

Modelamiento computacional de la producción de energía renovable a partir del biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino

FECHA DE RECEPCIÓN: 9 de junio
FECHA DE APROBACIÓN: 12 de julio
Pp.42-63

Edwin Dario Cendales L.*
Silvio Alejandro Jiménez C.**

Computational modeling of renewable energy production using biogas through anaerobic co-digestion from the mixture of citric residuals and bovine manure.

Modélisation informatique de la production d'énergie renouvelable à partir de biogaz par transformation anaérobique du mélange de résidus d'agrumes et de fumier de bovins

Modelamento computacional da produção de energia renovável a partir de biogás através da co-digestão anaeróbica da mistura de resíduos cítricos e esterco bovino.



*Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia.
Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia.

** Maestría en Docencia Universitaria. Universidad de la Salle.
Ingeniero mecánico. Universidad Nacional de Colombia.

RESUMEN

En esta investigación se llevó a cabo la simulación computacional del proceso de digestión anaeróbica de la mezcla homogeneizada de estiércol bovino y residuos cítricos, con el fin de evaluar la viabilidad de la generación de energía renovable a partir de la codigestión de estos residuos. Tomando como base los resultados obtenidos previamente mediante el desarrollo de la etapa experimental, en la cual se realizaron mediciones periódicas de las variables de control del proceso de biodegradabilidad anaeróbica tales como pH, alcalinidad, demanda química de oxígeno (total y soluble), entre otras, se establecieron los parámetros de desempeño del proceso y se determinaron los valores de comparación entre los resultados experimentales y los resultados computacionales.

Adicionalmente, se realizó la simulación del proceso de digestión anaeróbica bajo condiciones similares a las establecidas previamente en otra investigación a partir de ensayos experimentales, mediante la implementación del modelo ADM-1. Con base en los resultados obtenidos a través de las mediciones experimentales y las simulaciones, se evaluó la precisión del modelo respecto a los valores de las mediciones experimentales. Finalmente, se implementó un modelo simplificado para la evaluación de la energía producida por una instalación a escala piloto, que realiza el tratamiento anaeróbico del residuo orgánico bajo estudio. El modelo mostró que inicialmente existe un déficit energético para que el proceso ocurra, sin embargo, una vez la producción de biogás inicia el proceso se hace autosustentable y el sistema entrega una cantidad creciente de energía disponible.

ABSTRACT

In this research a computational simulation of the process of anaerobic digestion was carried out, using a homogenous mixture of bovine manure and citric residuals to assess the viability of renewable energy generation from the co-digestion of these residuals. In accordance with the former outcomes, an experimental stage was carried out in which periodic measurements of the control variables of anaerobic biodegradability were taken such as pH, alkalinity, oxygen chemical demand (total and soluble), among others. Also, process performance parameters were established and comparative values between experimental outcomes and computational results were determined.

Additionally, a simulation of the anaerobic digestion process was carried out under similar conditions formerly established in a previous research through different experiments using the ADM-1 model. Based on the expected outcomes and as a result of experiments and simulations, the model precision was evaluated taking into account the values obtained from experimental measurements. Finally, a simplified model was implemented to evaluate energy production by a pilot-scale installation which performs the anaerobic treatment of organic residuals under observation. This model showed that there was an energetic deficit at the beginning; however, once the biogas production started the process, it became auto-sustainable and the system provided an increasing amount of available energy.



Palabras clave

*Digestión anaeróbica
Biodegradabilidad
Estiércol bovino
Residuos cítricos
Biogás
Metano*



Keywords

*Anaerobic digestion
Biodegradability
Bovine manure
Citric residuals
Biogas and methane*

RESUMÉE

Dans cet article nous avons simulé par ordinateur le processus de digestion anaérobique d'un mélange homogénéisé de fumier bétail et de résidus d'agrumes afin d'évaluer la viabilité des énergies renouvelables à partir de la transformation des déchets. Sur la base des résultats obtenus et grâce au développement de la phase expérimentale lors de laquelle étaient mesurées de façon périodiques les variables de contrôle du processus de biodégradation anaérobique tels que le pH, l'alcalinité, la demande chimique en oxygène (total et soluble), nous avons établi les performances des paramètres du processus et déterminé des valeurs pour la comparaison entre résultats expérimentaux et résultats informatiques.

Nous avons en outre réalisé une simulation du processus de digestion anaérobique dans des conditions similaires à celles précédemment établis par d'autres essais expérimentaux à travers la mise en œuvre du modèle ADM-1. Grâce aux résultats obtenus par le biais de simulations et mesures expérimentales, nous avons évalué la précision du modèle concernant les valeurs des mesures expérimentales. Un modèle simplifié pour l'évaluation de l'énergie produite par une installation à échelle réduite qui effectue le traitement anaérobique des résidus organiques a finalement été mis en place. Le modèle a montré qu'il existe au départ un déficit énergétique pour que le processus se réalise, mais une fois la production de biogaz enclenchée, le processus devient autonome et le système fournit une quantité croissante d'énergie disponible.

RESUMO

Nesta pesquisa foi feita a simulação computacional do processo de digestão anaeróbica da mistura homogeneizada de esterco bovino e resíduos cítricos com o propósito de avaliar a viabilidade da geração de energia renovável a partir da co-digestão destes resíduos. Baseados nos resultados obtidos anteriormente, e mediante o desenvolvimento da etapa experimental na qual foram realizadas medições periódicas das variáveis de controle do processo de biodegradabilidade anaeróbica tais como pH, alcalinidade, demanda química de oxigênio (total e solúvel), entre outras, estabeleceram-se os parâmetros de desempenho do processo e foram determinados os valores de comparação entre os resultados experimentais e os resultados computacionais.

Adicionalmente, realizou-se a simulação do processo de digestão anaeróbica em condições semelhantes às estabelecidas previamente em outra investigação a partir de ensaios experimentais, através da implementação do modelo ADM-1. Baseados nos resultados obtidos através das medições experimentais e as simulações, a precisão do modelo foi avaliada com respeito aos valores das medições experimentais. Finalmente, implementou-se um modelo simplificado para a avaliação da energia produzida por uma instalação a escala piloto que realiza o tratamento anaeróbico do resíduo orgânico em estudo. O modelo mostrou que inicialmente existe um déficit energético para que o processo ocorra; contudo, uma vez a produção de biogás começa, o processo se torna autosustentável e o sistema entrega uma quantidade crescente de energia disponível.



Mots clefs

*Biodégradabilité
Effluents d'élevage
Résidus d'agrumes
Méthane
Biogaz
Digestion anaérobique*



Palavras-chave

*Digestão anaeróbica
Biodegradabilidade
Esterco bovino
Resíduos cítricos
Biogás
Metano*

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el uso de los combustibles fósiles ha incrementado significativamente la emisión de gases que generan el denominado efecto invernadero. Por otra parte, millones de toneladas de desechos orgánicos biodegradables son generados cada año por los sectores agropecuarios, municipales e industriales en todo el mundo, de los cuales un gran porcentaje son finalmente dispuestos en rellenos sanitarios (Parker, 2005). La digestión anaeróbica, es un conjunto de procesos bioquímicos desarrollados en un ecosistema libre de oxígeno, mediante los cuales se logra la desintegración, transformación y estabilización de la materia orgánica biodegradable, a través de la acción conjunta de varios grupos de microorganismos. Como productos finales del desarrollo de este proceso, se obtienen una mezcla gaseosa conocida como biogás, la cual está compuesta principalmente por gases como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2); además del fango efluente digerido, el cual presenta gran cantidad de nutrientes propicios para la fertilización de terrenos cultivables (Khanal, 2008). La digestión anaeróbica de los residuos agropecuarios provenientes de las explotaciones ganaderas, representa una opción viable como fuente de energía, sin embargo, la producción reducida de biogás a partir de estos residuos no justifica el costo de inversión de los sistemas de tratamiento.

