

EL MÉTODO DIALÉCTICO EN EL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS.

THE DIALECTICAL METHOD IN THE ANAEROBIC DIGESTION PROCESS FOR THE TREATMENT OF SOLID WASTE.

Muñoz-Menéndez María Belén¹; Contreras-Moya Ana Margarita²; Santos-Herrero Ronaldo Francisco³; Rosa-Domínguez Elena Regla⁴; Cárdenas-Ferrer Teresa Margarita⁵

¹ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM. Manta, Ecuador. beleta_1983@hotmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-1705-2259>.

² Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara, Cuba. anama@uclv.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0001-9374-9376>.

³ Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara, Cuba. ronaldo@uclv.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0002-5009-2084>.

⁴ Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara, Cuba. erosa@uclv.edu.cu. <https://orcid.org/0000-0002-5371-0976>.

⁵ Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara, Cuba. teresam@nauta.cu. <https://orcid.org/0000-0003-2054-3136>.

Resumen

El manejo de residuos sólidos se ha configurado en una temática relevante y de creciente interés en la comunidad científica interesada en este tópico, dado que es de conocimiento público la dificultad que comporta su manejo y tratamiento, que generan daños complejos al medio ambiente. Este trabajo tiene el objetivo de analizar el proceso de digestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos de Manta, desde la asunción del método dialéctico. Entre los resultados destaca que: El proceso de digestión anaerobia en fases separadas es un esquema novedoso que mantiene dos reactores en serie, en los que se llevan a cabo las fases de acidogénesis y metanogénesis, respectivamente. Del análisis realizado, se confirma que una de las posibles alternativas de respuesta para disminuir el problema en la fracción orgánica de los RSU es el hallazgo de un procedimiento energético, a través de su tratamiento por biogás.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos; digestión anaeróbica; fases separadas, método dialéctico.

Abstract

The management of solid waste has become a relevant topic of growing interest in the scientific community interested in this topic, given that the difficulty of its management and treatment, which generates complex damage to the environment, is public knowledge. This work has the objective of analyzing the anaerobic digestion process of urban solid waste in Manta, from the assumption of the dialectical method. Among the results, it stands out that: The anaerobic digestion process in separate phases is a novel scheme that maintains two reactors in series, in which the acidogenesis and methanogenesis phases are carried out, respectively. From the analysis carried out, it is confirmed that one of the possible response alternatives to reduce the problem in the organic fraction of MSW is the discovery of an energy procedure, through its treatment by biogas.

Keywords: Solid urban waste; anaerobic digestion; separate phases, dialectical method.

1. Introducción

Actualmente, el manejo de residuos sólidos se ha configurado en una temática relevante y de creciente interés en la comunidad científica interesada en este tópico, dado que es de conocimiento público la dificultad que comporta su manejo y tratamiento, sin cuyos procedimientos implicarían vertederos terrestres y marítimos que generarían daños complejos al medio ambiente.

De tal manera lo exponen (Beily, Bres, Rizzo, Giampaoli y Crepo, 2010), quienes refieren lo que se inserta a renglón seguido: "La falta de tratamiento y la incorrecta disposición final de los residuos, sólidos urbanos (RSU) produce contaminación sobre el suelo en el que se depositan, en la aguas subterráneas y superficiales circundantes, en el aire por emisiones de gases metánicos o humos nocivos derivados de la combustión incompleta de ellos." (p. 01.37).

Por su parte, (Montes, 2008) en su trabajo denominado: "Estudio Técnico Económico de la digestión anaeróbica conjunta con la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de la depuradora para la obtención de

biogás" destaca que: al hablar de medio ambiente indudablemente se deben mencionar la generación de residuos, en todos los estados físicos (sólidos, líquidos y gaseosos) así como el daño que causan en la sociedad, tanto su presencia, como los productos de su descomposición o los gastos generados por su disposición adecuada. (P. 25).

