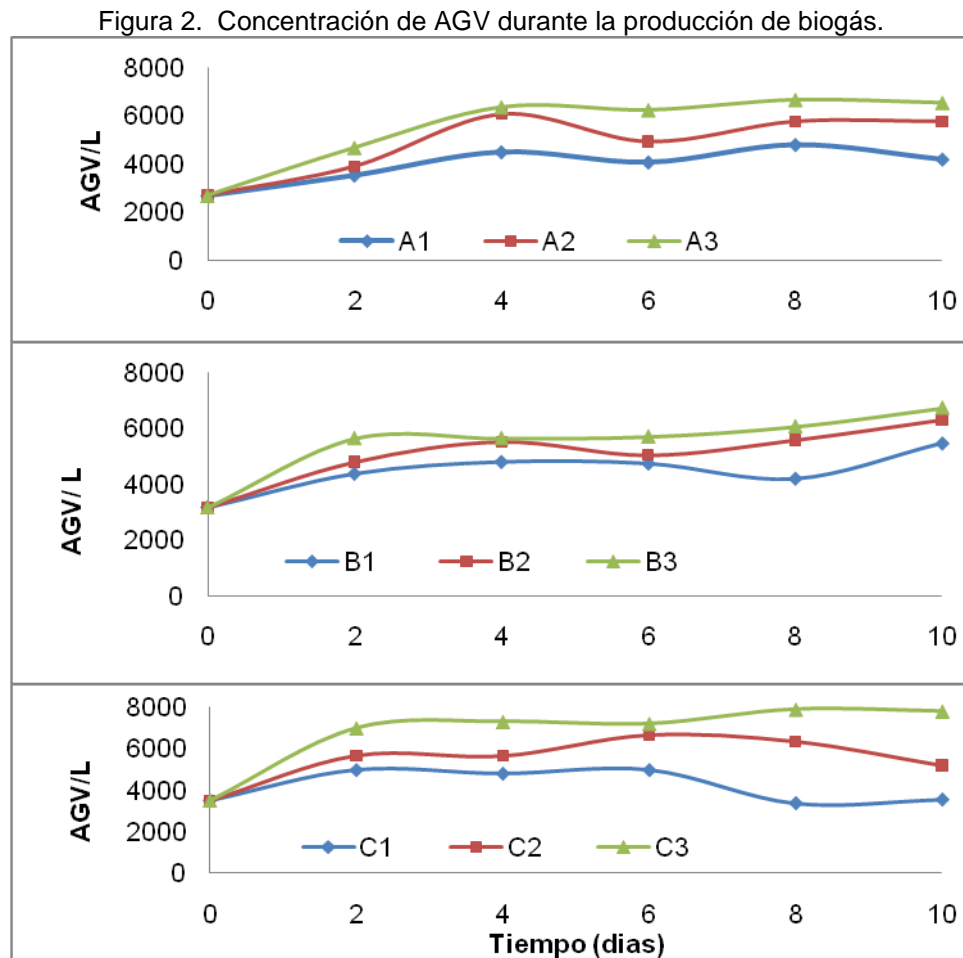
están presentes en LR [5]. Los microorganismos metabolizan los ARTs para producir ácido propiónico, ácido acético y butírico; lo cual se realiza con pH neutro o ligeramente alcalino [2].

Después del cuarto día de digestión la actividad enzimática de los microorganismos se estabiliza dentro del reactor debido al agotamiento de la fuente de carbono como factor limitante. En las tres escalas de volumen y agitación.

Al segundo día de operación se observa la mayor disminución de ARTs. En la medida que el proceso se realiza a una escala mayor, los experimentos que tienen mayor agitación (160 rpm) presentan un consumo de azúcares alto comparado con los que están agitados a 80 rpm y sin agitación. Este efecto se debe a que hay una mejora en los flujos de transferencia de masa entre las enzimas secretadas por los microorganismos y el sustrato [8].

En la figura 1 es de resaltar como las líneas de color verde, rojo y azul mantiene su orden decreciente de mayor a menor agitación conservándose a lo largo de las tres escalas. Lo anterior se debe que al comparar las tres graficas de ART muestren con claridad las tendencias de la agitación, que son el producto de la representatividad que tiene el escalado en este proceso.