No obstante, la productividad de biogás y metano puede ser incrementada drásticamente mediante la codigestión de los residuos ganaderos y los desechos que se generan durante la cosecha o procesamiento de los productos agrícolas, debido a la acción sinérgica que presenta el gran contenido de nutrientes disponibles para el desarrollo de las poblaciones microbianas responsables del proceso (Nordberg & Edstrom, 2005; Callaghan, Wase, & Thayanithy, 1999; Neves, Oliveira, & Alves, 2004; Gunaseelan, 2007; APHA, 2005).

El aumento en el costo de los combustibles convencionales, ha acentuado el interés en el desarrollo de nuevas fuentes de energía renovable. La utilización del metano contenido en el biogás, puede llegar a

reemplazar gradualmente los combustibles fósiles, debido a la rentabilidad específica que genera la producción de este biocombustible y la característica de carbono neutro que presenta (ASTM, 1192; Batstone, 2000; Gunaseelan, 2007). Debido a que la cantidad de metano generado y el porcentaje de reducción de la demanda química de oxígeno durante la digestión anaeróbica depende de la eficiencia del proceso bioquímico, es necesario realizar la optimización operacional de las instalaciones destinadas al tratamiento de aguas residuales y residuos orgánicos biodegradables.

A partir de la década de 1970, surgió la necesidad de utilizar modelos matemáticos para la predicción del comportamiento del tratamiento anaeróbico dentro del amplio rango de las condiciones de operación. Por tal razón, se desarrollaron modelos sencillos compuestos por un número limitado de ecuaciones y aplicabilidad específica (Thamsiriroj & Murphy, 2011; Andrews & Graef, 1971; Blumensaat & Keller, 2005; Hill, 1982). Estos primeros modelos desarrollaban la simulación de los procesos bioquímicos mediante la simplificación de las cinéticas de las reacciones bioquímicas y la composición de los sustratos complejos. La necesidad de predecir el comportamiento del sistema con una precisión confiable, motivó el desarrollo de modelos más sofisticados que permitieran representar el impacto de las condiciones transitorias sobre las especies químicas y biológicas involucradas en el proceso anaeróbico. Como respuesta a la necesidad de un modelo genérico para la simulación de la digestión anaeróbica, en el año 2002 se desarrolló el Modelo de Digestión Anaeróbica (ADM-1, por sus siglas en inglés), por parte de la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés). Este modelo fue desarrollado bajo la consideración de generar una base común para la producción de modelos subsecuentes y la capacidad de permitir la comparación de resultados entre diferentes estudios sobre sustratos similares (Batstone et al., 2002; Batstone, 2000; Blumensaat & Keller, 2005; Parker, 2005). Las principales aplicaciones del modelo ADM-1, son la simulación de procesos en estado transitorio y el modelamiento en las etapas de diseño, operación

y optimización de plantas de tratamiento de diversos residuos orgánicos biodegradables.

El objetivo central de esta investigación, es evaluar la producción y composición del biogás generado durante la digestión anaeróbica de la mezcla homogeneizada de residuos cítricos y estiércol bovino, mediante la utilización de los ensayos de biodegradabilidad anaeróbica, los cuales están basados en metodologías estandarizadas (ISO, 1995; ASTM, 2000; Owen et al., 1978; Owens & Chynoweth, 1993).

Simultáneamente, se implementó el modelo ADM-1, tomando como referencia las mediciones realizadas sobre el sustrato para los parámetros de control del proceso como pH, alcalinidad, contenido de ácidos grasos volátiles, demanda química de oxígeno total y soluble. El modelo ADM-1, fue implementado en la

plataforma de Matlab/Simulink, en forma de diagramas de bloques para la representación de las ecuaciones que conforman el modelo. Inicialmente, se evaluó la precisión numérica de esta simulación con respecto de otra implementación en la misma plataforma pero desarrollada mediante código C y funciones C-S-MEX (Rosen et al., 2006). Posteriormente, se estableció la implementación del modelo con el fin de simular el proceso de digestión anaeróbica bajo condiciones similares a las existentes, durante el desarrollo de la fase experimental. Con base en esta última implementación, se compararon los resultados que generó el modelo y los resultados obtenidos de las mediciones desarrolladas. Finalmente, se implementó un modelo simplificado para estimar el potencial energético de generación en una instalación a escala piloto, con base en los resultados obtenidos de la simulación de dicho modelo.

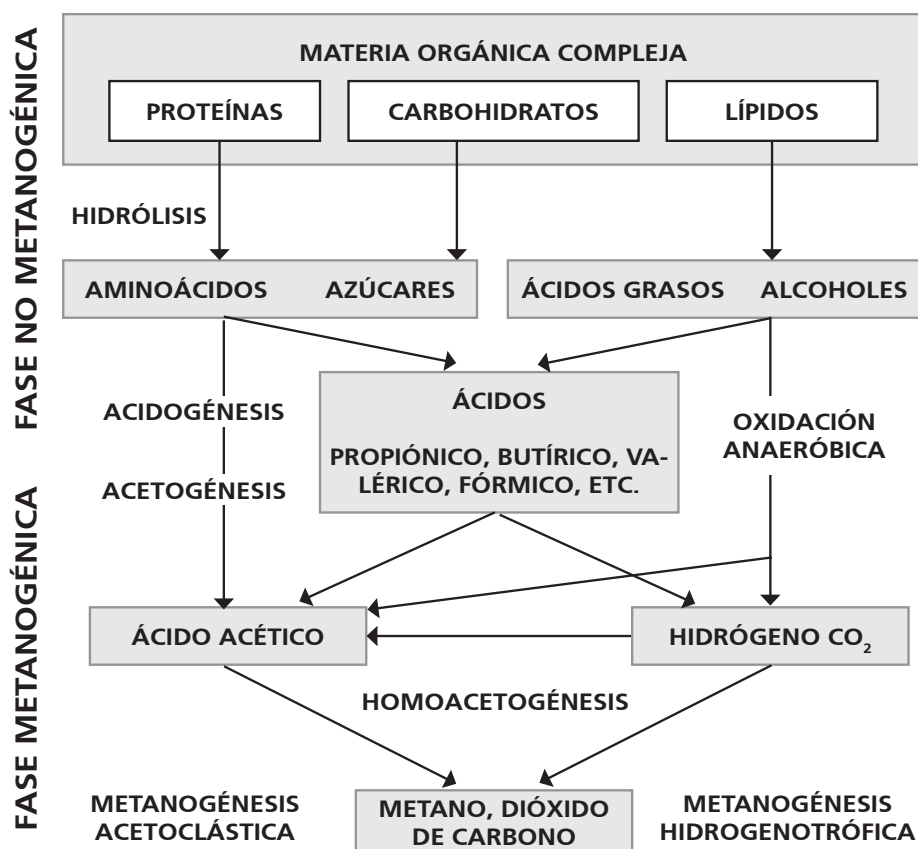
2. DIGESTIÓN ANAERÓBICA

El proceso anaeróbico ha sido estudiado con bastante profundidad desde el punto de vista bioquímico y microbiológico, con lo cual se han establecido dos fases principales constituidas por varios subprocesos mediante los cuales se desarrolla la transformación de las moléculas que conforman la materia orgánica biodegradable. Estas fases son la fase no metanogénica y la fase metanogénica, respectivamente. La clasificación de cada una de estas, se realiza de acuerdo con las características que presentan los conjuntos de poblaciones de microorganismos que desarrollan los subprocesos que conforman cada fase, los cuales pueden ser tanto del tipo facultativo, como de naturaleza anaeróbica estricta (Prescot y Harley, 2002; [Madigan, Martinko y Parker, 1999]). En este artículo, se presenta el diagrama general de las transformaciones bioquímicas que se suscitan en el proceso de digestión anaeróbica (Figura 1). Se

muestra cómo los constituyentes complejos de la materia orgánica biodegradable son desintegrados en moléculas más simples, como los carbohidratos (polisacáridos), las proteínas y los lípidos, los cuales posteriormente sirven como materia prima para el desarrollo de los procesos subsecuentes.