A lo antes expuesto se adosa lo referido por (Da graca, 2009) quien afirma lo siguiente: "El manejo de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), es complejo y se ha venido agudizando con el crecimiento y desarrollo económico de la sociedad, provocando a su vez una serie de inconvenientes sanitarios, tales como, la generación de focos de infección y vectores contaminantes de fuentes hídricas y recursos naturales. Para el tratamiento de los desechos urbanos no es suficiente conocer los aspectos generales, como, por ejemplo: recolección, reciclaje y disposición final; sino también el aplicar nuevos conceptos y tecnologías sostenibles, en donde los residuos, especialmente los orgánicos se direccionen hacia procesos, en los cuales no solo se reduzca la cantidad, sino también se pueda obtener un producto o

subproducto(s) que generen un valor agregado". (p. 4).

Estos tres trabajos se conforman en investigaciones que han abordado con anterioridad el tema de la digestión anaeróbica de los desechos sólidos urbanos, mismos que han sido tomados como referentes teórico-metodológicos de esta investigación, porque aportan en la comprensión y el análisis del objeto de estudio que se pretende abordar, en el marco de lo cual, se observan puntos coincidentes en sus consideraciones, que a su vez son convergentes con las apreciaciones de los autores de la presente investigación en torno a la potencial nocividad de los desechos sólidos urbanos si estos no son procesados con el debido tratamiento que se requiere.

Desde este marco referencial, cabe resaltar que el manejo de los residuos sólidos urbanos en la actualidad se ha convertido en un problema de evidente incidencia en la sociedad ecuatoriana y mantiene en particular, dado a factores de crecimiento poblacional, actividades turísticas, consumismo, falta de concienciación de la población manabita. Es así como también las actividades comerciales, y académicas

generan la producción de desechos sólidos urbanos que generan residuos, los cuales producen diversos impactos que no han sido suficientemente abordados.

En este escenario manabita existe un mundo dinámico y cambiante de comercios, centros comerciales, universidades, instituciones educativas, gubernamentales, complejos urbanísticos, portentos en hotelería, mercados en fin que se conglomeran como unidades de mayor impacto en la generación de RSU. De allí que sea consideración de los autores que todos los recursos naturales son afectados por los procesos de manejo y disposición final de los residuos sólidos (Jaramillo y Zapata, 2008), ya que la gestión inadecuada de estos afecta todas las actividades, personas y espacios.

La generación de residuos tiene una triple repercusión ambiental, contaminación, desperdicio de recursos y la necesidad de espacio para su disposición. Por lo que las implicaciones que los mismos plantean sobre la contaminación ambiental y el agotamiento de los recursos naturales, hace que sea esencial la búsqueda de caminos para su gestión correcta desde

el punto de vista ambiental, económico y social. Una gestión que aborde el ciclo completo de los residuos sólidos, desde la generación, recolección y transporte hasta la disposición final, el tratamiento y su eventual reutilización y aprovechamiento, conlleva claros beneficios para la salud humana (Tenorio, 2008; ONU-Hábitat, 2012).

La gestión integral de los residuos sólidos busca ser compatible con las preocupaciones ambientales y la salud pública, se enmarca en la filosofía del desarrollo sostenible. En diferentes países la jerarquización de tales alternativas es similar y se agrupa como: prevención (minimización y reducción en la fuente), valorización, reutilización, reciclaje y compostaje, recuperación de energía (digestión anaerobia, incineración, etc.) y disposición final en rellenos sanitarios (Barradas, 2009; Castellanos, 2017). Las tecnologías implicadas inciden en los sistemas productivos, ya que se hace necesario producir más con menos recursos. Considerando lo anterior, la actual jerarquía de gestión de residuos puede verse como un menú de opciones de recuperación, entre la prevención y la disposición final y esto es coincidente

con lo formulado por diferentes autores (Soto, 2014; Mandujano, 2001; Castellanos, 2017).

La reutilización no solo es importante por la riqueza de los materiales desechados, sino por los beneficios indirectos que implica: menor ocupación del suelo destinado al vertido, ahorro energético y disminución de la contaminación.