Efecto de la agitación a diferentes escalas sobre la concentración de AGV durante el tiempo de digestión



Fuente: los autores del proyecto.

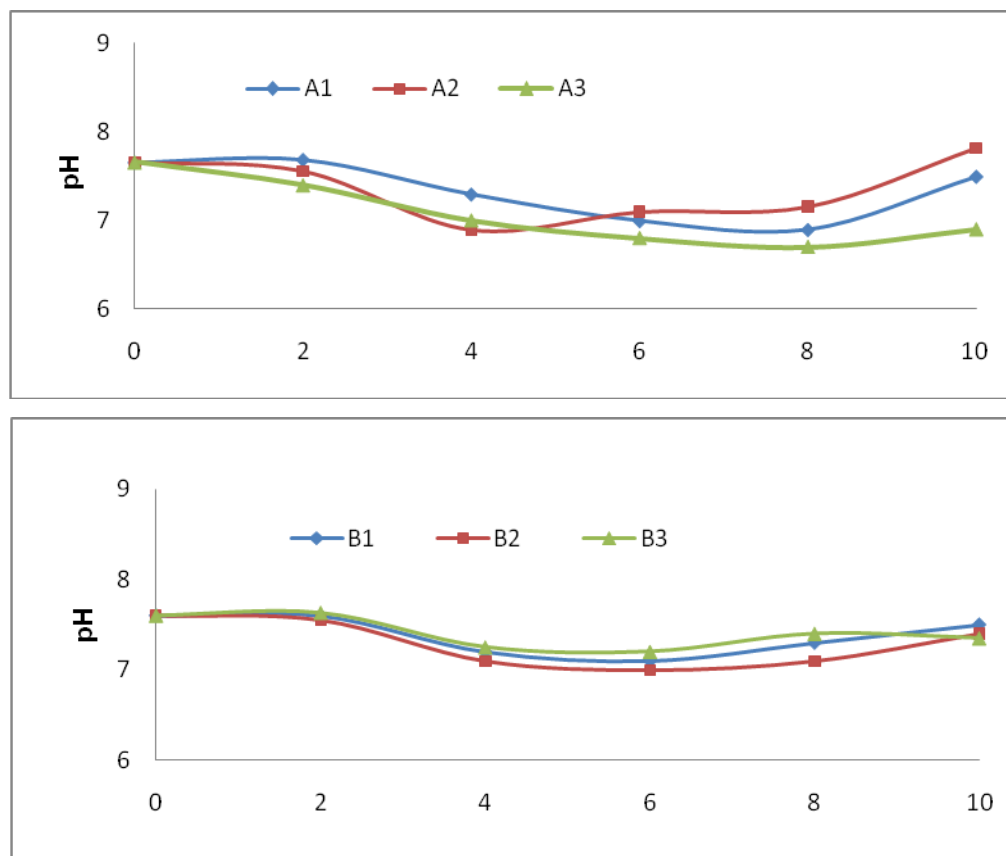
La acidogénesis es la etapa intermedia del proceso de DA, en la cual los compuestos orgánicos se convierten principalmente en AGV. Estos ácidos pueden ser: Acetato, propionato, butirato y valerato dependiendo del tipo de sustrato y de las condiciones de operación [8]. La concentración de AGV para la configuración de los ensayos se mantuvo en un intervalo entre 2500-8000 mg AGV/L garantizando la degradación de la materia orgánica presente en el proceso como se muestran en la figura 2. Los ensayos efectuados con agitación presentaron