En esta fase, tienen lugar dos subprocesos que se realizan de forma simultánea; en primer lugar, ocurre la hidrólisis de los carbohidratos, proteínas y lípidos. Seguidamente, ocurre la fermentación (acidogénesis) de los metabolitos generados durante la hidrólisis. Como producto de la fermentación se obtienen los ácidos grasos volátiles y dióxido de carbono, los cuales son transformados posteriormente en acetato (acetogénesis) y finalmente a metano, durante la fase metanogénica del proceso de digestión anaeróbica (Batstone et al., 2002; Pavlostathis y Giraldo, 1991; Khanal, 2008).



Figura 1. Esquema general de transformaciones bioquímicas durante el proceso de digestión anaeróbica.

Fuente. Pavlostathis y Giraldo, 1991.

La diferencia fundamental entre las fases no metanogénica y metanogénica, subyace en la facultad aeróbica que presentan los procesos que conforman la fase no metanogénica, los cuales pueden desarrollarse en presencia del oxígeno; los subprocesos que corresponden a la fase metanogénica, solo puede realizarse dentro de un ambiente anaeróbico estricto debido a la toxicidad que desarrolla el oxígeno sobre los microorganismos metanogénicos (Prescott, Harley y Klein, 2002). En la etapa de acetogénesis, se realiza la conversión bioquímica de los productos de la acidogénesis mediante dos mecanismos de reacción: la acetogénesis acetoclástica y la homoacetogénesis hidrogenotrófica (Pavlostathis y Giraldo, 1991). Mediante el primer mecanismo, algunos metabolitos como valerato, butirato y propionato, son transformados en acetato e hidrógeno para que puedan ser aprovechados posteriormente por los microorganismos metanogénicos. El segundo mecanismo de

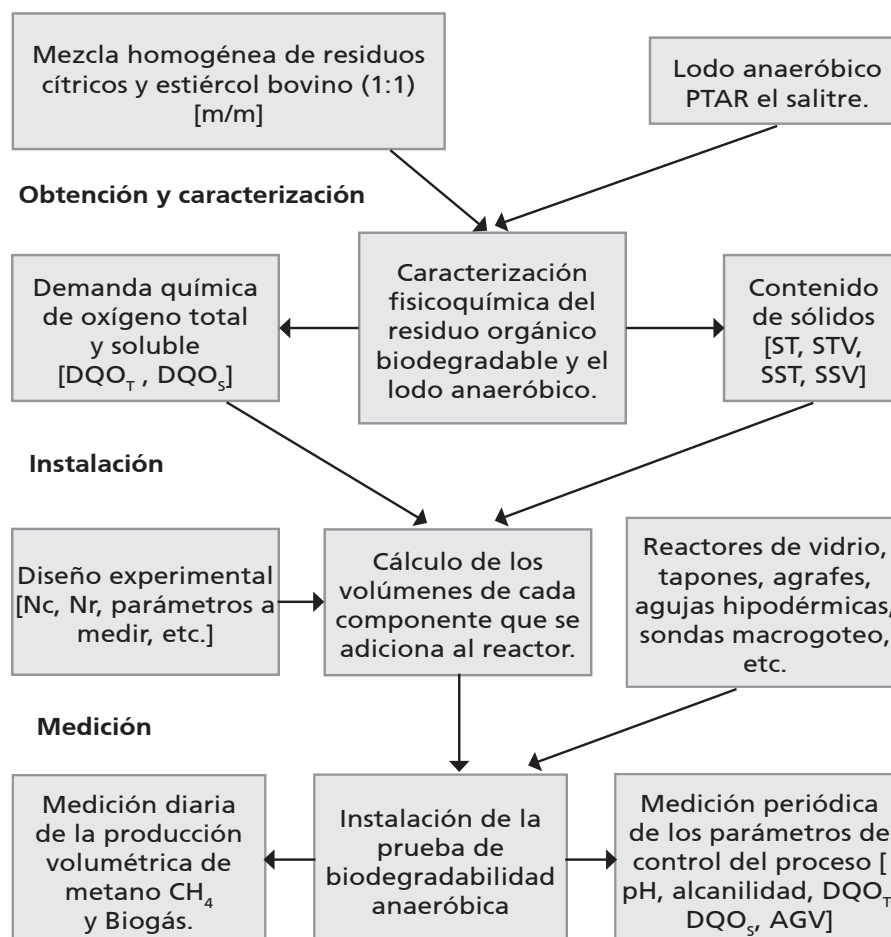
reacción, implica la síntesis del acetato a través del consumo de hidrógeno y dióxido de carbono. Las reacciones acetogénicas requieren la adición de energía, lo cual implica la interacción entre las poblaciones de microorganismos acetogénicos y los microorganismos que consumen hidrógeno (Stams, 1994). Finalmente, las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación del metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente tales como acetato, formato, metanol y algunas metilaminas. Es posible establecer una clasificación de las bacterias metanogénicas de acuerdo con el sustrato que utilizan dentro de su metabolismo, dividiéndose en los grupos hidrogenotróficos, los cuales consumen hidrógeno y ácido fórmico; y los grupos denominados metilotróficos o acetoclásticos, los cuales metabolizan los grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas (Madigan, Martinko y Parker, 1999).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El montaje de los ensayos de biodegradabilidad anaeróbica, se realiza en reactores por tandas (tipo Batch), en los cuales el sustrato se incubaba en botellas cerradas, mezclado con un volumen determinado de inóculo con una baja concentración de carbono inorgánico y soluciones químicas, que permiten el completo desarrollo de las poblaciones bacterianas.

Adicionalmente, se montan reactores que contienen únicamente inóculo y soluciones minerales, con el fin de comparar las mediciones realizadas sobre estos reactores y los reactores con mezcla sustrato/inóculo, lo que permite establecer la producción neta del metabolito evaluado. La incubación se lleva a cabo en frascos sellados mantenidos a una temperatura de 30°C +/- 2°C por un periodo mayor a 30 días. Los frascos pueden tener un volumen total de entre 60ml y 1000ml, considerando el volumen de la fase gaseosa en un porcentaje entre 10% y 30% del volumen total del reactor. El ensayo se considera válido si se obtiene un porcentaje de degradación mayor al 60% a un pH en el rango de 7+/-1 (ASTM, 1992; ISO, 1995). El diseño experimental implementado, consistió en la utilización de tres razones de carga orgánica (razón sustrato/inóculo), correspondientes a los valores (1:1, 2:1 y 3:1), de las cuales se montaron cuatro reactores para las cargas (1:1 y 3:1) y dos reactores para la carga (2:1). Esta configuración fue escogida debido a la restricción de espacio en el baño termostático disponible para la realización de los ensayos de este estudio. El diseño experimental, contempló la realización de cinco mediciones periódicas de los parámetros de control del proceso sobre los reactores con las razones de carga

(1:1 y 3:1), desarrolladas sobre muestras tomadas en el momento de realizar el montaje y sobre muestras tomadas de los cuatro reactores que se descartaron periódicamente. De manera similar, sobre la razón de carga (2:1), se desarrollaron tres mediciones realizadas en tiempos equidistantes con respecto de la duración total determinada para el ensayo; estas mediciones se realizaron sobre una muestra tomada en el momento del montaje de los ensayos y sobre muestras obtenidas al descartar periódicamente cada uno de los dos reactores utilizados en el ensayo para esta razón de carga. Dado que la producción de metano y biogás son los parámetros clave para la determinación de la biodegradabilidad anaeróbica, se incluyó dentro del plan experimental el seguimiento de la producción volumétrica diaria y acumulada de cada uno de estos gases, medidos mediante la técnica de desplazamiento volumétrico. Por consiguiente, las mediciones del gas metano generado se desarrollaron sobre los reactores de tratamiento instalados (cuatro para cada una de las razones de carga 1:1 y 3:1; dos para la razón de carga 2:1 y uno para el reactor de control con lodo). La medición de la producción de biogás generado, se desarrolló sobre los reactores adicionales instalados (uno para cada una de las razones de carga evaluadas). Los ensayos de biodegradabilidad anaeróbica del residuo bajo estudio, se realizaron en las instalaciones del laboratorio de operaciones y procesos, perteneciente al laboratorio de ingeniería ambiental de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá; la metodología utilizada en el montaje de estos ensayos, se basó en el desarrollo de las etapas mostradas en forma de diagrama (Figura 2).

