

CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE ESTIÉRCOL BOVINO Y SOBRES  
ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO

GIOVANNA LORENA VILLALOBOS PINZÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2017

CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE ESTIÉRCOL BOVINO Y SOBRES  
ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO

GIOVANNA LORENA VILLALOBOS PINZÓN

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar el título de  
Ingeniero Químico

**DIRECTORES**

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero Químico, M. Sc., PhD

LILIANA DEL PILAR CASTRO MOLANO

Ingeniera Química, PhD

**Codirector**

LUIS ENRIQUE LAMBIS BENITEZ

Ingeniero Químico, M. Sc. (c)

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2017

## DEDICATORIA

*A Dios por haberme permitido llegar a este punto y poder cumplir todos los objetivos de la carrera, por darme salud, fortaleza, sabiduría, nunca desampararme y haber puesto personas maravillosas todo este tiempo.*

*A mis padres, Katia y Giovanni, por su sacrificio y esfuerzo, por los buenos principios y valores inculcados. Por todo el amor y cariño brindado. Por ser ejemplos. A mi mamá por enseñarme a salir adelante a pesar de las dificultades.*

*A mi hermanito, Miguel Ángel, que a pesar de su corta edad me ha brindado mucho amor y alegrías con sus travesuras y ocurrencias.*

*A mi abuela Eneida, mi tía Marta y el resto de mi familia, que a pesar de la distancia me demuestran su amor, apoyo y cuidado.*

*A Jorge, por ser mi compañero y apoyo durante toda la carrera. Porque a pesar de todas las dificultades siempre estuvo ahí dándome fuerzas y palabras de aliento para no desfallecer.*

*A Gina, Doña Tere y Federico por abrirme las puertas de su casa, ofrecerme su apoyo, cariño, confianza y permitirme hacer parte de sus vidas. Se han convertido en mi familia.*

*A mis compañeros de la universidad y amigos de vida por contribuir en mi proceso de formación como profesional y como persona. Gracias por todo el apoyo y cariño.*

*Giovanna*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander y a los profesores de la escuela de Ingeniería Química por brindarme su conocimiento, consejos, experiencia y ayuda que fueron fundamentales para mi formación.

A los profesores Humberto Escalante y Liliana Castro, por permitirme hacer parte del grupo de DA, por su guía, colaboración y tiempo dedicado para la culminación de este trabajo de investigación.

A don Guillermo, don Eduardo, don Wilson y Joaquín, por su generosidad y amabilidad a la hora de proveer materiales o resolver dudas que contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

A todos mis compañeros de laboratorio, porque además de compartirme sus conocimientos, me brindaron su amistad, compañía y muchas alegrías. Nunca olvidaré las reuniones extras en el laboratorio, las historias contadas y el programa 'Batiendo Mierda'.

A Luis, que, con su particular forma de reaccionar, siempre me sacaba una sonrisa en momentos de estrés. Gracias por la ayuda y por compartirme de tus conocimientos, que no solo fueron de digestión anaeróbica.

A Linita, por ser un amor de persona y estar siempre dispuesta a ayudar a todos los estudiantes.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. FASES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	17
1.2. PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE LA DA.....	18
2. METODOLOGÍA .....	19
2.1. MATERIALES Y MÉTODOS .....	19
2.1.1. Inóculo.....	19
2.1.2. Sustratos.....	20
2.2. ARRANQUE DEL REACTOR. OPERACIÓN BATCH.....	20
2.3. OPERACIÓN DEL REACTOR EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO.....	22
3. RESULTADOS .....	25
3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO.....	25
3.2. EVALUACIÓN ARRANQUE DEL BIORREACTOR. OPERACIÓN BATCH.....	27
3.2.1. Estabilidad .....	27
3.2.2. Desempeño .....	29
3.3. EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO. ....	31
3.3.1. Estabilidad .....	31
3.3.2. Desempeño .....	34
4. CONCLUSIONES .....	38
REFERENCIAS .....	39
BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS .....	45

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Digestor-Sistema de medición de biogás.....	21
Figura 2. Evaluación de AGV y AT en el arranque del reactor. ....	28
Figura 3. Capacidad buffer durante el arranque del reactor. ....	28
Figura 4. Volumen normalizado de biogás diario y acumulado durante el arranque del reactor.....	30
Figura 5. Consumo de ST y SV en el arranque del reactor. ....	30
Figura 6. Comportamiento de AGV y pH durante la Co-DA.....	33
Figura 7. Variación de la capacidad buffer en la Co-DA .....	33
Figura 8. Volumen de biogás normalizado durante la Co-DA.....	35
Figura 9. Superficie de respuesta del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB.....	45
Figura 10. Comportamiento del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB. ....	46

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Condiciones de operación en arranque del Biorreactor. ....	21
Tabla 2. Condiciones de operación. Operación semi-continua. ....	23
Tabla 3. Variables de respuesta de la DA de SAR y EB. ....	24
Tabla 4. Caracterización de sustratos e inóculo. ....	25
Tabla 5. Caracterización elemental de sustratos. ....	25
Tabla 6. Rendimiento de biogás. ....	36
Tabla 7. Resultados de otros estudios. ....	37

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Propuesta de parámetros óptimos, carga orgánica y relación de mezcla, en la Co-DA de SAR y EB. ....	45
ANEXO B. Cálculo del volumen de biogás a condiciones normales de temperatura y presión (VNTP).....	47
ANEXO C. Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) en muestras sólidas y semisólidas.....	48
ANEXO D. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT). ....	50

## NOMENCLATURA

**SAR** Sobrantes Alimenticios de Restaurante

**DA** Digestión Anaeróbica

**CoDA** Co-digestión Anaeróbica

**SV** Sólidos Volátiles

**ST** Sólidos Totales

**SF** Sólidos Fijos

**AGV** Ácidos Grasos Volátiles

**EB** Estiércol Bovino

**AT** Alcalinidad Total

**VCO** Velocidad de Carga Orgánica

**RIS** Relación Inóculo/Sustrato

**VNTP** Volumen a condiciones estándar

**DQO** Demanda Química de Oxígeno

## RESUMEN

**TÍTULO:** CO-DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE ESTIÉRCOL BOVINO Y SOBRESALIENTES ALIMENTICIOS DE RESTAURANTE EN UN REACTOR DE TANQUE AGITADO\*

**AUTOR:** GIOVANNA LORENA VILLALOBOS PINZÓN\*\*

**PALABRAS CLAVE:** sobrasalientes alimenticios de restaurante, estiércol bovino, co-digestión anaeróbica, proporción de mezcla.

### DESCRIPCIÓN:

A nivel mundial, se desperdician 1300 millones de toneladas/año de residuos alimenticios. La Digestión Anaeróbica (DA) representa una de las alternativas para el tratamiento de estos residuos, caracterizado por tener alta humedad, >80%, y alto contenido de materia orgánica, sólidos volátiles (SV)/sólidos totales (ST) de 86%. La DA de los sobrasalientes alimenticios de restaurante (SAR) es afectada negativamente por el desequilibrio nutricional y problemas de acidificación. Para evitar esta inestabilidad se emplea la co-digestión anaeróbica (Co-DA), al digerir simultáneamente los SAR y el estiércol bovino (EB), aprovechando los efectos sinérgicos para el equilibrio de nutrientes, aumento de la materia orgánica biodegradable y rendimiento del proceso.

En el arranque la relación inóculo/sustrato fue de 2, carga orgánica de 21 g SV/L, obteniéndose un rendimiento de 0.46 m<sup>3</sup> de biogás/ kg SV\*día y una reducción de SV de 83%. En la operación semi-continua se evaluó la tolerancia del medio a altas cargas orgánicas en términos de velocidades de carga orgánica (VCO) de 1, 3 y 3.5 g SV / L\*día y proporción de mezcla SAR:EB de 79:21, obteniéndose rendimientos de 2.02, 3.86 y 2.16 m<sup>3</sup> de biogás/ kg SV\*día respectivamente. Mejores producciones y rendimiento de biogás, sin inhibición del sistema ocurrieron donde la VCO de 3 g SV / L\*día, demostrando que la mezcla de SAR y EB permite aumentar las tasas de carga orgánica, comparado con la mono-digestión de SAR. La relación de mezcla de 79:21 es óptima para la co-digestión de estos residuos.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directores: Humberto Escalante Hernández Ing. Químico M. Sc, PhD.; Liliانا del Pilar Castro Molano Ing. Química PhD. Codirector Luis Enrique Lambis Benítez M. Sc. (c).

## ABSTRACT

**TITLE:** ANAEROBIC CO-DIGESTION OF CATTLE MANURE AND RESTAURANT FOOD WASTE IN AN AGITATED TANK REACTOR\*

**AUTHOR:** GIOVANNA LORENA VILLALOBOS PINZÓN\*\*

**KEYWORDS:** Restaurant food waste, cattle manure, anaerobic co-digestion, mixing ratio.

### DESCRIPTION:

Worldwide, every year people wasted 1300 million tons of food waste. Anaerobic Digestion (AD) represents one of the alternatives for the treatment of these residues, characterized for high humidity, >80%, and high content of organic matter, volatile solids (VS)/ total solids (TS) of 86%. The AD of restaurant food waste (RFW) is affected negatively by the nutritional imbalance and acidification problems. To avoid this instability the anaerobic co-digestion (ACoD) is used, when digesting simultaneously RFW and cattle manure (CM), taking advantage of synergistic effects for nutrient balance, increase of biodegradable organic matter and process yield.