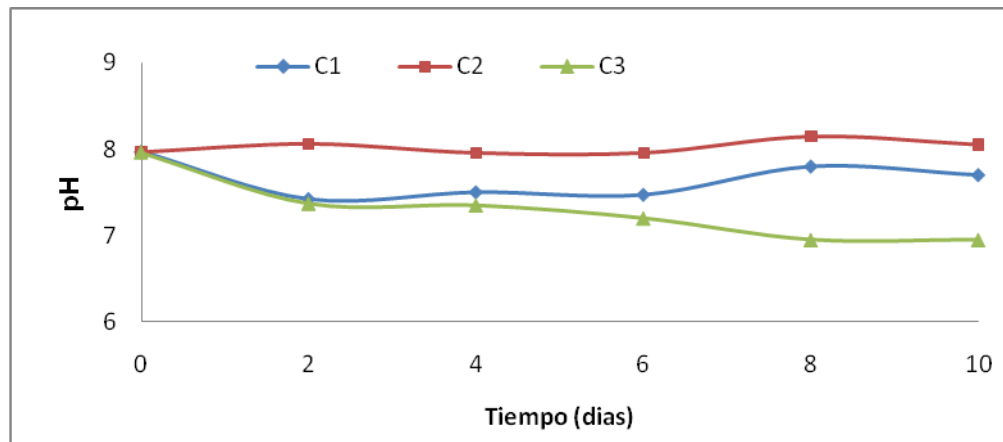
valores de concentración de AGV más elevados; demostrando la incidencia de esta variable en el bioproceso.

Estos resultados indican que las bacterias acidogénicas tienen un metabolismo más rápido a mayor agitación, por lo tanto aprovechan los azúcares remanentes en el reactor para convertirlos principalmente en acetato el cual posteriormente es convertido a metano [8].

Efecto del pH en el estudio de la agitación a diferentes escalas sobre la estabilidad del proceso de DA