Figura 2. Esquema general de procedimientos realizados para el montaje de las pruebas de biodegradabilidad anaeróbica.

Fuente. Elaboración propia de los autores.

3.1 Análisis fisicoquímicos

Mediante el diseño del experimento, se adoptó por realizar la medición analítica de la DQO total, DQO soluble, pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, volumen de biogás y gas metano generado, los cuales fueron determinados de acuerdo con las metodologías establecidas (APHA, 2005). Sin embargo, para la determinación del contenido de ácidos grasos volátiles, se utilizó una metodología empírica (Collazos, 2000;

Montgomery, Dymock & Thom, 1962). Estas mediciones se realizaron sobre las muestras obtenidas a partir de los sustratos correspondientes a los reactores descartados periódicamente para cada una de las razones de carga. Las mediciones se establecieron con el fin de obtener curvas de tendencia de estos parámetros, las cuales pueden ser comparadas frente a las gráficas similares generadas mediante la implementación del modelo ADM-1. Se resumen a continuación los parámetros determinados durante el ensayo de biodegradabilidad anaeróbica y el método utilizado en la determinación del parámetro (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos empleados en la determinación de los parámetros fisicoquímicos.

PARÁMETRO	MÉTODO / TÉCNICA
Sólidos totales	APHA / SM 2540-B
Sólidos volátiles totales	APHA / SM 2540-B
Sólidos suspendidos totales	APHA / SM 2540-D
Sólidos suspendidos volátiles	APHA / SM 2540-D
Alcalinidad	APHA 2330-B
DQO total / DQO soluble	APHA / SM 5220-C
Ácidos grasos volátiles (AGV)	Espectrofotométrico
pH	APHA 4500 H+ -B
Volumen de metano	Volumétrico
Volumen de biogás	Volumétrico

Fuente. Elaboración propia de los autores.

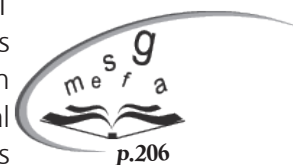
3.2 Implementación del modelo ADM-1 en Matlab/Simulink

Para el desarrollo de la implementación del modelo ADM-1 en la plataforma mencionada, se representaron las ecuaciones que describen los procesos de conversión bioquímica así como para los procesos fisicoquímicos de equilibrio ácido-base y transferencia de masa entre las fases líquida y gaseosa mediante ecuaciones diferenciales ordinarias y ecuaciones diferenciales algebraicas, desarrolladas en forma de diagramas de bloques, utilizando la versatilidad de la plataforma Matlab/Simulink. Los valores de los parámetros de entrada del modelo, fueron tomados de los valores presentados en el reporte técnico del modelo ADM-1.

3.3 Validación del modelo a partir del caso base ADM-1

Para realizar la validación del modelo, se utilizó otra implementación generada en la misma plataforma mediante la cual pudo establecerse la precisión numérica de la implementación desarrollada mediante diagramas de bloques. Esta segunda implementación desarrollada

por Rosen et al. (2006), utiliza funciones MEX y código C para la resolución del modelo ADM-1 incorporando un algoritmo específico para calcular la concentración del hidrógeno en fase líquida (Sh2Solver) y el valor del pH (pHSolver). De esta forma, se realizó la evaluación del comportamiento del modelo bajo las dos implementaciones mencionadas, utilizando los valores reportados para el caso base de ADM-1 (Batstone et al., 2002). De acuerdo con los resultados de esta comparación, se observó la precisión y la convergencia relativa de los valores obtenidos mediante las dos implementaciones; esto permitió asegurar la conveniencia de utilizar la implementación del modelo ADM-1, basada en diagramas de bloques con el fin de simular el proceso de biodegradabilidad anaeróbica desarrollado en la etapa experimental de esta investigación. Con el objetivo de realizar la implementación del modelo ADM-1 para simular las condiciones en las cuales se desarrolló el proceso de digestión anaeróbica durante la fase experimental de este estudio, se establecieron los valores de las concentraciones iniciales de los metabolitos considerados por el modelo, con base en las mediciones de los parámetros fisicoquímicos, y la utilización de una metodología que describe el fraccionamiento de la DQO en sus componentes, los cuales corresponden a los valores de las variables de estado del modelo ADM-1.

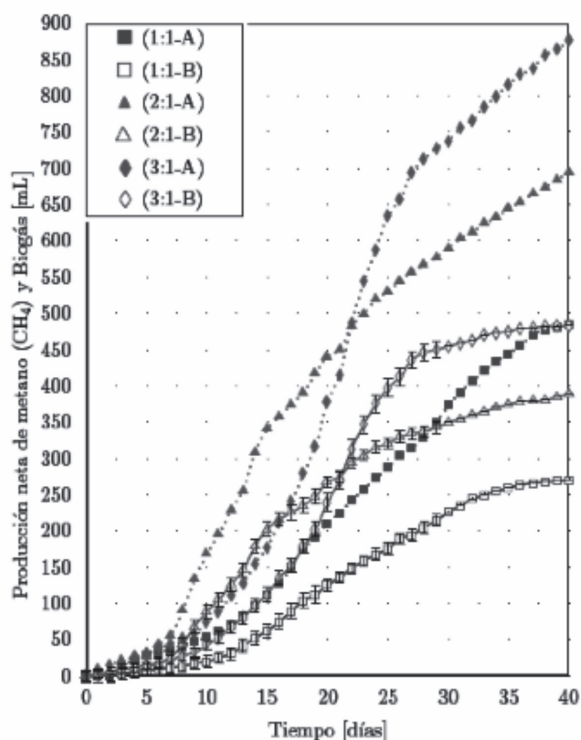


4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

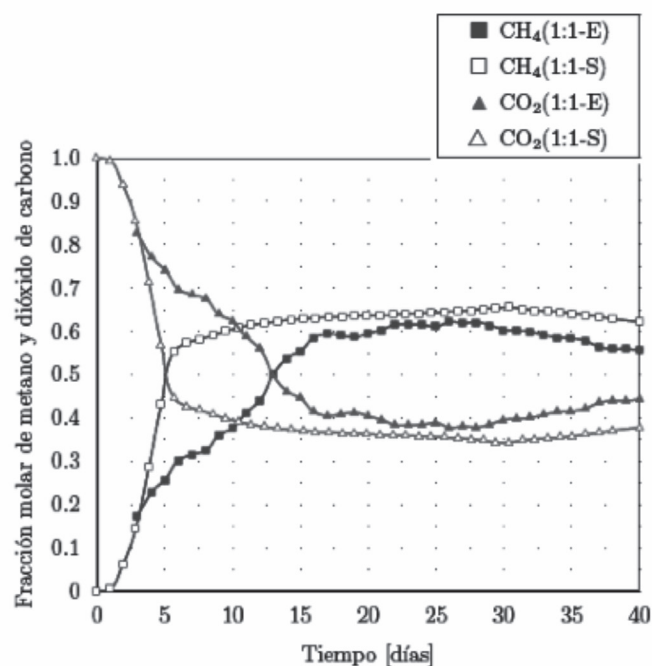
A partir de las tres simulaciones desarrolladas, una para cada razón de carga orgánica, se generaron las figuras para los parámetros de pH, al calinidad, contenido de ácidos grasos volátiles, demanda química de oxígeno soluble, producción de gas metano y la composición del biogás. Estas se compararon con las figuras obtenidas a partir de las mediciones experimentales. Así se comparan las curvas simuladas y las curvas establecidas mediante la medición de gas metano generado durante el desarrollo experimental (Figura 3a). Se observan diferencias entre ambos tipos de curvas, especialmente en la

velocidad de generación del metano para cada razón de carga y la duración de la fase inicial de adaptación. Sin embargo, se distingue la relativa convergencia que presentan ambos tipos de curvas, específicamente en el valor del volumen máximo generado de metano. Por otro lado, se presentan en contraste las curvas obtenidas para la composición aproximada del biogás generado, tal como fueron medidas durante el desarrollo de los ensayos de biodegradabilidad anaeróbica y las curvas generadas mediante la simulación (Figura 3c, Figura 3d, Figura 3e).