En ese orden, es asunción de los autores que el desarrollo de estudios experimentales de la degradación anaeróbica de la fracción orgánica biodegradable presente en los RSU, explica desde el punto de vista teórico experimental la realidad biológica de este tipo de procesos, según las variables que influyen en este, para a partir de ellos modelar y simular el procedimiento.

En virtud de lo anteriormente expuesto, Este trabajo tiene el objetivo de analizar el proceso de digestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos de Manta, realizado en el Centro de Servicio para el Control de la Calidad CESECCA, con énfasis en los productos con alto valor agregado que se pueden obtener en el proceso en fases separadas. Esto desde

la asunción del método dialéctico, que permite el análisis de contenido y la combinación de unidades dialécticas.

Aunado a lo antes descrito, este trabajo se adscribe a las líneas de investigación en el marco de la Tesis Doctoral denominada: "Evaluación de alternativas para la gestión de los residuos sólidos municipales en EL Cantón MANTA, provincia de Manabí, Ecuador", de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad Central Martha Abreu de las Villas, Cuba; a los documentos rectores del país sobre esta materia y pretende presentar aportes epistémico-metodológicos que sirvan de base referencial para la comunidad científica interesada en el estudio de este tipo de tópicos temáticos.

2. Método

Entre los métodos científicos, se aplicaron los teóricos; el analítico sintético, y el inductivo-deductivo (Barreras, 2009). Entre los métodos empíricos se aplicó el de la revisión de la literatura; el análisis de contenido, la unidad de los contrarios; se recogió la información más importante y pertinente para profundizar y sistematizar el tema. Se emplearon

técnicas como la observación y experimentación científica, ya que los investigadores se involucraron directa e indirectamente en los hechos. (Cerezal y Fiallo, 2004).

2.1. Metodología para el estudio de los parámetros operacionales del proceso de digestión anaeróbica de la FORSU en fases separadas.

A partir de los resultados de la gestión de RSU en Manta y del estudio de las tecnologías disponibles para la transformación y/o aprovechamiento de estos, se realiza un análisis técnico y ambiental de la alternativa a recomendar, como la más adecuada desde el punto de vista de la sostenibilidad (Elite Consultor, 2011). La alternativa incluye una planta de transferencia y clasificación de los residuos, reciclaje de los RSI, tanto como sea posible, digestión anaeróbica de la FORSU mediante fases separadas (acidogénesis y metanogénesis) y relleno sanitario.

Análisis de la alternativa.

Para el análisis de la alternativa se considera la generación de RSU proyectada en Manta para el año 2021, que es de aproximadamente 250 t/d

(Elite Consultor, 2011). En la figura 1 aparece el diagrama de la alternativa que parte de la recogida selectiva de los RSU y la entrada en una planta de transferencia y clasificación, donde se separan los RSI, la FORSU y otros que no se incluyen en estas categorías. De la fracción inorgánica se separan los que pueden ser reciclados y los restantes, junto con los denominados "otros" y parte de la FORSU se disponen en el RS; mientras los RSI y FORSU con características adecuadas son enviados a la empresa comercializadora y proceso de digestión anaeróbica respectivamente.

Se consideran potencialmente reciclables 58,05 t de RSI, que, según los resultados de caracterización y criterios para el establecimiento de la alternativa, se corresponden con 26,38 t de plástico, 22, 93 t de papel y cartón, 4,63 t de vidrio y 4.13 t de metal.

En la primera fase de la digestión anaeróbica ocurre la hidrólisis y acidogénesis y el efluente de este digester constituye la alimentación al otro digester donde ocurre la segunda fase, o metanogénesis. Como se explicó, los resultados alcanzados en este tipo de procesos demuestran que con la separación de fases es posible disminuir el tiempo de retención, lograr mejor rendimiento en la eliminación de SV y mejor poder calórico en el biogás. Además, el tratamiento de los RSU en unión con los lodos de depuradoras de aguas residuales presenta ventajas en la obtención del gas combustible y las características fertilizantes del efluente (Mandujano, 2001).