At start, the inoculum/substrate relation was 2, organic load of 21 g SV/L, obtaining a yield of 0.46 m<sup>3</sup> of biogas/kg VS\*day and VS's reduction of 83%. In the semi-continuous operation, the medium tolerance was evaluated at high organic loads in terms of organic loading rates (OLR) of 1, 3 and 3.5 g VS / L\*day and RFW:CM mix ratio of 79:21, obtaining yields of 2.02, 3.86 and 2.16 m<sup>3</sup> of biogas/kg VS\*day respectively. Better productions and biogas yields, with no inhibition of the system occurred where the OLR of 3 g VS / L\*day, demonstrating that the mixture of RFW and CM allows to increase the organic load rates, compared with RFW mono-digestion. The mixing ratio of 79:21 is optimal for the co-digestion of these residues.

---

\*Thesis

\*\* Faculty of Engineering Physic-Chemical. School of Chemical Engineering. Director: Humberto Escalante Hernández Chemical Engineer M. Sc, PhD.; Liliana del Pilar Castro Molano Chemical Engineer PhD. Codirector Luis Enrique Lambis Benítez Chemical Engineer M. Sc. (c).

## INTRODUCCIÓN

Cada año se desperdicia un tercio de la comida producida para el consumo humano a nivel mundial, que representa aproximadamente 1300 millones de toneladas [1]. El 6% de las pérdidas mundiales de alimentos se dan en América Latina y el Caribe [2].

En un contexto más cercano, el servicio de comedor universitario ofrecido por la Universidad Industrial de Santander, produce 5850 Kg de sobrantes alimenticios de restaurante (SAR) mensuales [3], que en principio eran depositados debajo de las zonas verdes de la universidad, pero debido a la falta de vertederos en esta, su destino final fue modificado para ser proporcionado como alimento en granjas porcícolas. Sin embargo, esta disposición no es la apropiada, ya que está prohibido según Resolución ICA 2640 de 2007.

El uso de tecnologías de bioconversión de materia orgánica tales como la Digestión Anaeróbica (DA) representa una de las alternativas para el debido tratamiento de este tipo de residuos, los cuales se caracterizan por un alto porcentaje de humedad, (>80%) [4], alto contenido de materia orgánica expresado en la relación de sólidos volátiles (SV), porción orgánica del material sólido disponible para biodegradarse, sobre una base de sólidos totales (ST), SV/ST de 86% [5], y fácil biodegradabilidad, características apropiadas para la recuperación de energía a través de DA [6]. El proceso de DA consiste en una cadena secuencial de rutas metabólicas y acciones de los diferentes grupos tróficos de bacterias anaerobias, que participan en la conversión de la materia orgánica compleja en dos corrientes: un biogás compuesto principalmente de metano (50-80%) y dióxido de carbono (20-50%) y un fertilizante orgánico estabilizado para uso agrícola [7].

El potencial de biometanización de los SAR, los posiciona como un sustrato atractivo para la DA; la literatura ha reportado rendimientos de producción de metano que se encuentran en promedio de  $0.46 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$  [8]; [9]; [10].

Los SAR ricos en carbohidratos, proteínas y grasas suelen tener una alta proporción de materia orgánica biodegradable y una alta relación C/N, pero su digestión anaeróbica se ve afectada negativamente por dos factores. Por un lado, un desbalance nutricional en términos de micro y macro nutrientes; mientras que elementos como Zn, Fe, Mo, etc., son insuficientes, macronutrientes como Na, K, etc., se encuentran en concentraciones que pueden resultar inhibitorias [11]. Por otro lado, la DA de SAR, dada su fácil biodegradabilidad, puede presentar acidificación debido al desbalance entre producción/consumo de ácidos grasos volátiles (AGV) durante la ruta metabólica a biogás.

Paralelamente, los residuos ganaderos, como el estiércol bovino (EB), tienen una reducida concentración de materia orgánica y una baja relación C/N, pero cuentan con una concentración elevada de micro y macronutrientes (básicos para el correcto desempeño metabólico de los microorganismos); así como capacidad buffer, fundamental para evitar procesos de acidificación. La mezcla de estos dos tipos de sustratos (SAR y EB) puede dar lugar a procesos más estables y con un incremento considerable de la producción de biogás [12], por lo que la co-digestión puede ser una alternativa válida para superar las desventajas de la mono-digestión.

La co-digestión anaeróbica (CoDA) o mezcla de dos o más sustratos mediante DA, presenta múltiples beneficios como: la dilución de compuestos tóxicos potenciales, el aprovechamiento de los efectos sinérgicos de la mezcla de sustratos para ajustar el balance nutricional, la relación C/N, la humedad, etc., mejorando las dinámicas bioquímicas del sistema; lo que se verá reflejado en un mejoramiento de la estabilidad del proceso y la producción de biogás [13]. Sin embargo, para asegurar la sinergia entre los sustratos es necesario identificar y optimizar las variables que incidan de forma más directa en el desempeño y la estabilidad del proceso, especialmente cuando la DA es una degradación bioquímica compleja donde las variables suelen estar interrelacionadas.

En ese sentido, al tratarse de sustratos con características distintas, la relación de mezcla entre los mismos es una variable esencial. Por otro lado, la estabilidad y la

eficiencia de los digestores suele estar limitada por la concentración de sustrato en el sistema por lo que la carga orgánica se posiciona como variable decisiva en la misma media. Un estudio anterior determinó para la Co-DA entre SAR y EB en operación discontinua una proporción de mezcla de 79:21 como óptima para condiciones de carga orgánica extremas de 21 g SV/L [3]. Si bien son resultados prometedores considerando que la mono-digestión de SAR reporta inhibición desde cargas orgánicas de 10 g SV/L. Es necesario evaluar estos resultados para tiempos de operación más largos, para asegurar que la estabilidad se mantiene en miras a una aplicación a gran escala de la tecnología. Es decir, operaciones de tipo semi continuo o continuo, donde la carga orgánica será definida por la velocidad de carga orgánica.

Existen diferentes factores a considerar a la hora de seleccionar el diseño y operación de un digestor anaerobio. Especialmente porque el diseño del reactor puede influir en la estabilidad del proceso. Por tanto, se debe considerar el tipo de reactor que mejor se adecue en términos bioquímicos a los residuos. Un reactor de tanque continuamente agitado es una elección común para la digestión de residuos orgánicos, tipo SAR, dado el alto contenido de sólidos. Además, por ser un sustrato limitado por su rápida degradabilidad, su alimentación al biodigestor suele ser intermitente [14].

Por consiguiente, el objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar la co-digestión anaeróbica de residuos alimenticios de restaurante y estiércol bovino en operación semi-continua para una proporción de mezcla SAR:EB de 79:21, para distintas velocidades de carga orgánica.

## 1.1. FASES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Para llevar a cabo el proceso de degradación del sustrato existen cuatro fases en la DA: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, las cuales deben mantenerse en equilibrio dinámico que permitan la estabilidad del proceso y así alcanzar el producto deseado. En la etapa hidrolítica, los compuestos orgánicos complejos, como lípidos, proteínas e hidratos de carbono, son despolimerizados, por acción de enzimas extracelulares, en moléculas solubles y fácilmente biodegradables, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, etc. La segunda etapa es la acidogénesis, donde los compuestos solubles obtenidos de la etapa anterior se transforman en ácidos grasos de cadena corta (ácidos grasos volátiles), esto es, ácido acético, propiónico, butírico y valérico, principalmente. Esta transformación se lleva a cabo por las bacterias hidrolíticas fermentativas. En la etapa acetogénica los compuestos intermedios son transformados por las bacterias acetogénicas; como principales productos se obtiene ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

La etapa metanogénica constituye la etapa final del proceso, en el que los compuestos producto de la etapa anterior son transformados a  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Se distinguen dos tipos principales de microorganismos, los que degradan el ácido acético (arqueas metanogénicas acetoclásticas) y los que consumen hidrógeno (metanogénicas hidrogenófilas), siendo la primera la vía principal de formación del metano [15].

## 1.2. PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DE LA DA

Aunque el proceso de Co-DA supere las deficiencias que se presentan en la monodigestión, es necesario monitorear y controlar ciertos parámetros para asegurar la estabilidad en el desarrollo del proceso.

**AGV:** Los ácidos grasos volátiles son productos intermedios de la DA; principalmente incluyen ácido acético, propiónico, butírico y valérico. El incremento de la concentración de AGV en los digestores (acidificación) causa el descenso de la actividad metanogénica que conlleva a la inhibición en el sistema, siendo esta la causa más frecuente del fracaso de este tipo de tratamientos. Para que el rendimiento del reactor sea estable la concentración de AGV debe ser menos de 10000 mg Ac. Acético/L [16].

**pH:** representa una variable importante que puede estimar la actividad esperada y el crecimiento de las poblaciones microbianas. Para el crecimiento de las arqueas metanogénicas es favorable un rango de pH de 6.5 a 7.2 [11].

**Capacidad buffer:** es la relación entre los AGV y la alcalinidad total (AT). Representa la capacidad del medio para amortiguar los procesos de acidificación. Estudios reportan tres valores críticos para este parámetro: <0.4 indica estabilidad en el digestor, entre 0.4-0.8 se puede presentar cierta inestabilidad o principios de acidificación, y >0.8 representa inestabilidad significativa en el sistema [10].

**RIS:** es la relación inóculo/sustrato y se expresa en función del contenido de sólidos volátiles del inóculo y del sustrato. En la puesta y marcha de un digestor anaeróbico, una proporción adecuada de la RIS debe ser añadido para mejorar la hidrólisis de la materia orgánica y acelerar la tasa de producción de biogás [17].

**Velocidad de carga orgánica:** es la cantidad de materia orgánica agregada a los sistemas. Si es alta puede haber inhibición por acumulación de sustrato [18].