Figura 3. Comparación de las curvas generadas mediante la simulación numérica y las curvas obtenidas mediante la medición de la producción de metano (a) y la composición aproximada del biogás generado (b) para la razón de carga orgánica (1:1). [E=Experimental; S=Simulación].

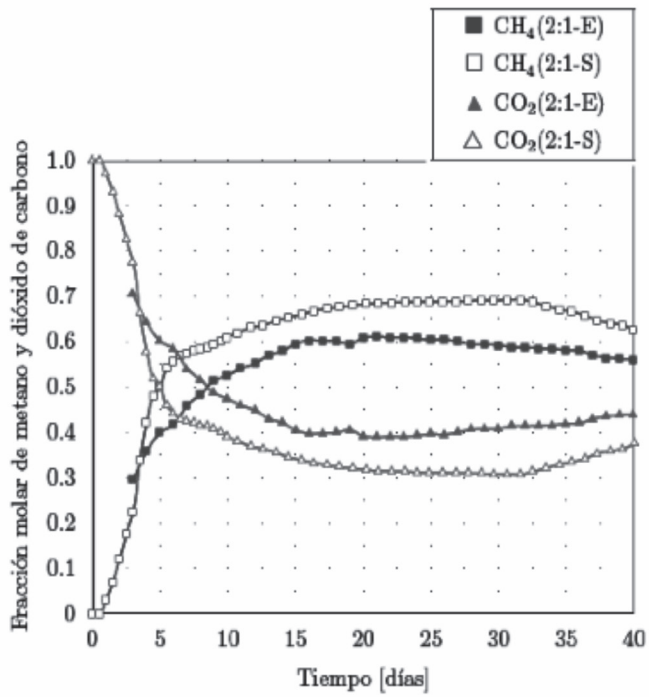


(a)

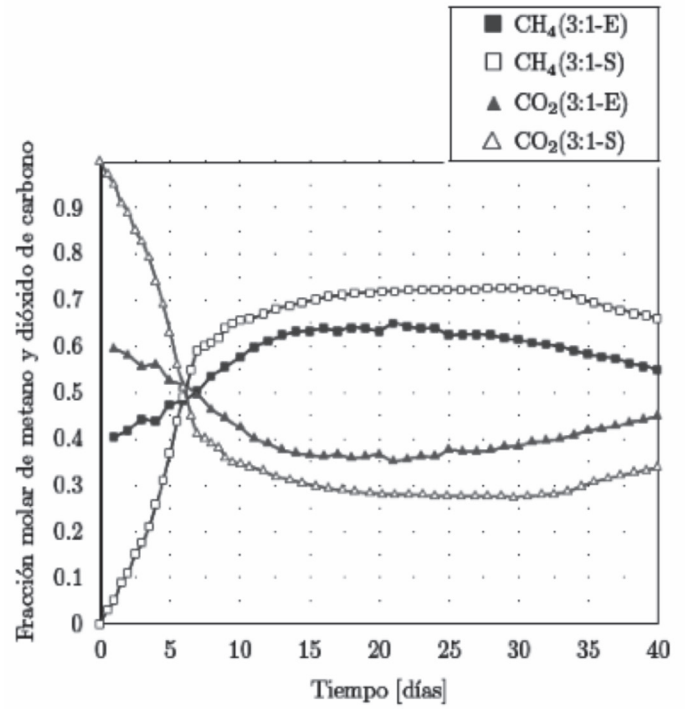


(b)

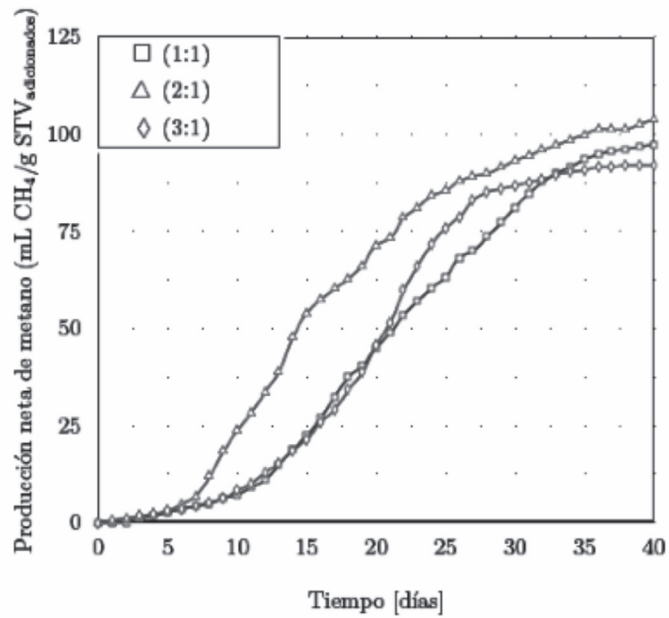
la composición porcentual del biogás generado para cada razón de carga, mostrando tendencias similares para



(c)



(d)



(e)

Fuente. Elaboración propia de los autores.

ambos tipos de curvas. No obstante, se observa que existe una diferencia considerable entre los valores de las fracciones molares (medidos y simulados) de cada componente, en diferentes intervalos de medición

para todas las razones de carga.

Tabla 2. Tabla de estimación del porcentaje de error estimado entre los valores experimentales y los valores simulados

Razón de sustrato a inóculo 1:1			
Tiempo (d)	% Experimental fracción molar de metano	% Simulado fracción molar de metano	% Error
10	0,377	0,709	-88,1
20	0,596	0,74	-23,8
30	0,604	0,756	-25,2
40	0,557	0,722	-29,6
Razón de sustrato a inóculo 2:1			
Tiempo (d)	% Experimental fracción molar de metano	% Simulado fracción molar de metano	% Error
10	0,526	0,71	-35,0
20	0,61	0,783	-28,8
30	0,592	0,792	-33,8
40	0,56	0,625	-11,6
Razón de sustrato a inóculo 3:1			
Tiempo (d)	% Experimental fracción molar de metano	% Simulado fracción molar de metano	% Error
10	0,576	0,655	-13,7
20	0,63	0,719	-13,4
30	0,615	0,724	-17,7
40	0,55	0,661	-20,2

Fuente. Elaboración propia de los autores.

Se presentan los resultados obtenidos con una periodicidad de diez días para la composición del biogás generado en términos de la fracción molar de metano, además del porcentaje de error estimado para la desviación de los resultados de la simulación computacional para cada una de las razones de sustrato inóculo utilizadas en este estudio (Tabla 2). Como se puede advertir, para la razón de carga orgánica (1:1) al

inicio del proceso, se precisa una discrepancia bastante pronunciada entre los valores medidos y simulados, sin embargo, con el transcurso del periodo de muestreo, esta discrepancia disminuye hasta cerca de un 20% de error entre los valores medidos y simulados. De forma similar, los datos que se muestran para la razón de carga orgánica 2:1, reflejan una ligera diferencia entre ellos en los periodos iniciales, la cual fluctúa entre valores cercanos al 25% durante el desarrollo del

proceso. Contrariamente a los resultados observados para las cargas (1:1 y 2:1), la razón de carga orgánica (3:1) muestra inicialmente pequeñas diferencias durante los primeros días de desarrollo del proceso, sin embargo, al final del periodo de medición muestra un ligero aumento de esta diferencia lo cual se evidencia en el aumento del porcentaje de error.

Debido a que el modelo computacional utilizado en este estudio para el desarrollo de la simulación numérica del proceso de codigestión anaeróbica del sustrato mencionado, es un modelo que aunque ha sido avalado internacionalmente como una herramienta eficaz para el desarrollo de los estudios de diseño y automatización de las plantas de tratamiento anaeróbico de residuos orgánicos biodegradables, muestra grandes limitantes en la labor de simular los complejos procesos que se suscitan en el sustrato durante la degradación anaeróbica.