Figura 3. Variación del pH durante la producción de biogás



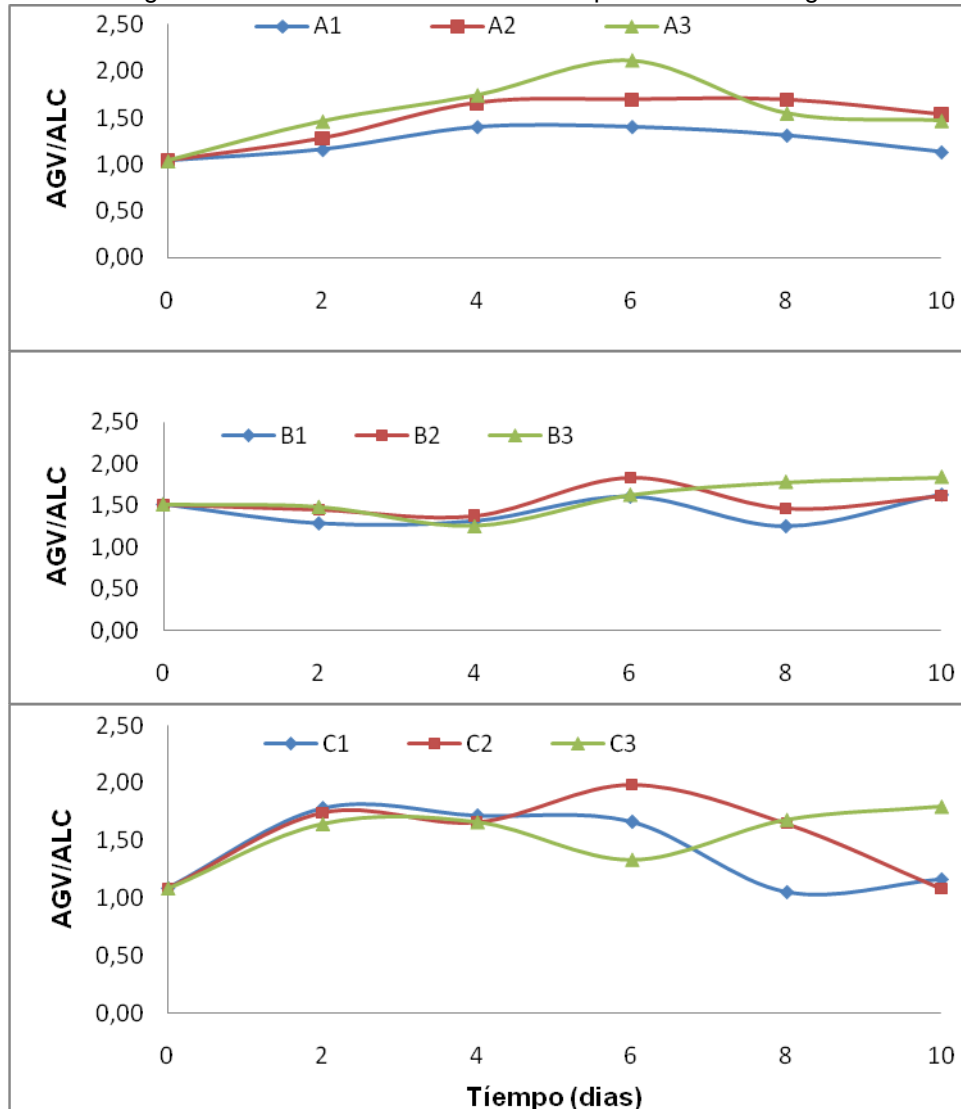


Fuente: los autores del proyecto.

El pH y la relación AGV/ALC total son variables que permiten conocer la estabilidad del proceso. Con el objeto de alcanzar una eficiente metanogénesis, los consorcios microbianos deben tener condiciones aptas para su crecimiento y metabolismo. De esta manera las bacterias hidrolíticas desarrollan eficientemente su metabolismo a pH neutros y/o ligeramente alcalinos, las bacterias acidogénicas crecen en ambientes ligeramente ácidos y los microorganismos metanogénicos en pH cercanos a la neutralidad [32, 33, 34, 35]. Los resultados hasta la fecha indican que el pH es crucial para la producción de H_2 debido a los efectos que estos implican en la etapa hidrolítica y las vías metabólicas y de cómo una adecuada agitación ayuda a la estabilización del proceso como tal [25].

En la figura 3 se puede apreciar, que el pH se encuentra en un intervalo entre 6,8 y 8,2 garantizando en el proceso de digestión la estabilización y favoreciendo la producción de AGV para cada una de las escalas con su respectiva agitación.

Figura 4. Relación AGV/ALC durante la producción de biogás.

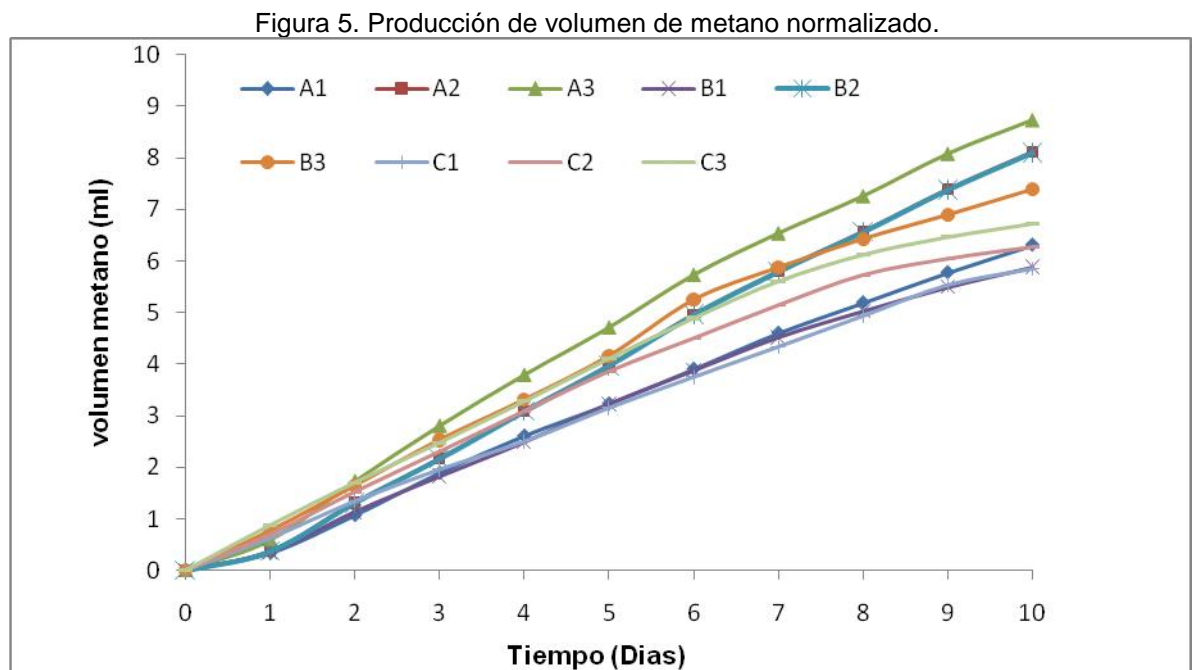


Fuente: los autores del proyecto.