## 2. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se desarrolló en dos etapas metodológicas, las cuales incluyen la medición y control de las variables de respuesta en cuanto a desempeño y estabilidad del sistema. La primera etapa consistió en el arranque o puesta en marcha del reactor en operación discontinua (operación *batch*), durante el cual el consorcio microbiano pasa por una adaptación primaria y crecimiento de bacterias degradadoras de los ácidos acético y propiónico, además de la formación de una biomasa anaerobia metanogénica activa [19]. Se da paso a la segunda etapa, la operación del biodigestor en semi-continuo, que inicia una vez superada la etapa de arranque, donde la variación en la capacidad buffer y producción de biogás se estabilizan alrededor de cierto valor respectivamente. Se inicia la operación con una velocidad de carga orgánica (VCO) baja, la cual se va incrementando hasta llegar a la inhibición del sistema, estudiando el desempeño y monitoreando las variables de estabilidad de este a las condiciones óptimas para la Co-DA de SAR y EB.

### 2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

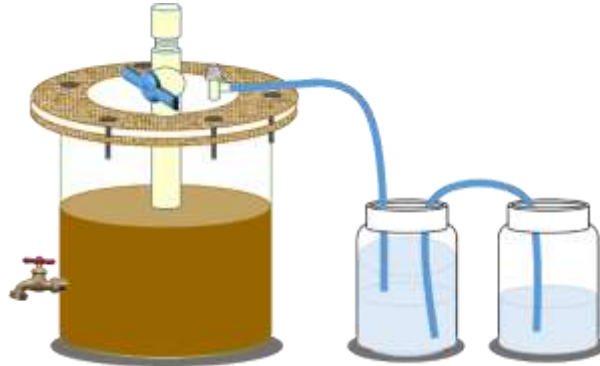
2.1.1. Inóculo: se empleó como inóculo lodo de estiércol bovino agotado. El estiércol bovino fue recolectado de la planta de sacrificio del frigorífico Vijagual, ubicado en el kilómetro 8 vía Bucaramanga-Rionegro; este fue acondicionado en el laboratorio en un biorreactor de 23 L, con agitación intermitente cada 30 minutos, a temperatura ambiente, durante 6 meses, con el propósito de agotar la materia orgánica disponible en el EB y de esta manera obtener un lodo de estiércol bovino agotado que proporcione un consorcio microbiano adecuado para la digestión anaeróbica. En términos de demanda química de oxígeno (DQO), la actividad metanogénica es  $0.06 \text{ m}^3 \text{ DQO CH}_4 / \text{kg SV inóculo} \cdot \text{día}$ .

2.1.2. Sustratos: los sobrantes alimenticios de restaurantes fueron recogidos del comedor estudiantil de la Universidad Industrial de Santander todos los días por una semana. Se procedió a triturar los residuos con el fin de obtener un sustrato homogéneo. Las muestras fueron almacenadas en bolsas plásticas, para facilitar la toma de muestra diaria a emplear, y congelados para conservar sus propiedades fisicoquímicas. El estiércol bovino fresco se almacenó en un recipiente y se conservó refrigerado a baja temperatura. Se hace necesario realizar la caracterización fisicoquímica de los sustratos, los cuales son de vital importancia para el proceso de digestión, puesto que pueden indicar de qué manera afectan o contribuyendo a la estabilidad del medio.

## **2.2. ARRANQUE DEL REACTOR. OPERACIÓN *BATCH***

El digestor fue diseñado como un reactor de tanque agitado, dado que es una elección común para la digestión de residuos orgánicos con alto contenido de sólidos totales [14]. Este digestor fue elaborado con un recipiente plástico de volumen total de 5 L, al cual se le adecuaron tres salidas: una para la evacuación del biogás, conectada a una manguera que finaliza dentro de un recipiente con solución salina para medir el volumen de metano producido a través de desplazamiento volumétrico realizado por el biogás hacia otro recipiente, como se muestra en la figura 1; las otras dos salidas favorecen la carga y descarga del sistema. Se selló herméticamente con la ayuda de madera MDF y se adicionó nitrógeno para lograr el estado anaeróbico en el espacio de cabeza.

Figura 1. Digestor-Sistema de medición de biogás.



En la etapa de arranque del digestor la operación fue en régimen *batch*, esto con el propósito de que las interacciones complejas llevadas a cabo por las comunidades microbianas logren un comportamiento dinámico en el proceso. Se seleccionó una RIS de 2, reportada en la literatura como óptima para obtener mejores resultados en el tratamiento de residuos de cocina [20]. La carga orgánica fue de 21 g SV/L, con el propósito de evaluar la tolerancia del sistema ante la presencia de altas concentraciones de carga orgánica y su capacidad para biodegradar la materia orgánica presente. Esta condición de operación se determinó según la metodología presentada en el anexo A.

En la tabla 1 se evidencian las condiciones de operación del montaje para el arranque del digestor.

Tabla 1. Condiciones de operación en arranque del Biorreactor.

Parámetro	Valor
Volumen de operación	3 L
Carga orgánica	21 g SV/L
Temperatura	25 ± 3 °C
Tiempo de operación	30 días
Agitación	100 rpm

Durante esta etapa se cuantificaron el volumen de metano diario producido, el consumo de sólidos totales y sólidos volátiles, variables como AGV, AT, capacidad buffer y pH, fundamentales para evaluar la estabilidad del proceso y dar paso a la operación en régimen semi-continuo. Los volúmenes de metano obtenidos fueron llevados a condiciones normales siguiendo la metodología presentada en el anexo B.

### **2.3. OPERACIÓN DEL REACTOR EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO**

Posterior a la puesta en marcha del biorreactor, se da inicio a la etapa de operación en modo semi-continuo.

Para la digestión en semi-continuo se utilizó una relación de mezcla óptima de 79% para los SAR y 21% de EB. La experimentación implicó la carga por etapas del reactor a tres velocidades de carga orgánica diferentes de 1, 3 y 3.5 gSV / L\*día; cada una de estas etapas se operó durante 30 días. La VCO, también conocida como el volumen de carga significa la cantidad de sólidos orgánicos secos cargados por volumen del reactor en litros por unidad de tiempo, que pueden ser suministrados al sistema sin sobrealimentar a las bacterias [18].

La alimentación diaria de los sustratos al digestor se dividió en tres cargas, repartidas en mañana, tarde y noche, agitando durante 30 minutos antes y después de cada alimentación para favorecer la buena homogeneización y la transferencia de los sustratos a la población de bacterias.

La medición de metano se realizó por desplazamiento volumétrico, en la cual el CO<sub>2</sub> es absorbido por la solución salina contenida en el recipiente y el gas metano desplaza un volumen de líquido que equivale al volumen de biogás producido por el sistema; esta medida luego se calcula a condiciones normales (anexo B).

Variables como pH, AGV, AT y SV se monitorearon con la periodicidad y métodos presentados en la tabla 3.

En la tabla 2 se pueden observar las condiciones de operación del proceso y la cantidad de cada sustrato adicionada al sistema a la velocidad de carga orgánica respectiva.

Tabla 2. Condiciones de operación. Operación semi-continua.

Parámetro	VCO [g SV/L día]		
	1	3	3.5
Volumen operación	3 L		
Temperatura	25 ± 3 °C		
Agitación	100 rpm		
Cantidad SAR [g]	13.625	43.066	50.244
Cantidad EB [g]	5.931	14.826	17.297

Los métodos utilizados para monitorear y evaluar las variables de respuesta del digestor se presentan en la tabla 3. Como variables de desempeño se midieron la cantidad de biogás producido y el contenido de sólidos totales y sólidos volátiles por métodos estándar [21]. Las variables de estabilidad seleccionadas para el análisis durante la puesta en marcha del reactor fueron AGV, AT y variación del pH. Las mediciones de AGV, AT y SV se realizaron por duplicado.

Tabla 3. Variables de respuesta de la DA de SAR y EB.

<b>Variable monitoreada</b>	<b>Unidad</b>	<b>Periodicidad</b>	<b>Método</b>
Volumen de metano	mL	Tres veces por día	Desplazamiento volumétrico
AGV	mg Ac. Acético/L	Cada 3 días	Titulación Anexo D
AT	mg CaCO <sub>3</sub> /L	Cada 3 días	Titulación Anexo D
SV	g SV/kg muestra	Cada 4 días	Gravimétrico Anexo C
pH	-	Diario	Potenciométrico pHmetro metrohm 744

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SUSTRATOS E INÓCULO.

Las tablas 4 y 5 resumen las principales características físico-químicas de los sustratos e inóculo empleados en este estudio.

Tabla 4. Caracterización de sustratos e inóculo.

Variable	unidades	SAR	EB	INÓCULO
pH	-	5.5	8.2	7.7
ST	g/kg	197.1	141.8	42.9
SV	g/kg	172.5	106.2	28.8
SV/ST	%	87.5	74.8	67.1
AGV/AT	-	1.8	0.8	0.2
Humedad	%	86.2	77	96.2
Carbohidratos*	%p	69.2	47.7	-
Lípidos*	%p	16.1	2.4	-
Proteínas*	%p	3.1	9	-

\* [3].

Tabla 5. Caracterización elemental de sustratos [22].