Dentro de estos complejos subprocesos, cabe mencionar los procesos bioquímicos, como la degradación del sustrato (hidrólisis y fermentación) para la cual el modelo utiliza una cinética de primer orden y los procesos de acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, en los cuales el modelo desarrolla la simulación computacional teniendo en cuenta las cinéticas más sencillas, como la Michaelis-Menten o la cinética de Monod. Estas simplificaciones se justifican durante el desarrollo de las iteraciones de cálculo computacional de las 24 variables que interactúan entre sí, a través de las 19 ecuaciones diferenciales que modelan los procesos bioquímicos y las 12 ecuaciones que establecen el comportamiento de los procesos fisicoquímicos; así mismo los balances químicos entre los iones disueltos que sirven de medio para realizar el intercambio de electrones durante el desarrollo del proceso.

Por lo tanto, las ligeras discrepancias que se encuentran en el modelo, permiten evaluar su excelente desempeño del modelo desde el punto de vista de la complejidad que implica el análisis y la simulación de los procesos que conforman el tratamiento anaeróbico. Con respecto de las ligeras diferencias numéricas

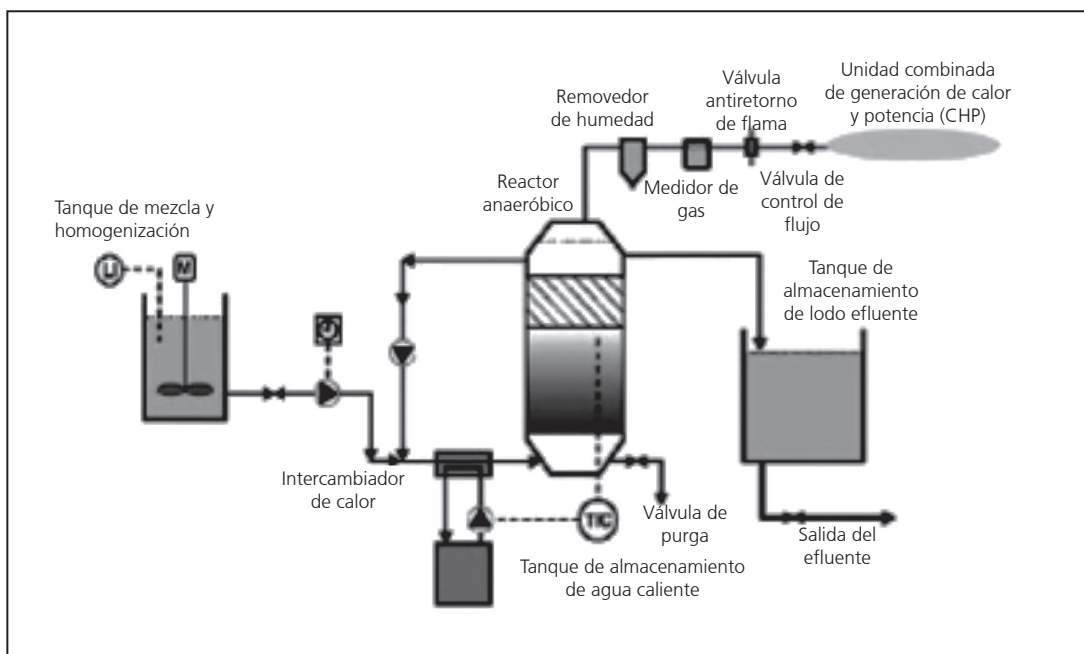
que presentan los resultados en este y otros estudios similares.

Con base en lo anterior, se puede inferir que la notable efectividad del modelo puede ser optimizada mediante estudios más complejos de orden microbiológico y fisicoquímico, con el fin de establecer cinéticas bioquímicas y de reacción que puedan representar en mejor forma los procesos internos que conforman la degradación anaeróbica. Algunos estudios recientes subrayan la necesidad de incorporar al modelo procesos que no han sido tenidos en cuenta en la versión actual del mismo, tales como la competencia entre los diferentes consorcios de microorganismos que desarrollan los procesos de degradación bioquímica, así como la incorporación de submodelos interdependientes que estimen el efecto de los contenidos enzimáticos liberados por los microorganismos y la interacción de estos con el sustrato.

4.1 Estimación del potencial de generación energético

Con el fin de realizar el planteamiento de un modelo que permita establecer el balance energético de una instalación a escala piloto para la generación de biogás a partir de la codigestión anaeróbica de residuos cítricos y estiércol bovino, se utilizan los valores reportados en la literatura para los consumos energéticos de los equipos auxiliares utilizados en instalaciones similares para el desarrollo del proceso (Lubken et al., 2007). Mediante el modelo de balance energético desarrollado por Lubken et al. (2007), se establecen las formas en las que se desarrolla la producción y consumo neto de la energía del sistema. Se muestra el diagrama de procesos de un sistema a escala piloto del cual se han extraído los parámetros de funcionamiento para cada equipo, con el fin de realizar la estimación del potencial energético (Figura 4).

Figura 4. Esquema general de funcionamiento de la planta piloto que se utilizó como referencia para establecer el modelo energético



Fuente. Fernández et al., 2001.

4.2 Planteamiento del modelo energético

La siguiente ecuación general, representa el cambio en función del tiempo de la energía neta que se genera en el sistema para la producción de biogás. En esta ecuación, el cambio de la energía neta es igual a la suma algebraica de términos que representan la

producción y consumo de energía durante el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica.

$$\frac{dE_{neta}}{dt} = (\dot{E}_{elect}^{prod} - \dot{E}_{bomb}^{perd} - \dot{E}_{agit}^{perd}) + (\dot{E}_{term}^{prod} - \dot{E}_{cond}^{perd} - \dot{E}_{calen}^{perd} + \dot{E}_{calen-micr}^{prod}) [\text{kWh/día}]$$

Donde E_{neta} es la producción neta de energía del reactor en términos de [kWh]; $E_{(prod\ elect)}$ es la producción de energía eléctrica mediante un sistema generador combinado de potencia y calor, (CHP, por sus siglas en inglés), CHP (generador combinado de potencia y calor), a partir de la combustión del gas metano presente en el biogás generado; $E_{(perd\ bomb)}$

representa el requerimiento energético del sistema de bombeo del sustrato hacia el interior del reactor; $E_{(perd\ agit)}$ es la energía que consume el sistema de agitación del sustrato dentro del reactor $E_{(prod\ term)}$ es la energía térmica producida mediante el aprovechamiento del biogás generado. $E_{(perd\ cond)}$ es la pérdida energética

debido a la transferencia de calor por conducción y convección desde el reactor hacia el ambiente circundante.

y $E_{(perd\ cond)}$ corresponde a la energía requerida para el calentamiento del sustrato durante el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica y $E_{(prod\ calen\ micro)}$ representa la energía interna que se genera mediante el

desarrollo de los procesos bioquímicos. A continuación, se muestran las ecuaciones para el cálculo de los términos correspondientes a los consumos energéticos en la instalación a escala piloto.

$$\dot{E}_{elect}^{prod} = Q_G P_{CH_4} H_C \eta_{elect} [\text{kWh/día}] \quad \dot{E}_{term}^{prod} = Q_G P_{CH_4} H_C \eta_{term} [\text{kWh/día}]$$

Donde Q_G es la producción de biogás [$\text{Nm}^3/\text{día}$], P_{CH_4} es la fracción molar de metano contenido en el biogás [%], H_C es el poder calorífico inferior del gas metano [kWh/Nm^3], η_{elect} y η_{term} , son la eficiencia de ge-

neración eléctrica y la eficiencia térmica del sistema utilizado para la generación de potencia y calor. El consumo energético de la operación de bombeo, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\dot{E}_{bomb}^{perd} = Q_{in} (H) (g) \rho (t_p) \frac{1}{\eta_{bomba-tornillo}} [\text{kWh/día}]$$

Donde Q_{in} es el caudal de residuo que ingresa al tanque reactor [m^3/s]; H es la altura a la cual debe elevarse el residuo para el ingreso al reactor, ρ es la densidad del residuo orgánico que está siendo bombeado [kg/m^3]; g es la aceleración de la gravedad [m/s^2]; t_p es el tiempo requerido para el bombeo diario del residuo hacia el

interior del reactor [$\text{h}/\text{día}$] y $\eta_{bomba-tornillo}$ es la eficiencia mecánica del equipo de bombeo utilizado. El término de pérdida de energía debido al consumo de potencia por parte del sistema de agitación, puede ser calculado mediante la siguiente relación:

$$\dot{E}_{agit}^{perd} = V_{liq} (S) (t_s) [\text{kWh/día}]$$

Donde V_{liq} es el volumen líquido del tanque reactor [m^3]; S es la potencia específica de consumo del sistema mecánico de agitación [kW/m^3] y t_s es el tiempo requerido para realizar la agitación completa del sustrato contenido en el reactor [$\text{h}/\text{día}$]. La energía

requerida para realizar la agitación del sustrato es función de la geometría y el volumen del reactor, así como de la viscosidad del sustrato.