La relación AGV/ALC total son variables que permiten conocer la estabilidad del proceso, se obtiene al evaluar la relación de acidificación con alcalinidad permaneciendo entre un rango 1,0-1,7 es concordante con el pH que se mantuvo estable durante el proceso, el cual es un rango adecuado para este tipo de bioprocesos sin riesgo de acidificación o de presentar una inhibición en el proceso que se puede constatar que no se presentó por los rendimientos de metano que nunca bajaron [31,13].

Efecto de la agitación a diferentes escalas sobre el volumen de metano.

Para comparar los volúmenes producidos de metano para cada una de las escalas fue necesario realizar una normalización dividiendo el volumen acumulado de metano en su respectiva escala. De esta manera se obtuvo una relación de escalas de 0-10. En la figura 5 se muestra la producción de volumen normalizado. Se observa que los experimentos sin agitación alcanzaron una producción de metano menor a los que fueron agitados.



Fuente: los autores del proyecto.

De los resultados anteriores se puede inferir que el consorcio microbiano de la etapa metanogénica manifiesta gran sensibilidad a los cambios de agitación y realiza su función con mejores rendimientos a 160 rpm; resultado que coincide con los reportados en la literatura [7, 8, 30]. Esto se debe a que a altas agitaciones los sustratos son más solubles en el medio y por consiguiente los microorganismos tienen mayor afinidad a la materia orgánica [7].

Rendimiento de metano

En la tabla 8 se exponen los rendimientos en metano como $\text{m}^3 \text{CH}_4 / \text{kg SV}$ adicionado. Debido a que la escala de 50 ml (A) es tan pequeña, la medición de los parámetros de respuesta no fue representativa debido a la heterogeneidad de la matriz, siendo necesario aumentar la escala en 500 ml (B) y 3500 ml (C).

El rendimiento de $0,36 \text{ m}^3 / \text{kg SV}$ conservo el mismo resultado publicados por Castro L. *et al*, en la misma escala y a las mismas condiciones de agitación [4].

Tabla 8. Rendimientos de biogás en DA de BF a diferentes volúmenes y agitación.

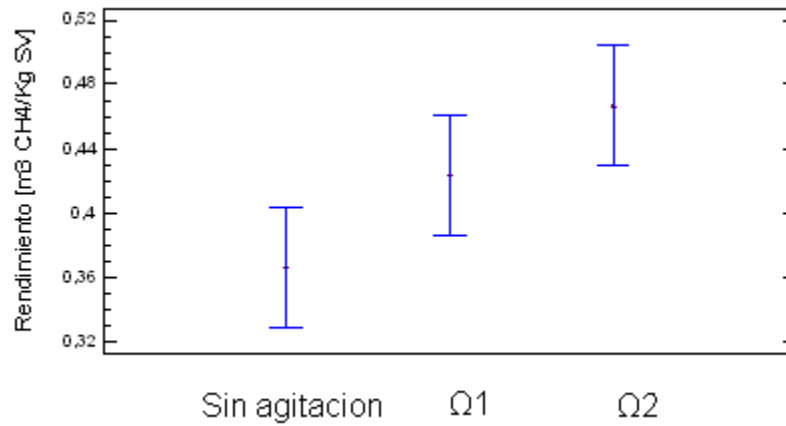
Escalas	1	2	3	Unidades
A	0,38	0,48	0,51	$\text{m}^3 / \text{kg SV}$
B	0,36	0,41	0,45	$\text{m}^3 / \text{kg SV}$
C	0,36	0,38	0,44	$\text{m}^3 / \text{kg SV}$

Fuente: los autores del proyecto.