Este nuevo proceso tiene otras ventajas, ya que permite obtener simultáneamente hidrógeno y biogás; también se pudieran producir otros productos de alto valor agregado a partir de la FORSU fermentada. La tecnología necesaria, de acuerdo al esquema que se muestra en la figura 2, está disponible a escala industrial, la misma que ya se está aplicando para la digestión anaeróbica convencional, pero con algunas modificaciones, por lo que se requiere establecer las condiciones de operación adecuadas (Escamilla-Alvarado et al., 2011).

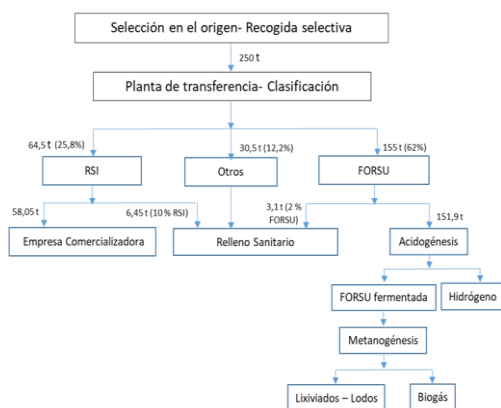


Figura 1. Diagrama de la Alternativa

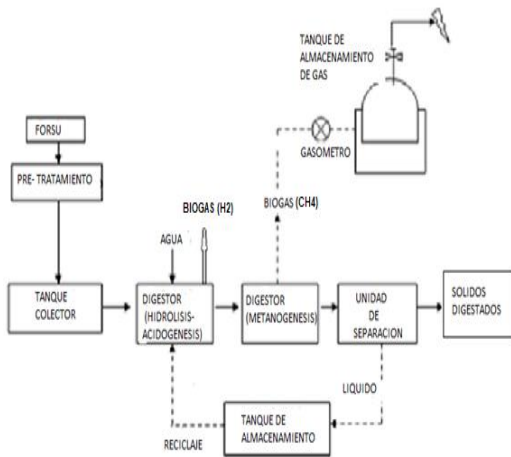


Figura 2. Proceso de digestión anaeróbica en fases separadas

El pre- tratamiento consiste en la trituración hasta diámetros de 0,3- 5 mm en condiciones húmedas, a las que se les realizó análisis de ST, SV y pH.

Las condiciones de operación para el tratamiento de la FORSU mediante digestión anaeróbica en fases separadas se establecen mediante el procedimiento experimental que se describe.

2.2. Diseño del procedimiento experimental

La simulación a nivel de laboratorio del proceso consta de los siguientes pasos:

1. Preparación de la FORSU:
 - Recepción,
 - Selección,
 - Separación,
 - Reducción de tamaño

2. Adición de humedad y de nutrientes:

- Adición de agua residual proveniente de depuradora de residuales urbanos.
- Mezclado,
- Ajuste de pH,
- Estabilización del proceso

3. Evaluación- control del proceso y recogida de los productos:

- Medición de los parámetros de evaluación- control, con la frecuencia establecida,
- Captura y almacenamiento de los componentes gaseosos,
- Deshidratación y evacuación de los fangos digeridos.

3. Resultados y Discusión

Se ratifica el valor del tratamiento, ya que modifica las características físicas, químicas o biológicas de los residuos, para aprovecharlos, estabilizarlos o reducir su volumen, antes de la disposición final, considerando que la gestión adecuada de los RSU requiere tratar por separado la FORSU y la fracción inorgánica. De forma general, los RSU orgánicos no deben ser enviados a los rellenos sanitarios (RS) y los inorgánicos, deberán ser separados de

forma adecuada para recuperar los residuos reciclables antes de la disposición en RS. De esta forma, a los RS llegarán los RSU inorgánicos no reciclables y algunos orgánicos no aprovechables. La generación de metano de ese RS, al que no se le "alimenta" con residuos orgánicos, será más limitada que en otros, pero su capacidad para recibir residuos podrá ser mucho mayor (Escalona, 2014; Romero-Paredes, 2013).

El proceso de digestión anaerobia en fases separadas es un esquema novedoso que mantiene dos reactores en serie, en los que se llevan a cabo las fases de acidogénesis y metanogénesis, respectivamente con el objetivo de conseguir un tiempo de retención global inferior al de un único reactor.