Elemento	C <sup>a</sup>	N <sup>a</sup>	S <sup>a</sup>	K <sup>b</sup>	Ca <sup>b</sup>	Mg <sup>b</sup>	P <sup>b</sup>	Cu <sup>b</sup>	Mn <sup>b</sup>	Fe <sup>b</sup>
SAR	43.28	3.11	0.45	0.14	0.03	0.02	0.06	0.0002	0.0002	0.001
EB	39.89	1.44	0.19	0.44	0.12	0.07	0.08	0.0002	0.003	0.02
Elemento	Zn <sup>b</sup>	Na <sup>b</sup>	Cd <sup>b</sup>	Cr <sup>b</sup>	Ni <sup>b</sup>	Pb <sup>b</sup>	Se <sup>b</sup>	Al <sup>b</sup>	V <sup>b</sup>	Co <sup>b</sup>
SAR	0.001	0.40	0.03	<0.10	<0.10	1.32	0.01	14.66	0.36	<0.10
EB	0.01	0.11	0.55	0.81	1.14	3.26	0.03	0.01	6.62	<0.1

a: % p/p base seca; b: %p/p.

El pH de los SAR (5.5) es típico de residuos rápidamente acidificables, lo que indica que la estabilidad de la mono-digestión de este residuo se puede ver afectada por la acumulación de AGV en el proceso, por lo que surge la necesidad de acondicionar el medio con un alcalinizante que aporte la capacidad buffer requerida para neutralizar la acidez y no afectar la DA [23], presentándose el EB como el adecuado con un pH de 8.2.

La relación SV/ST presentes en los sustratos es alta, 87.5% y 74.8% para los SAR y EB respectivamente; este factor hace atractivos estos residuos para Co-DA, ya que presentan un alto potencial en materia orgánica disponible para biodegradarse. El rendimiento de metano también está estrictamente relacionado con la cantidad de SV biodegrado [24].

La relación AGV/AT de los SAR presenta un valor muy superior a los valores reportados en la literatura como estables para la DA, lo que dificulta la mono-digestión de este residuo. El uso de EB en la DA de residuos de alimentos ha demostrado mejorar las condiciones de operación de estos sistemas e incremento en la producción de metano, debido al ajuste de los factores físico-químicos, como pH, balance de nutrientes y aporte de alcalinidad al medio [25].

Un parámetro significativo para el desarrollo microbiano en la DA es un alto contenido de humedad. La humedad de los SAR es de 86.2% y del EB es 77%. Valores superiores a 60% pueden favorecer la etapa de hidrólisis que ocurre como etapa inicial del proceso de DA [23].

Los carbohidratos representan un alto porcentaje de los compuestos orgánicos presentes en los sustratos, 69.2% para los SAR y 47.7% para EB. Estudios demuestran que los carbohidratos presentes en los sustratos se degradan más fácilmente que las proteínas, además su eficiencia en la eliminación se relaciona con el aumento en la producción de biogás [26].

El inóculo empleado en este estudio tiene un pH de 7.7 y capacidad buffer de 0.2. Puede aportar al medio un alto contenido de alcalinidad y capacidad de

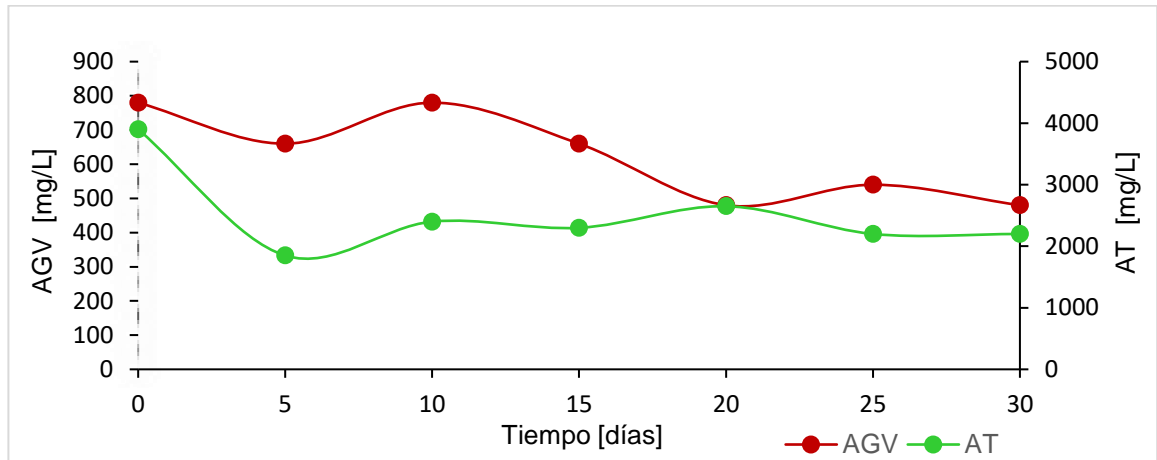
amortiguamiento. Presenta un bajo contenido de SV debido al agotamiento de la materia orgánica, acondicionado anteriormente en el laboratorio.

Por otra parte, se determinó la caracterización elemental de los sustratos en términos de contenido de nutrientes y oligoelementos. Los macronutrientes (Na, K, Mg, Ca, Al) y los iones de metales pesados (Cr, Co, Cu, Zn, Ni, etc.) son requeridos por el consorcio anaeróbico, debido a que estos cationes juegan un papel importante en la síntesis enzimática, así como el mantenimiento de la actividad enzimática [11]. Para los residuos de alimentos elementos como Co, V, Ni, Cr, Cd, Fe, entre otros, se encuentran en una proporción significativamente baja.

### 3.2. EVALUACIÓN ARRANQUE DEL BIORREACTOR. OPERACIÓN *BATCH*.

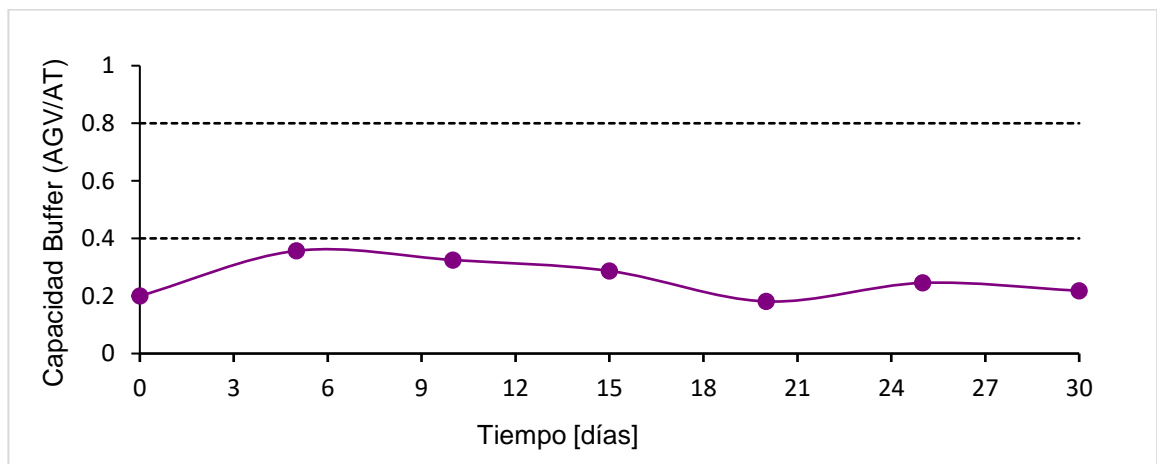
3.2.1. Estabilidad: Durante los 30 días del arranque del reactor se midió la concentración de AGV y AT para monitorear el estado en la evolución del sistema. Se evidencia en la figura 2 un comportamiento favorable para el proceso dado que hay una disminución en la concentración de los AGV que indica el consumo de estos por las bacterias acetogénicas siguiendo la dinámica del proceso de DA. Se evidencia que los valores de los AGV fueron compensados, durante toda la etapa, por los valores de AT superiores, lo que se traduce en una eficiencia en la capacidad de amortiguar la acidez del medio, que se puede observar en la figura 3. Esta tendencia muestra el buen funcionamiento de la primera etapa en cuanto a estabilidad del sistema.

Figura 2. Evaluación de AGV y AT en el arranque del reactor.



Podemos observar en la figura 3 que la capacidad buffer se mantuvo en el rango de 0.2 y 0.4, valores que según la literatura aseguran la estabilidad del proceso, demostrando que la alcalinidad contribuye a la estabilidad del pH. El pH en el día inicial fue de 7.33 y en al final de la etapa fue de 7.72. Estos valores son comparables con los datos obtenidos por [18], donde el pH osciló entre 7.3 y 7.5. Ya que esta estabilidad se mantiene en el lapso establecido para el arranque se puede considerar proceder con la operación en régimen semi-continuo aprovechando la dinámica del metabolismo microbiano.

Figura 3. Capacidad buffer durante el arranque del reactor.



3.2.2. Desempeño: La etapa de arranque es considerada una etapa inestable y crítica [19]. Esto se refleja en el comportamiento de la producción diaria de biogás en los primeros 15 días del arranque del reactor, descrito en la figura 4, donde entre los días 3 y 6 se alcanzaba el doble en el volumen de biogás con respecto a otros. Estas variaciones se deben, además, a que en el inicio del arranque la materia orgánica disponible para biodegradarse se encuentra en mayor proporción, teniendo en cuenta que es un residuo fácilmente biodegradable, lo que se refleja en elevadas producciones de biogás. Posteriormente la generación de biogás fue disminuyendo debido al agotamiento de la materia orgánica, hasta obtenerse valores constantes durante los últimos días de esta etapa.

La medida de la producción acumulada a condiciones estándar de presión y temperatura presenta una tendencia creciente durante los 30 días de la etapa inicial logrando para esta fecha un acumulado de 44573.99 mL. Las condiciones para dar paso a la operación semi-continua se determinan a partir de la estabilidad alrededor de cierto punto, hecho notorio en las curvas de capacidad buffer y producción de biogás.