Análisis estadístico de los resultados

La distribución de medias y medianas (figura 6) indica que existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los experimentos (sin agitación- Ω_2) a un nivel de confianza del 95 % con un valor de $-p$ de 0,0457. El estudio estadístico indica que la productividad de metano es mayor cuando se emplea agitación para el proceso.

Figura 6. Distribución de medias para los rendimientos sin agitación, A1 y A2.



Fuente: software *StatGraphics Centurion XV*, *StatPoint Inc., Virginia, EE.UU.*

Entre el ensayo $\Omega 1$ y $\Omega 2$ no se demuestran diferencias significativas. Esto es favorable en el momento de hacer la transferencia tecnológica del proceso pues se incurre en un menor gasto energético, obteniendo un biogás de excelente calidad y presentando un alto contenido de metano el cual puede ser aprovechado como energía eléctrica y/o calorífica [5, 17, 32].

4. CONCLUSIONES

La agitación es una variable de operación que incidió favorablemente en la producción de metano a partir de BF y mediante DA. La estabilidad del proceso se sustentó en los valores de pH obtenidos, los cuales estuvieron dentro del rango óptimo para digestores anaeróbicos.

Los rendimientos de la DA de BF para producir metano no se vieron afectados significativamente al incrementar la escala de operación sin embargo el proceso sí mostró mayor sensibilidad a las variaciones en la agitación; siendo más favorable realizar la bioconversión a una velocidad de agitación de 160 rpm.

Los resultados del análisis estadístico indicaron que no existen diferencias significativas sobre la producción de metano entre los rangos de agitación 80 rpm y 160 rpm en la escala de 50, 500, 3500 ml, lo cual es favorable para la transferencia tecnológica del proceso porque incurre en un menor gasto energético.

BIBLIOGRAFIA

- [1] LAZARO L., ARAUZO J. *Aprovechamiento de residuos de la industria de conservas vegetales*. Hidrolisis enzimática. Zubia, España. 1994.
- [2] DIAZ BÁEZ M., ESPITIA V. y MOLINA P. ed. *Digestión anaerobia, una aproximación a la tecnología*. Bogotá: Unibiblios, 2002.
- [3] BARRERA A. P., VILLAREAL S. M., CASTRO M. L., ORTIZ C., ESCALANTE H. H. *Estudio preliminar de la bioproducción de metano a partir de los residuos del proceso de beneficio del fique*, Ion, Vol. 22. No 1,2009.
- [4] CASTRO L., ESCALANTE H., QUINTERO M., ORTIZ C., GUZMÁN C., *Producción de Biogás a partir del bagazo de fique generado durante el beneficio de fique*. Cuarto Simposio de química aplicada SIQUIA. [Cuarto Simposio de química aplicada SIQUIA]. ISBN 978-958-8593-12-8. 2009.
- [5] AYMERICH D. *Alternativas de Co-tratamiento biológico de residuos agroindustriales*. Valorización agronómica del producto final universidad de Navarra pamplona España oct, pp. 65-80,2007.
- [6] GRIFFIN M., McMahon D., Mackie R., Raskin L. *Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids*. Biotechnology and bioengineering.1998, pp. 342-354.
- [7] MAGAÑA L., TORRES E., MARTINEZ M., SANDOVAL C., HERNANDEZ R. *Producción de biogás a nivel laboratorio utilizando estiércol de cabra* Universidad de Guanajuato México 2006.