En la etapa acidogénica (fermentación oscura) se genera un biogás con alto contenido en hidrógeno, lo que tiene especial interés ya que el hidrógeno se considera el vector energético del futuro próximo y su producción a partir de la degradación de residuos orgánicos presenta un especial interés (Angeriz, 2018), ya que, como se mencionó anteriormente, reciclar tomado el residuo como materia prima es la

estrategia más afín al principio de sustentabilidad y las biorrefinerías constituyen una de las aplicaciones más avanzadas de la misma.

La biomasa es el mayor contribuyente a la generación de energías renovables (Bentsen, 2019) y según BIOPLAT y SusChem-España (2017) y Chandra et al. (2019), se refiere a la fracción biodegradable de los productos y residuos de origen biológico procedentes de diferentes actividades, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales (FORSU).

El aprovechamiento de la biomasa como materia prima, para la obtención de productos y energía, presenta grandes ventajas pues constituye una fuente renovable, permite tener un control de desechos y reduce la contaminación al disminuir la emisión de gases contaminantes (Agrela et al, 2019).

Para eliminar o disminuir los daños que los RSU provocan se utilizan diferentes métodos de tratamiento entre los que se destaca la digestión anaerobia como uno de los procesos más atractivos en la actualidad. La digestión anaeróbica es un proceso que convierte la materia

orgánica en una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. Los problemas en el control y estabilización de los sistemas convencionales de digestión anaerobia han llevado al desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas, entre estas la separación de fases, que implica una configuración de reactores separados; una primera fase para la hidrólisis y acidogénesis y una segunda para la acetogénesis y metanogénesis, conectados en serie, permitiendo la optimización de cada proceso por separado. La primera fase ha sido poco estudiada, la cual consiste en la conversión de compuestos complejos, como los aminoácidos, glucosa y ácidos grasos de cadena larga, por medio de la fermentación, en hidrógeno y ácidos grasos volátiles (AGV) (acético, butírico, propiónico y valérico). La mayoría de los AGV para uso industrial que se producen en el mundo, se obtienen a partir de combustibles fósiles, mediante de síntesis química. Por lo tanto, la fermentación acidogénica se presenta como una plataforma que consolida el concepto de biorefinería en lugar de una etapa de tratamiento convencional.

Las diferentes aplicaciones del hidrógeno y los AGV hacen que el proceso de fermentación acidogénica tome importancia y sea campo de estudio.

Actualmente se han desarrollado diferentes estudios de producción de biogás a partir de numerosas materias primas, aún insuficientes en el caso de la fracción orgánica de los residuos urbanos (FORSU) y sobre todo en el caso de la digestión anaerobia en fases separadas. El estudio y utilización de estos métodos brinda la posibilidad de tratar un residuo que puede ser contaminante para el medio ambiente, reciclarlo y convertirlo en productos de alto valor agregado.

Escamilla-Alvarado et al. (2012a) reportaron que una serie de procesos de fermentación oscura - digestión anaeróbica metanogénica (FO-DA) de la FORSU, que ellos crearon (H-M), (H: la fase de producción de hidrógeno, M: la fase de producción de metano) en procesos termofílicos y mesofílicos, fueron en promedio 76 y 42% superior, en términos de potencial energético, que el bioreactor metanogénico solo. Además, Escamilla-Alvarado et al. (2012b, 2013a) reportaron otras

mejoras logradas en la fermentación de hidrógeno de la serie de procesos FO-DA de la FORSU.

En la literatura científica se observa un interés por la valoración de las cadenas de valor basadas en biomasa, cuya sostenibilidad es principal para la implantación de biorefinerías, ya que los productos de estas deben mostrar menores impactos que los productos convencionales (De Jong y Jungmeier, 2015; Saraiva, 2017; Cherubini y Strømman, 2011; Ivanov et al., 2015; Zhang, 2008). Las metodologías más comunes que aportan valoraciones adecuadas son el análisis de ciclo de vida (ACV) y análisis costo beneficio. De aquí que una valoración científicamente fundamentada, basada en ACV de nuevos productos basados en biomasa es beneficioso para la toma de decisiones (Lindorfer, et al. 2019).