Se obtuvo un rendimiento en la producción de biogás de  $0.46 \text{ m}^3$  de biogás/ kg SV\*día. Otros estudios para condiciones de operación similares reportaron el mismo valor de  $0.46 \text{ m}^3$  de biogás/ kg SV\*día en el rendimiento de producción [8]. Estos resultados señalan que el sistema tuvo un funcionamiento estable, sin riesgo de fallo en la operación *batch*.

En cuanto al consumo de ST y SV se observa en la figura 5 que hubo una degradación eficiente de la materia orgánica disponible para la DA, que indica una buena dinámica en el metabolismo microbiano. El consorcio microbiano consumió el 83% de los SV del sustrato para el día 30 de la etapa de puesta en marcha.

Figura 4. Volumen normalizado de biogás diario y acumulado durante el arranque del reactor.

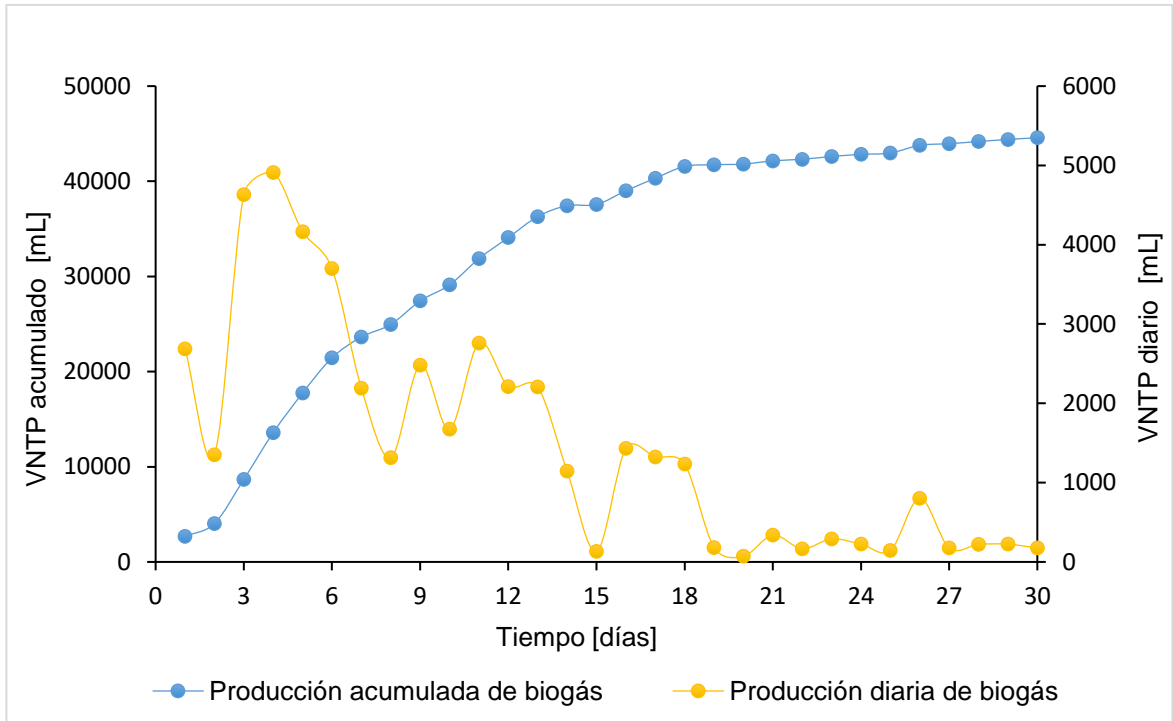
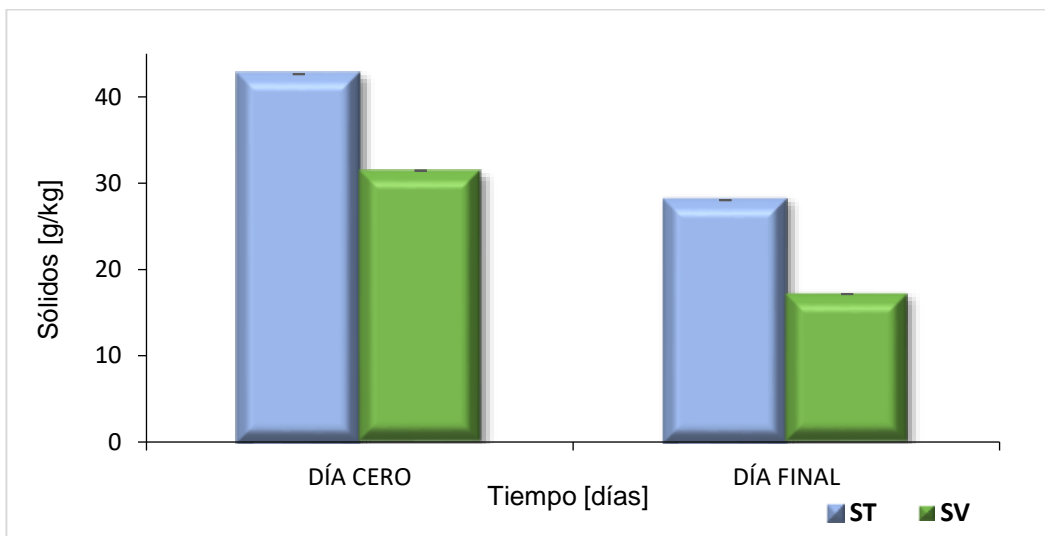


Figura 5. Consumo de ST y SV en el arranque del reactor.



### 3.3. EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN EN RÉGIMEN SEMI-CONTINUO.

Finalizado el tiempo propuesto para la primera etapa de digestión y dado el buen desempeño durante esta, en términos de estabilidad y producción de biogás, se evidencia que el consorcio microbiano se encuentra activo metabólicamente y listo para iniciar la segunda etapa propuesta, que es la operación del biorreactor en régimen semi-continuo.

3.3.1. Estabilidad: La estabilidad del sistema se puede determinar mediante el estudio de la relación de los cambios de AGV y el pH como se presenta en la figura 6.

En el desarrollo de la etapa con carga de  $1 \text{ gSV} / \text{L} \cdot \text{día}$ , los valores de AGV oscilan entre 600 y 800 mg/L, lo que demuestra que el proceso no experimentó ninguna inhibición por acidificación durante los 30 días donde se suministró esta cantidad de carga orgánica. Esta estabilidad también se ve reflejada en el pH obtenido durante la presente VCO, ya que no presentó perturbación y se mantuvo en el rango entre 7 y 8. Estudios anteriores exponen que, para residuos fácilmente biodegradables como los SAR, co-digeridos con algunos residuos agrícolas, el valor de VCO de  $1 \text{ gSV} / \text{L} \cdot \text{día}$  responde a una digestión eficiente en régimen continuo [18].

Durante la primera mitad del tiempo en el que se operó la VCO de  $3 \text{ gSV} / \text{L} \cdot \text{día}$  se evidencia un aumento del 166% en los AGV, oscilando este parámetro desde 720 hasta 1920 mg/L. Posteriormente se observa un incremento significativo desde 1920 hasta 8340 mg/L, lo que demuestra que esta etapa del proceso es afectada por la acumulación de AGV. En contraste, los valores de pH no sufren perturbaciones drásticas, los cuales permanecen en el rango de 7.2 y 7.8, lo que significa que, a pesar del incremento de AGV, los valores de alcalinidad del medio son superiores a estos y brindan capacidad de amortiguamiento a la acidificación que se presenta, permitiendo que el sistema continúe su desempeño aun con el riesgo de acidificación.

A pesar de los resultados obtenidos con la VCO de 3 gSV / L\*día, se decide continuar con el incremento de la carga orgánica para evaluar la capacidad de amortiguamiento y metabolismo del consorcio microbiano. De esta manera se procede a la VCO de 3.5 gSV / L\*día. Como se observa en la figura 6 el sistema no recuperó su desempeño y estabilidad. La tasa de producción de AGV se hizo mayor que el consumo de estos por parte de los metanógenos, así mismo los valores de AGV fueron superiores a los de alcalinidad. El sistema se desequilibró ya que los AGV superaron los 10000 mg/L. Valores por encima de este conducen al bajo rendimiento del reactor, desestabilizando el medio e inhibiendo la producción de metano [16], hecho notorio en la caída de la curva de pH.

Los valores de pH presentaron un buen desempeño durante las cargas de 1 y 3 gSV / L\*día, siguiendo una tendencia casi constante en el rango adecuado para el proceso de digestión. Un rango neutral estable para este tipo de tratamientos va de 7.0 a 7.5 [27]. El pH comenzó a disminuir junto con la creciente proporción de carga orgánica, al aumentar la VCO a 3.5 gSV / L\*día; este desempeño puede ser debido a que la creciente proporción de SAR en la mezcla conduce a un aumento en la fracción orgánica lábil, que se convierte adicionalmente en AGV [27]. La rápida velocidad en la producción de AGV se ve reflejado en la caída de este parámetro, favoreciendo el crecimiento de las bacterias acidogénicas.

La figura 7 describe el comportamiento de la capacidad buffer durante la co-digestión de los SAR y EB. La relación AGV/AT es utilizada como un indicador temprano de acidificación, comparado con los datos de pH que se alteran en estados avanzados y de difícil recuperación [19].

Estudios reportan que valores menores a 0.4 en la capacidad buffer aseguran la estabilidad en el proceso de digestión anaeróbica [10]. Los datos obtenidos de capacidad buffer durante la operación con VCO de 1 gSV / L\*día oscilaron entre 0.2 y 0.4, lo que indica el excelente desempeño del metabolismo microbiano y desarrollo de las etapas de la digestión.

Figura 6. Comportamiento de AGV y pH durante la Co-DA.