Las pérdidas energéticas causadas por la transferencia de calor por conducción y convección desde el reactor hacia el ambiente, pueden ser estimadas mediante las siguientes expresiones.

$$\dot{E}_{cond}^{perd} = \frac{(T_{reactor} - T_{ambiente})}{R_{Total}}$$

$$R_{Total} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi K_1 L_1} + \frac{\ln(R_3/R_2)}{2\pi K_2 L_2} + \frac{1}{h_2 A_2}$$

Donde R_{total} es la resistencia térmica total a la transferencia de calor; L_1 y L_2 corresponden al espesor de la pared de acero inoxidable del tanque reactor y al espesor del aislante térmico (lana mineral) del reactor respectivamente; k_1 y k_2 corresponden a las conductividades térmicas del acero inoxidable y el aislante del reactor; R_1 , R_2 y R_3 corresponden al radio interno del reactor, radio de contacto entre la pared

del reactor y el aislante, y el radio externo de la capa cilíndrica de aislante térmico respectivamente. Los factores h_1 y h_2 corresponden a los coeficientes de transferencia de calor desde el reactor para las partes interna y externa respectivamente. La energía requerida para desarrollar el calentamiento del sustrato contenido en el reactor, puede ser estimada mediante la siguiente relación:

$$\dot{E}_{calen}^{perd} = Q_{in} C_p [(T_{react} - T_{sustrato}) \left(\frac{1}{3,6}\right)] \text{ [kWh/día]}$$

Donde Q_{in} es el caudal de residuo que ingresa al tanque reactor [m^3/s]; C_p es el calor específico del sustrato [$kJ/(kgK)$]; T_{react} es la temperatura del sustrato contenido en el reactor [K]; $T_{sustrato}$ es la temperatura del sustrato

fresco que va ingresar al reactor [K]. El calor generado por las reacciones bioquímicas que se desarrollan durante el proceso de digestión anaeróbica, puede ser estimado mediante la siguiente relación:

$$\dot{E}_{calen-micr}^{prod} = \sum_{j=5-12} (\Delta E_j f_j \rho_j V_{liq} \left(\frac{1}{3,6}\right)) \text{ [kWh/día]}$$

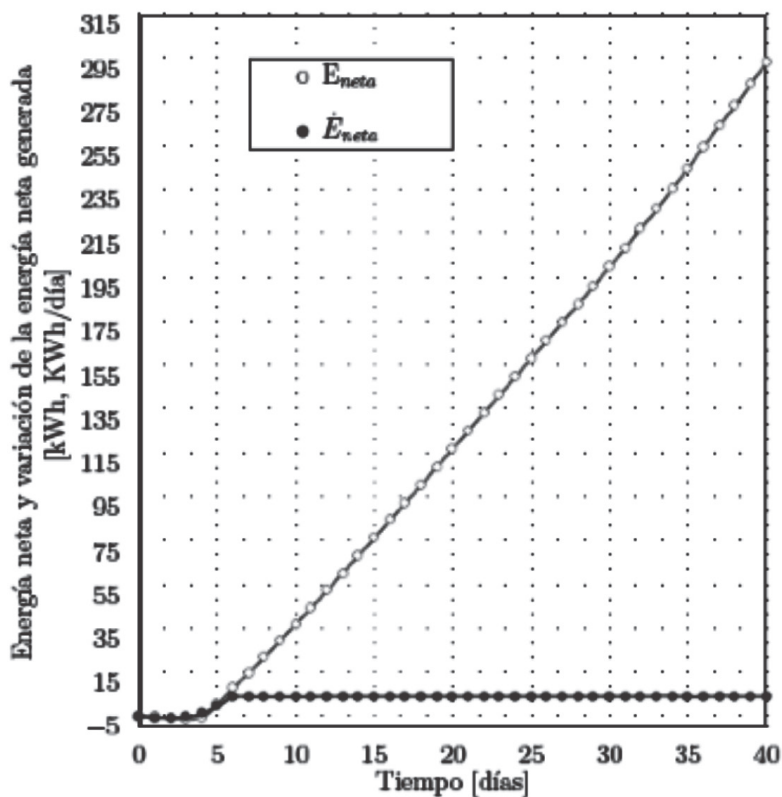
Donde V_{liq} es el volumen líquido del tanque reactor [L]; ΔE_j es la energía interna liberada hacia el ambiente debido al proceso (j) de actividad microbiana [kJ/mol]; f_j es la masa molar por gDQO de metabolito producido mediante los procesos bioquímicos que se suscitan durante la digestión anaeróbica [mol/g DQO]; ρ_j es la razón cinética del proceso bioquímico (j) [g DQO/ L día].

Como resultado de la implementación del modelo energético, se muestra la evolución de la variable que representa la energía neta generada y razón de cambio de la energía generada por el sistema de tratamiento a escala piloto (Figura 5). A partir de estos resultados, se puede inferir la notable capacidad de generación de energía que presenta este sistema de tratamiento de

residuos orgánicos biodegradables. En una instalación a escala piloto con el funcionamiento descrito anteriormente, el sistema genera aproximadamente 200 kWh/mes, que corresponde a la energía promedio de consumo mensual de una vivienda en el área urbana, y aproximadamente cuatro viviendas en el sector rural en Colombia (Deloitte Asesores Consultores, 2009).

Como se observa durante los primeros estadios del desarrollo del proceso el sistema presenta un balance energéticamente negativo, sin embargo, a medida que se desarrolla el proceso de digestión anaeróbica del sustrato y se inicia la producción del gas metano, se obtiene una generación neta de energía que supera ampliamente el requerimiento energético del sistema a escala piloto que fue modelado (Figura 5).

Figura 5. Curva obtenida mediante la simulación numérica para la energía neta y razón de cambio de la energía neta generada



Fuente. Elaboración propia de los autores.

LA RED POSTAL DE COLOMBIA

www.4-72.com.co

► Línea de Atención al Cliente Nacional 01 8000 111210 ◀

5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este estudio mediante los ensayos de biodegradabilidad anaeróbica, se puede deducir que es factible la producción de biogás con un alto contenido de metano a partir de la codigestión anaeróbica de los residuos cítricos y el estiércol bovino.

En este estudio, se encontró que la implementación del modelo ADM-1 utilizando los valores de los parámetros reportados en el caso base y las concentraciones de los metabolitos estimadas mediante las metodologías que relacionan las mediciones experimentales con el contenido de estos compuestos en el sustrato, presentó un ajuste cercano entre los datos experimentales y los datos obtenidos a través de la simulación, los cuales se muestran solo para la producción de biogás y metano. Sin embargo, se evidencian algunas restricciones que se generan sobre el modelo cuando se ha realizado una limitada caracterización del sustrato.

Debido a la complejidad de las técnicas de medición necesarias para establecer la composición química del residuo, es importante el desarrollo e implementación de algunas metodologías (Wendland, 2008; Zaher et al.,

2005; Zaher, 2009), que intenten relacionar mediciones fisicoquímicas que se realizan rutinariamente en el análisis de aguas residuales y desechos orgánicos, con los resultados obtenidos de la caracterización exhaustiva del sustrato.