- [8] PINHO C., SAMANTHA C., RATUZNEI M., DOMINGUES J., FORESTI E., ZAIAT M. *Feasibility of treating partially soluble wastewater in anaerobic sequencing batch biofilm reactor, (CSTR), with mechanical stirring*, Bioresource Technology, pp.517–519,2004.
- [9] CASTILLO E., CRISTANCHO D., ARELLANO V. *Estudio de las condiciones de operación para digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos*, Biotecnología vol. V, pp 11-20,2003.
- [10] MICHELAN R., ZIMMER T., RODRIGUES J., RATUZNEI S, FORESTI E., MARCELO ZAIAT. *Effect of impeller type and mechanical agitation on the mass transfer and power consumption aspects of ASBR operation treating synthetic wastewater*, *Journal of environmental management*, 2008.
- [11] BRUCE E. Rittmann, Perry L. McCarty, *Biotecnología Del Medio Ambiente Principios Y Aplicaciones*, vol. 5, reactores, pp. 253-259.
- [12] GODIA F., CASABLANCAS C. Sola F., *Ingeniería bioquímica*. Vol. 12 cambios de escala en bioreactores, pp. 303-313,2006.
- [13] DINSDALE R., PREMIER G., HAWKES F., HAWKES D., *Two-stage anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters*. Bioresource Technology,2000.
- [14] ORTEGA, N., *Phosphorus precipitation in anaerobic Digestion Process*; 11, 12, ISBN: 1-58112-332-9,2002.
- [15] YANEZ F. *Digestión Anaerobia* centro panamericano de ingeniería sanitaria CEPIS, pp. 1-10,2007.
- [16] CAMPOS A. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante la co-digestion con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. U LLEIVA. pp. 37-40,2001.

- [17] MADIGAN J., PARKER J. Brock. *Biología de los microorganismos*. Prentice Hall Iberia: Madrid, 8 ed, pp. 562-564,1999.
- [18] HILBERT, J. A. *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A.- Castelar, 2005.
- [19] KHANAL S., *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. Principles and applications*. Blackwell, ISBN: 978-0-813-82346-1,2008.
- [20] IDAE. *Que es el biogás*. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía. C/Madera, 8 – 28004, Madrid España, 2008.
- [21] YADVIKA, *et al*, Enhancement of biogás production from solid substrates using different techniques-science-direct, pp 4-7,2004.
- [22] ARZUAGA J, Rodríguez A, Serrano W. *Diseño y construcción de un biorreactor para la fermentación en estado solido de residuos orgánicos y su transformación en biocompost*, pp. 71 – 79, UIS 1999.
- [23] ARANGO M., MAYA D., SAENZ G. *Escalado de productos obtenidos en procesos por tandas y semicontinuos de polimerización por etapas y en cadena* Universidad Pontificia Bolivariana Medellín, pp. 50-60,2006.
- [24] DIAZ BÁEZ M., ESPITIA V. y MOLINA P. ed. *Digestión anaerobia, una aproximación a la tecnología*. Bogotá: Unibiblios, 2002.
- [25] SANDOVAL C., MENDOZA M., CARRENO M., CASTILLO E., *Microbiological characterization and specific methanogenic activity of anaerobe sludges used in urban solid waste treatment. Waste Management*. Vol. 29, pp. 704–71,2009
- [26] APHA, American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Water and wastewater*, Vol. 18 (20), pp. 25-32,1998.

- [27] GUITIERREZ PULIDO H., Análisis y diseño de experimentos. México: Mc Graw Hill. 2008.
- [28] YUNQIN, L., DEHAN. SHAOQUAN, W., CHUNMIN, W. *Alkali Pretreatment enhances biogas production in the anaerobic digestion of pulp and paper sludge.* Journal of Hazardous Materials, 366-373,2009.
- [29] WARD, A., HOBBS, P., HOLLIMAN, P., JONES, D. *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources.* Bioresource technology, pp.7928-7940,2008.
- [30] CHIA-HUNG CHOU , WANG-WEI CHENG, HUANG CHIEH-JEN, JYI JIUNN LAICOS, Pilot study of the influence of stirring and pH on anaerobes converting high-solid organic wastes to hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy, Volume 33, Issue 5, March, pp 1550-1558,2008.*
- [31] DE LA RUBIA M., RAPOSO F., RINCÓN B., BORJA R., *Evaluation of the hydrolytic-acidogenic step of a two-stage mesophilic anaerobic digestion process of sunflower oil cake.* Bioresource Technology, Vol. 100, pp. 4133-4138,2009.
- [32] MANDUJANO P., Digestión Anaerobia de Sólidos en Alta Concentración. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2001.