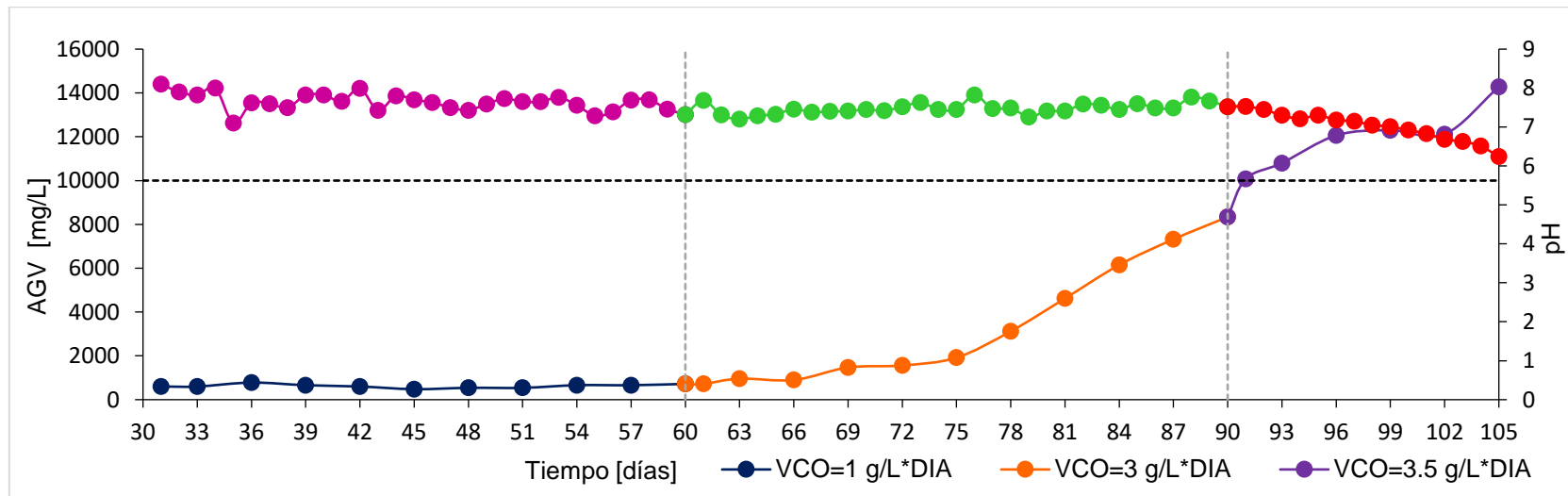
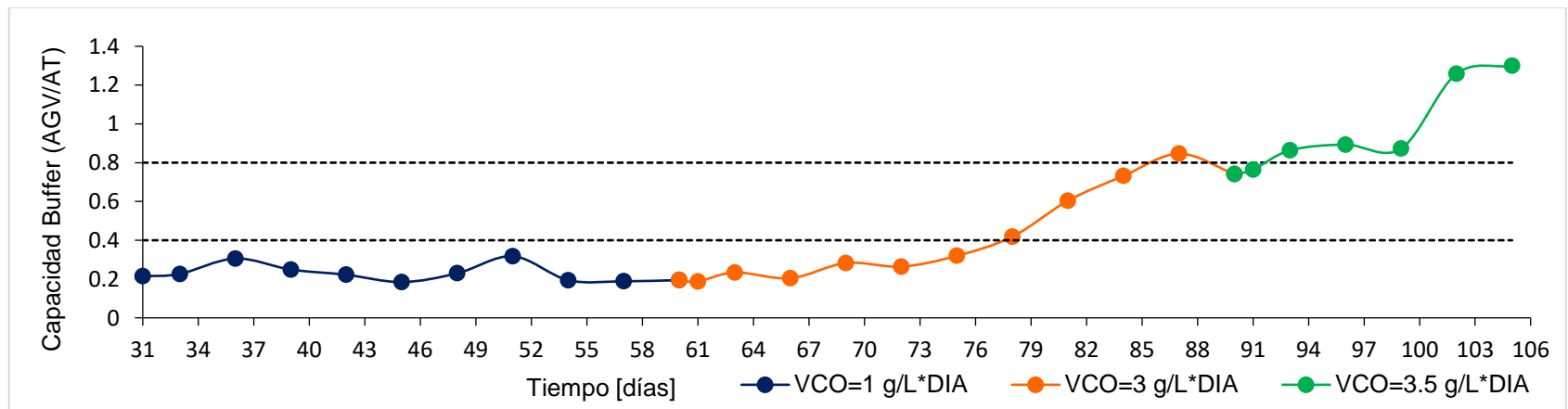


Figura 7. Variación de la capacidad buffer en la Co-DA



Para la siguiente VCO, 3 gSV / L\*día, se evidencia que hasta el día 75 el sistema se conservó estable sin riesgo de acidificación. Después de este día este parámetro indica el comienzo de la acidificación del proceso, ya que los valores superan el valor de 0.4 que garantiza la estabilidad. A partir del día 78 hasta el día 90 la relación AGV/AT presentó un incremento significativo, de 0.4 a 0.84, revelando cierta inestabilidad del proceso, hecho evidenciado al mismo tiempo en los valores de AGV. Finalmente, durante la VCO de 3.5 gSV / L\*día, se aumenta drásticamente la capacidad buffer, a tal punto de obtener valores superiores a la unidad que demuestran inestabilidad significativa del proceso, mayor concentración en AGV con respecto a la alcalinidad e inhibición en la actividad metanogénica. Debido a esto se decide suspender la operación del reactor en el día 105.

3.3.2. Desempeño: Las posibles razones para que el rendimiento sea estable incluyen: la conversión oportuna de AGV a metano, evitando la acumulación excesiva de AGV y que la alcalinidad sea suficiente para neutralizar los AGV acumulados [14]. Esto se refleja en la producción eficiente de biogás.

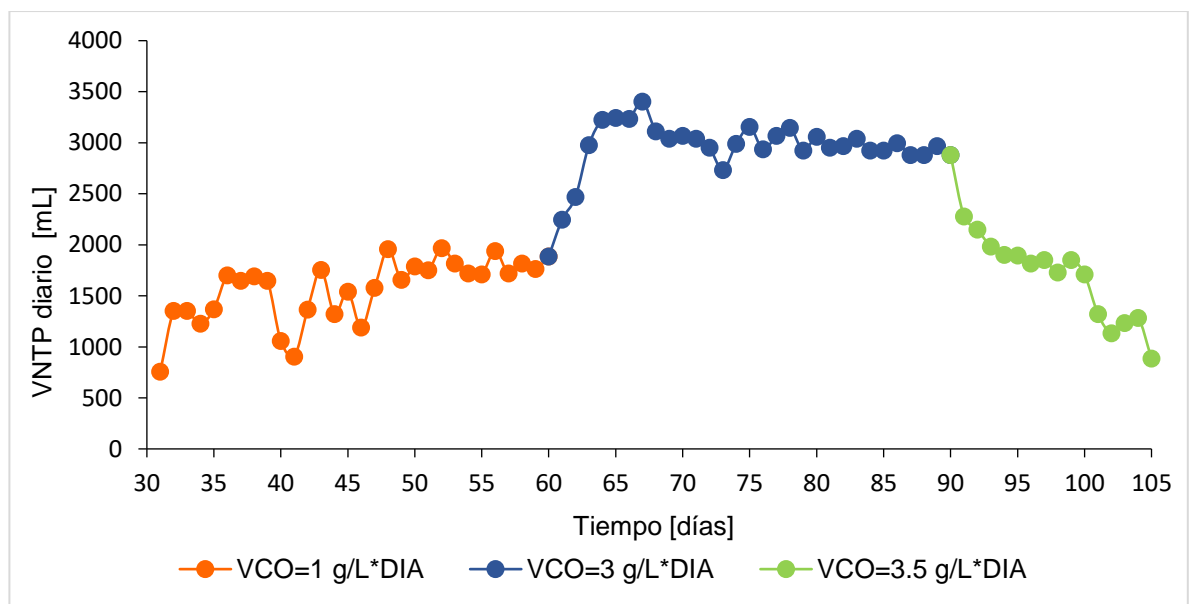
La figura 8 muestra la variación en la producción de biogás durante la Co-DA de SAR y EB. En los primeros 30 días de operación, donde la VCO es de 1 gSV / L\*día, la producción es creciente, con valores que oscilan entre 800 y 2000 mL, debido a la adaptación inicial del consorcio microbiano a las cargas diarias. Este resultado demuestra que las características de los sustratos al mezclarse en esta proporción son idóneas y generan un proceso estable.

Se obtuvo un aumento significativo de la producción de biogás cuando la VCO se incrementó a 3 gSV / L\*día; los valores fluctúan entre 1800 y 3500 mL, entre los días 60 y 90. Esto indica la adaptación de los microorganismos a condiciones superiores de VCO, ya que incrementa la cantidad de microorganismos disponibles representados en la concentración de SV; esto promueve una mejor degradación de los sustratos y una producción más eficiente de biogás [18].

El rendimiento en la producción de metano comienza a disminuir a partir del incremento de la VCO a 3.5 gSV / L\*día, cayendo este valor de 2900 a 880 mL, evidenciado el bajo desempeño en el proceso, demostrado en la figura 6 con la acumulación de AGV y caída de pH. Una vez que la VCO aumenta más allá de cierto umbral, la capacidad de amortiguación del digestor puede verse afectada significativamente, dando como resultado una disminución en el pH y producción de metano y la posterior inhibición de metanógenos [14].

Otros estudios también reportan que puede haber cierta inestabilidad en la digestión anaeróbica de residuos alimenticios cuando se opera a altas VCO [6].