El aporte de esta investigación, se basa en la utilización de un modelo computacional avalado internacionalmente para realizar la simulación numérica del proceso de digestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino, de acuerdo con un protocolo estandarizado, además de incorporar un modelo energético que calcula la energía neta generada mediante la instalación de una planta a escala piloto, con lo cual se demuestra la factibilidad que presenta la tecnología de digestión anaeróbica para la generación de energía renovable a partir de residuos orgánicos. Este estudio es una primera aproximación al desarrollo de una estrategia integral tanto para la simulación computacional de los procesos biotecnológicos, como para la estimación de los parámetros óptimos del tratamiento de residuos orgánicos biodegradables de origen agroindustrial, como la fermentación alcohólica y la digestión anaeróbica.

6. LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Término	Unidad (SI)
E_{neta}	Energía neta consumida en el proceso	kWh (kJ)
$E_{(prod\ elect)}$	Energía eléctrica producida	kWh (kJ)
$E_{(perd\ bomb)}$	Energía requerida para bombeo	kWh (kJ)
$E_{(perd\ agit)}$	Energía consumida por sistema de agitación	kWh (kJ)
$E_{(prod\ term)}$	Energía térmica producida a partir del biogás	kWh (kJ)
$E_{(perd\ cond)}$	Energía perdida debido a la transferencia de calor	kWh (kJ)
$E_{(perd\ cond)}$	Energía requerida para el calentamiento del sustrato	kWh (kJ)
$E_{(prod\ cal\ mic)}$	Energía generada por los procesos bioquímicos	kWh (kJ)
Q_G	Producción de biogás	Nm ³ /día
P_{CH_4}	Fracción molar de metano	%
H_C	Poder calorífico inferior del gas metano	kWh/Nm ³
$\eta_{(elect)}$	Eficiencia de generación eléctrica	%
η_{term}	Eficiencia térmica del sistema	%
Q_{in}	Caudal de residuo que ingresa al tanque reactor	m ³ /s
H	Altura para el ingreso del residuo al reactor	m
ρ	Densidad del residuo orgánico	kg/m ³
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
t_p	Tiempo requerido para el bombeo	h/día
$\eta_{(bomba-torni)}$	Eficiencia mecánica del equipo de bombeo	%
V_{liq}	Volumen líquido del tanque reactor	m ³
S	Potencia específica de consumo	kW/m ³
t_s	Tiempo requerido para realizar la agitación	h/día
R_{total}	Resistencia térmica total a la transferencia de calor	°C/W
L_1	Espesor de la pared de acero del tanque reactor	m
L_2	Espesor del aislante térmico	m
k_1	Conductividad térmica del acero inoxidable	W/m°C
k_2	Conductividad térmica del aislante del reactor	W/m°C
R_1	Radio interno del reactor	m
R_2	Radio de contacto entre pared del reactor y aislante	m
R_3	Radio externo de capa cilíndrica de aislante térmico	m
h_1	Coefficientes transferencia de calor por convección	W/m ² °C
Q_{in}	Caudal de residuo que ingresa al tanque	m ³ /s
C_p	Calor específico del sustrato	kJ/kg.K
T_{react}	Temperatura del sustrato contenido en el reactor	K
$T_{sustrato}$	Temperatura del sustrato que va ingresar al reactor	K
V_{liq}	Volumen líquido del tanque reactor	L
ΔE_j	Energía interna liberada debido al proceso (j)	kJ/mol
f_j	Masa molar por gDQO de metabolito producido	mol/g DQO
ρ_j	Razón cinética del proceso bioquímico (j)	g DQO/L.día

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, J.; Graef, S.(1971). Dynamic modeling and simulation of the anaerobic digestion process. *Anaerobic Biological Treatment Processes. Advances in Chemistry Series-Amer. Chemical Soc.*, Washington 105, pp. 126–162.
- APHA(2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th ed. Washington:, DC. American Public Health Association.
- ASTM (1992). Standard Test Method for Determining the Anaerobic Biodegradation Potential of Organic Chemicals. *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.*
- Batstone, D.(2000). High rate anaerobic treatment of complex wastewater. Tesis de doctorado, Universidad de Queensland, Brisbane.
- Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., Sanders, W., Siegrist, H. y Vavilin, V. (2002). Anaerobic Digestion Model-1,(ADM1). *IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes. IWA: Publishing London.*
- Blumensaat, F. Keller, J.(2005). Modelling of two stage anaerobic digestion using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). *Water Research* 39, pp. 171–183.
- Callaghan, F. Wase, J. Thayanithy, K. Forster, C. (1999). Co-digestion of waste organic solids: batch studies. *Bioresource Technology* 67, pp. 117–122.
- Collazos, C. (2000). Biodegradabilidad anaerobia de efluentes cerveceros, Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia.
- Deloitte, Asesores y Consultores (2009). Informe ejecutivo de gestión Codensa S.A. E.S.P.
- Fernández, J., Omil, F., Méndez, R., Lema, J. (2001). Anaerobic treatment of fibreboard manufacturing wastewaters in a pilot scale hybrid USBF reactor. *Wat. Res.* 35, pp. 4150–4158.
- Gunaseelan, N.(2007). Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. *Bioresource Technology* 98, pp. 1270–1277.
- Hill, D. (1982). A comprehensive dynamic model for animal waste methanogenesis. *Trans. ASAE* 25, pp. 1374–1380.
- ISO (1995). Water quality-evaluation of the ultimate anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge. Method by measurement of the biogas production. Seattle: International Organization for Standardization.
- Khanal, S. (2008). Anaerobic biotechnology for bioenergy production-principles and applications. Iowa, USA:Blackwell Publishing., 2008.

- Lubken, M., Wichern, M., Schlattmann, M., Gronauer, A. & Horn, H.(2007). Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops. *Water Research* 41, pp. 4085–4096.
- Madigan, M., Martinko, J. & Parker, J.(1999). *Biología de los microorganismos*. Illinois : Pearson - Prentice Hall.
- Montgomery, H., Dymock, J. & Thom, N. (1962). The rapid colorimetric determination of organic acids and their salts in sewage-sludge liquor. *The Analyst*. 87, pp. 949–952.
- Neves, L. Oliveira, R. Alves, M. (2004). Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. *Process Biochemistry* 39, pp. 2019–2024.
- Nordberg, A. Edstrom, M.(2005). Codigestion of energy crops and the source sorted organic fraction of municipal solid waste. *Water science and technology*. 52, pp. 217–222.
- Owen, W. Stuckey, D. Healy, J. Young, L. McCarty, P.(1993). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Wat.Res.* 13, pp. 485–492.
- Owens, J. Chynoweth, D. (1993). Biochemical methane potential of MSW components. *Water Sci. Technol.* 27, pp. 1–14.
- Parker, W.(2000).Application of the ADM-1 model to advanced anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 96, pp. 1832–1842.
- Pavlostathis, S. & Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical reviews in environmental Control* 21, pp. 411– 490.
- Prescott, L. & Harley, J., & Klein, D. (2002). *Microbiology* 5th edition. New York : McGrawHill.
- Rosen, C. Vrecko, D. Gernaey, K. Pons, M. & Jeppsson, U.(2006). Implementing ADM-1 for plantwide benchmark simulations in Matlab/Simulink. *Wat. Sci. Tech.* 54, pp. 11–20.
- Stams, A. (1994).Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. *Antonie van Leeuwenhoek*. 66, pp. 271–294.
- Thamsiriroj, T. & Murphy, J.(2011). Modelling monodigestion of grass silage in a 2-stage CSTR anaerobic digester using ADM1. *Bioresource Technology* 102, pp. 948–959.
- Wendland, C. (2008). *Anaerobic Digestion of Blackwater and Kitchen Refuse*.Tesis de doctorado, Technischen Universität Hamburg-Harburg.
- Zaher, U., Grau, P., Benedetti, L., Ayesa, E. & Vanrolleghem, P. (2005). Transformers for interfacing anaerobic digestion models to pre- and posttreatment processes. *Water Environment Research* 81, pp. 407–415.
- Zaher, U., Rongping, L. Jeppsson, U. Steyer, J. & Chen, S. (2009). GISCOD: General Integrated Solid Waste Co-Digestion model. *Water Research* 43, pp. 2717–2727.