Figura 8. Volumen de biogás normalizado durante la Co-DA.



Los rendimientos en la producción de biogás se presentan como una respuesta ante el desempeño del digestor. En la tabla 6 se presentan los rendimientos obtenidos en este estudio para cada VCO.

Tabla 6. Rendimiento de biogás.

<b>VCO</b> <b>[g SV/L día]</b>	<b>Rendimiento</b> <b>[m<sup>3</sup> biogás/ kg SV*día]</b>
1	2.0297
3	3.8664
3.5	2.1638

Se confirma el efecto sinérgico en la Co-DA de SAR y EB con los rendimientos de biogás superiores para la VCO de 3 gSV / L\*día. En comparación con otros estudios, un incremento de carga orgánica en los digestores de mono-digestión de residuos alimenticios conlleva a la acumulación de ácidos grasos volátiles que acidifican el sistema y afectan la producción de biogás. En la investigación realizada por Ageyman y Tao [28], se concluye que existe una mayor producción de metano en los tratamientos establecidos con cargas orgánicas bajas (2 gSV / L\*día). Marañón et al. [29], incrementaron la VCO de 1.2 a 1.5 gSV / L\*día, encontrando que el rendimiento específico de metano disminuye alrededor del 20 al 28% al aumentar la VCO. Así mismo, [30] y [31] demostraron reducción en la producción de biogás tras el aumento de la carga orgánica.

La mono-digestión de los residuos de alimentos a menudo conduce a la inestabilidad en el digestor e incluso al fracaso a tasas de carga orgánica altas, debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles y amoníaco. En contraste, la combinación de estiércol y residuos de alimentos mejora la disponibilidad y equilibrio de nutrientes y da lugar a valores de pH que no son inhibitorios a los metanógenos, ofreciendo condiciones de vida óptimas para los microorganismos anaerobios [28]; [24].

La tabla 7 presenta los resultados de investigaciones hechas a partir del tratamiento por co-digestión anaeróbica de residuos de alimentos y estiércol bovino con diferentes proporciones de mezcla.

Tabla 7. Resultados de otros estudios.

Proporción de mezcla		Rendimiento de biogás [m <sup>3</sup> biogás/ kg SV*día]	Referencia
SAR	EB		
34%	66%	0.570	[32]
48%	52%	0.531	[5]
50%	50%	0.790	[28]
79%	21%	2.029	E. E

Es posible concluir que la relación de mezcla de SAR y EB juega un papel determinante al momento de co-digerir estos residuos, evidenciándose que este factor puede ser significativo para el rendimiento de biogás. La proporción de mezcla empleada en este estudio, 79% SAR y 21% EB, presenta mayor ventaja en comparación con las otras relaciones, que permite obtener un valor superior en el rendimiento. Con esta relación se logra un buen desempeño del proceso, logrando el equilibrio de nutrientes dentro del consorcio microbiano, la cantidad adecuada de capacidad buffer en el medio para evitar la acumulación de compuestos volátiles y la producción de energía a través de biogás.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir del proceso de Co-DA se aprovecha la sinergia de los sustratos, que al mezclarse en la proporción correcta ofrece mejoras, no solo en el aumento del rendimiento del sistema, sino que permite aumentar la velocidad de carga orgánica con respecto a la reportada en la literatura como estable para la mono-digestión de SAR.

El digestor se pudo cargar hasta 3 g SV/L\*día obteniéndose las mejores producciones de biogás, sin inhibición del sistema, y el mayor rendimiento que fue de 3.8664 m<sup>3</sup> biogás/ kg SV\*día. Esto demuestra que la mezcla de SAR y EB, permite aumentar las tasas de carga orgánica, comparado con la mono-digestión de los residuos alimenticios, caracterizados por su fácil biodegradación.

La relación de mezcla de 79% de SAR y 21% EB es óptima para la co-digestión de estos residuos, ya que presenta un buen escenario que se ve reflejado en la mejora de la estabilidad del proceso e incremento en el rendimiento de biogás, comparados con otras proporciones.

## REFERENCIAS

- [1] FAO. Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo- Alcance, causas y prevención. Roma, 2012.
- [2] FAO. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. 2014.
- [3] MORENO, Eliberto y PORRAS, Zully. Estudio de la relación de mezcla de cosustratos para la codigestión anaerobia de sobrantes alimenticios de restaurante con estiércol bovino. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2016.
- [4] NAGAO, Norio, *et al.* Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*. 2012, vol. 118, pp. 210-218.
- [5] EL-MASHAD, Hamed M. y ZHANG, Ruihong. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*. 2010, vol. 101, pp. 4021-4028.
- [6] JIANG, Y.; HEAVEN, S. y BANKS, C.J. Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste. *Renewable Energy*. 2012, vol. 44, pp. 206-214.
- [7] GONÇALVES FERREIRA, Lílana. Evaluación de la biodegradabilidad anaerobia de residuos orgánicos pre-tratados térmicamente. Tesis doctoral. Valladolid. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del medio ambiente, 2013.

- [8] FISGATIVA, Henry; TREMIER, Anne y DABERT, Patrick. Characterizing the variability of food waste quality: A need for efficient valorization through anaerobic digestion. *Waste Management*. 2016, vol. 50, pp. 264-274.
- [9] CHU, Chun-Feng, *et al.* A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. *International Journal of hydrogen energy*. 2008, vol. 33, pp. 4739-4746.
- [10] CALLAGHAN, F.J., *et al.* Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*. 2002, vol. 22, pp. 71-77.
- [11] ZHANG, Cunsheng, *et al.* Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, vol. 38, pp. 383-392.
- [12] AINIA CENTRO TECNOLÓGICO. Valorización energética: producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales. Valencia. Parque Tecnológico de Valencia. Departamento Calidad y Medio Ambiente.
- [13] GÓMEZ, X, *et al.* Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes. Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate. *Renewable Energy*. 2016, vol. 31, pp. 2017-2024.
- [14] LI, Qian, *et al.* Effects of loading rate and temperature on anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high frequency feeding system, looking in particular at stability and efficiency. *Bioresource Technology*. 2017.
- [15] CASTELLS, Xavier Elias; CAMPOS, Elena y FLOTATS, Xavier. Procesos Biológicos: la digestión anaerobia y el compostaje. En: CASTELLS, Xavier

Elias. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2012, pp. 618-684.

- [16] KAFLE, Gopi Krishna y KIM, Sang Hun. Sludge exchange process on two serial CSTRs anaerobic digestion: Process failure and recovery. *Bioresource Technology*. 2011, vol. 102, pp. 6815-6822.
- [17] XU, Su Yun, *et al.* Effect of inoculum to substrate ratio on the hydrolysis and acidification of food waste in leach bed reactor. *Bioresource Technology*. 2012, vol. 126, pp. 425-430.
- [18] OWAMAH, H.I. y IZINYON, O.C. The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2015, vol. 11, pp. 71-76.
- [19] DÍAZ-BÁEZ, Maria Consuelo; ESPITIA, Sandra y MOLINA, Francisco. *Digestión Anaerobia: una aproximación a la tecnología*. Bogotá: Unibibios, 2002.
- [20] NEVES, L.; OLIVEIRA, R. y ALVES, M.M. Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. *Process Biochemistry*. 2004, vol. 39, pp. 2019-2024.
- [21] APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 1999.
- [22] LAMBIS, Luis; MARIN, Jose; CASTRO, Liliana y ESCALANTE, Humberto. Influence of organic load and mixing ratio on response and stability of food waste and cattle manure anaerobic digestion. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.

- [23] PARRA OROBIO, Brayan Alexis, *et al.* Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. 2015, vol. XVI, nro. 4, pp. 515-526.
- [24] PAVI, Suelen, *et al.* Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste. *Bioresource Technology*. 2017, vol. 228, pp. 362-367.
- [25] CARLIN SANTANA, R. E. Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno. Trabajo de grado Ingeniero en Ambiente y Desarrollo. Honduras. Escuela Agrícola Panamericana. 2015.
- [26] YANG, Guang, *et al.* Degradation properties of protein and carbohydrate during sludge anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 2015, vol. 192, pp. 126-130.
- [27] YONG, Zihan, *et al.* Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production. *Renewable Energy*. 2015, vol. 78, pp. 527-530.
- [28] AGYEMAN, Fred O. y TAO, Wendong. Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*. 2014, vol. 133, pp. 268-274.
- [29] MARAÑÓN, E, *et al.* Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste Management*. 2012, vol. 32, pp. 1821-1825.
- [30] BANKS, Charles J., *et al.* Trace element requirements for stable food waste digestion at elevated ammonia concentrations. *Bioresource Technology*. 2012, vol. 104, pp. 127-135.

- [31] EL-MASHAD, H. M.; MCGARVEY, J. A. y ZHANG, R. Performance and microbial analysis of anaerobic digesters treating food waste and dairy manure. *Biological Engineering*. 2008, vol. 1, nro. 3, pp. 233-242.
- [32] XIAO, Gang, *et al.* The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*. 2013, vol. 129, pp. 170-176.
- [33] ANDERSON, G. K. y YANG, G. Determination of bicarbonate and total volatile acid concentration in anaerobic digesters using a simple titration. *Water Environment Research*. 1992, vol. 64, nro. 1, pp. 53-59.

## BIBLIOGRAFÍA

AGYEMAN, Fred O. y TAO, Wendong. Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of Environmental Management*. 2014, vol. 133, pp. 268-274.

CALLAGHAN, F.J., *et al.* Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*. 2002, vol. 22, pp. 71-77.

CHU, Chun-Feng, *et al.* A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008, vol. 33, pp. 4739-4746.

FISGATIVA, Henry; TREMIER, Anne y DABERT, Patrick. Characterizing the variability of food waste quality: A need for efficient valorization through anaerobic digestion. *Waste Management*. 2016, vol. 50, pp. 264-274.

MARAÑÓN, E, *et al.* Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste Management*. 2012, vol. 32, pp. 1821-1825.

ZHANG, Cunsheng, *et al.* Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, vol. 38, pp. 383-392.

## ANEXOS

ANEXO A. Propuesta de parámetros óptimos, carga orgánica y relación de mezcla, en la Co-DA de SAR y EB.

Se evaluaron los efectos de las variables relación de mezcla y carga orgánica, sobre el rendimiento y la estabilidad de la co-digestión anaeróbica de SAR y EB, en operación discontinua. Posteriormente, el estudio de estos efectos se realiza mediante un diseño de experimentos  $2^2$ , en donde se encontró que tanto las variables como su interacción tienen un efecto significativo sobre el comportamiento del sistema, determinando a través de un diseño central compuesto, la curvatura y regiones de mayor rendimiento del sistema.

Figura 9. Superficie de respuesta del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB.

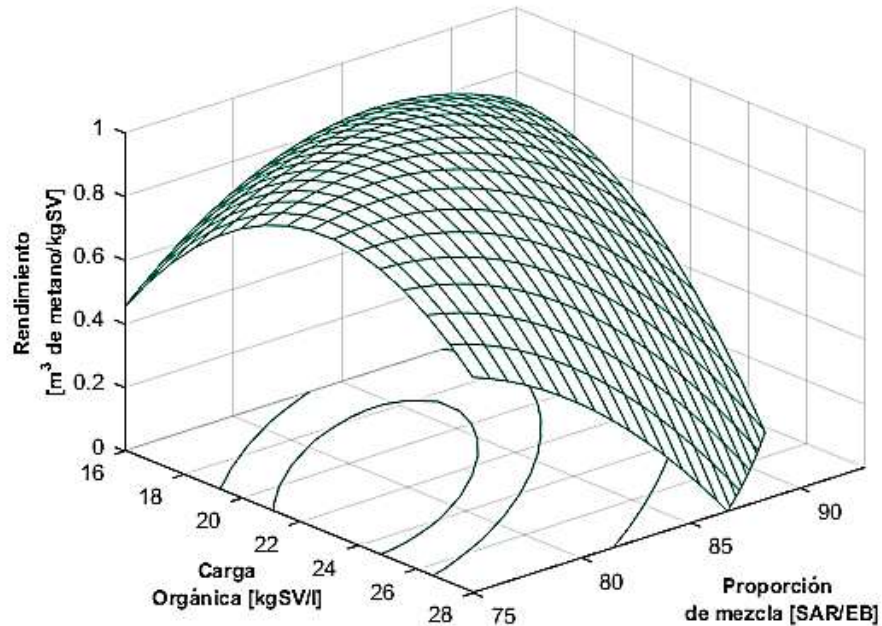
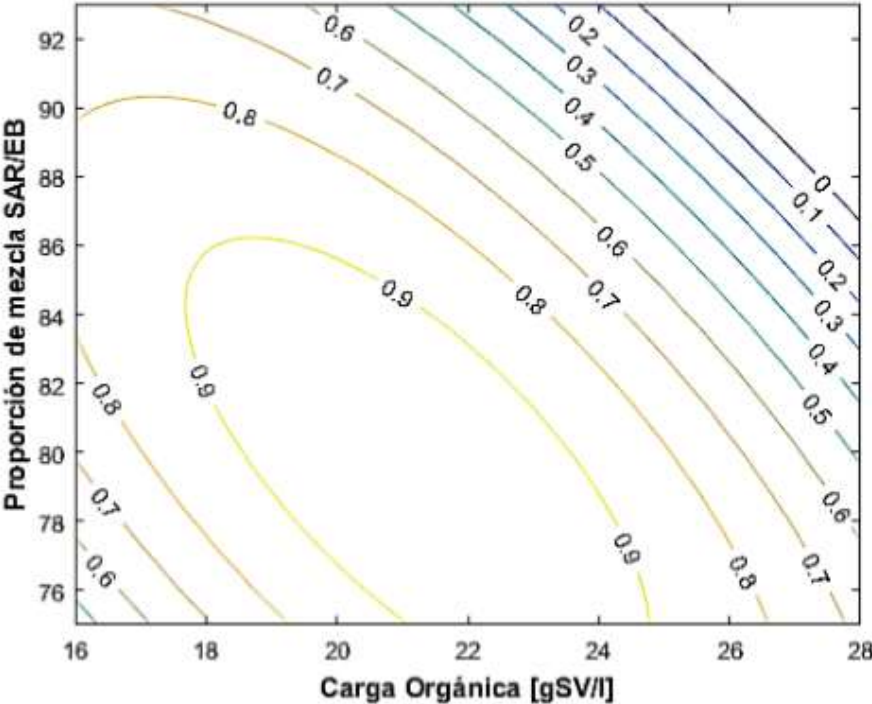


Figura 10. Comportamiento del rendimiento de metano para la co-digestión de SAR y EB.



Tomado de: [3].

ANEXO B. Cálculo del volumen de biogás a condiciones normales de temperatura y presión (VNTP).

Para poder comparar las producciones de biogás y por lo tanto el rendimiento, es necesario llevar el volumen de metano a condiciones normalizadas. Este procedimiento se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{NTP} = V \cdot \frac{(P_0 - P_v) \cdot T_0}{P_{atm} \cdot T}$$

$V_{NTP}$  Volumen de gas en condiciones normales (mL)

$V$  Volumen de gas generado (mL)

$P_0$  Presión de metano en condiciones normales (1013,25 mbar)

$P_v$  Presión de vapor del agua (mbar).

$$P_v \text{ (mbar)} = 10 \cdot e^{\left(16,573 \cdot \frac{3988,842}{T(K)-3847}\right)}$$

$T_0$  Temperatura estándar 273,15 (K)

$T$  Temperatura al momento de medir (K)

Tomado de: [19]

ANEXO C. Determinación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) en muestras sólidas y semisólidas.

Es una medida de la cantidad de materia orgánica presente en la fracción sólida de una muestra.

Materiales:

- Crisoles
- Balanza analítica
- Horno de secado, operaciones de 103-105 °C
- Horno de mufla para operar a 550±50 °C
- Desecador.

Procedimiento:

1. Pesar el crisol seco y vacío. Registrar el valor.
2. Pesar el crisol una cantidad significativa de muestra.
3. Llevar la muestra al horno de secado por 24 h.
4. Transcurridas las 24 horas, sacar el crisol del horno, ponerlo en el desecador hasta que llegue a temperatura ambiente, pesar y registrar el valor.
5. Llevar el crisol al horno mufla hasta que alcance una T 550 °C durante una hora, apagar el horno y dejar enfriar hasta temperatura ambiente.
6. Pesar el crisol y registrar el valor.

Cálculos:

$$\text{Sólidos totales (g ST/Kg)} = \frac{(C - A) \cdot 1000}{(B - A)}$$

$$\text{Sólidos Volátiles (g SV/Kg)} = \frac{(C - D) \cdot 1000}{(B - A)}$$

A = peso de crisol seco (g).

B = peso de crisol + muestra húmeda (g).

C = peso del crisol después del horno de secado (g)

D= peso del crisol después del horno mufla (g)

Todos los experimentos se hacen por duplicado.

Tomado de SM 2540 E [21].

ANEXO D. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT).

Materiales:

- Vaso de precipitado de 100 mL
- Probeta de 25 mL
- Centrifuga
- pH-metro
- Agitador magnético
- Plancha de agitación magnética
- Balones esmerilados de fondo redondo o plano
- Condensador
- Estufa de calentamiento
- 2 buretas
- Soporte universal
- Pinzas con nuez
- Solución NaOH al 0,1 N
- Solución de HCl al 0,1 N

Procedimiento:

1. Tomar una muestra de aproximadamente de 40 mL en tubos Falcom de 50 mL
2. Centrifugar las muestras a 5000 rpm por 30 min.
3. Retirar el sobrenadante en tubos Falcom de 20 mL, medir el pH y registrar el valor.
4. Medir 5 mL de sobrenadante y llevarlo a un vaso de precipitado de 100 mL.
5. Medir en una probeta 25 de mL de agua destilada y agregarla a los 5 ml de sobrenadante.
6. Titular con HCl 0,1 N, llevando el pH de 6,5 a 3. Registrando el volumen correspondiente manteniendo agitación continua. Registrar el volumen ( $V_1$ )

7. Llevar la muestra a un balón esmerilado, adaptado al condensador, calentar hasta ebullición y mantener por 2 min.
8. Titular con NaOH 0,1 N, hasta alcanzar un pH de 6,5. Registrar el volumen ( $V_2$ ).

Cálculos:

$$\text{Alcalinidad Total (AT)} = \frac{V_1 \cdot N_{HCl} \cdot 50000}{5} \left[ \frac{\text{mg CaCO}_3}{\text{L}} \right]$$

$$\text{AGV} = \frac{V_2 \cdot N_{NaOH} \cdot 60000}{5} \left[ \frac{\text{mg Ac. Acético}}{\text{L}} \right]$$

$N_{HCl}$  = Concentración de ácido clorhídrico (Normalidad)

$N_{NaOH}$  = Concentración de hidróxido de sodio (Normalidad)

$V_1$  = Volumen de HCl para llevar la muestra de un pH de 5,75 a 4,3.

$V_2$  = Volumen de NaOH para llevar la muestra de un pH de 3 a 6,5.

Todos los experimentos se hacen por duplicado.

Tomado de: [33]