Coincidiendo con lo anterior y otros autores, Bovea (2016) plantea la metodología de ACV como la mejor herramienta para evaluar el desempeño medioambiental de sistemas de gestión de residuos, ya que permite evaluar, desde una perspectiva global, todos los impactos ambientales que ocasiona la gestión integral de los residuos (Aren

et al. 2003, Mc Dougall et al. 2001, Laurent et al. 2014).

El sistema en fases cuenta con dos biodigestores. Se utilizan los digestores de vidrio existentes

En el Centro de Servicio para el Control de la Calidad CESECCA, ente adscrito a la Facultad de Ingeniería Industrial en las instalaciones de la Universidad Laica "Eloy Alfaro de Manabí", en la cual se dispone de equipos y diogestores con los que pueden efectuarse los ensayos físicos, químicos y microbiológicos a productos alimenticios, diversos materiales sólidos, efluentes industriales, agua, cumpliendo con las normas y regulaciones nacionales e internacionales vigentes. Información disponible en

<https://www.ulead.edu.ec/mipro-entrega-equipos-para-laboratorio-de-cesecca/>



Imagen 1. Ing. María Belén Muñoz Menedez, MSc., en la Escuela de Ingeniería Industrial CESECCA (ULEAM).

En este centro se dispone de un sistema con regulación de temperatura, a través de un termostato de circulación, diseñado para este tipo de usos, que además cuenta con una pantalla en la que se puede visualizar valores de temperatura.



Imagen 2. Cromatógrafo de gases del CESECCA (Facultad de Ingeniería Industrial ULEAM).



Imagen 3. Parte del equipo de investigadores en el CESECCA.



Imagen 4. Comenzando el procedimiento.

Para este experimento se preparó en el laboratorio una mezcla de FORSU (que representa aproximadamente la composición en carbohidratos, proteínas, etc. de la FORSU original, a partir de restos de comida, carnes, verduras, frutas, cascaras de vegetales, postres, etc y se caracterizó. La reducción de tamaño se realizó mediante la molienda de la FORSU a un tamaño de partícula de 5 mm aproximadamente, en condiciones húmedas. Una vez reducido el tamaño de los residuos seleccionados, se procedió a hidratar con la cantidad de residual establecida, ya que se estudió la codigestión con agua de una planta de tratamiento anaerobia de aguas residuales o una laguna anaeróbica.

La caracterización fisicoquímica de los sustratos: agua residual, FORSU y mezcla de agua-FORSU se realizaron mediante los parámetros y métodos que se muestran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Parámetros utilizados para la caracterización del residual y la mezcla agua-FORSU.

Parámetro	Unidad	Método
Sólidos Totales (ST)	Kg/m ³	Standard methods (APHA, 2005)
Sólidos Totales Volátiles (STV)	Kg/m ³	

Tabla 2. Parámetros utilizados para la caracterización de la FORSU.

Parámetro	Unidad	Método
Materia orgánica, Sólidos Volátiles	% Kg/m ³	Técnicas Analíticas estandarizadas

Se implementó el sistema en dos fases en rango mesofílico, cuyo valor óptimo de temperatura es de 30°C a 33°C y se evaluó su eficiencia en el tratamiento mediante monitoreo y análisis de los parámetros operacionales y de control establecidos (Mandujano, 2001). Según Montes (2008), la concentración de sólidos totales en digestores anaerobios debe estar entre 22-28 kg/m³, para ser considerados de Alta Carga, valor dado por Tchobanoglous (2004). Por lo que, la concentración adecuada de FORSU para preparar la alimentación al digestor está entre 70 y 90 g de FORSU/L.

La determinación de los parámetros fisicoquímicos para la caracterización y operación del sistema se realiza según se describe en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros utilizados para la operación y control del sistema.

Parámetro	Unidad	Método
Temperatura	°C	Termómetro
pH	-	pH metro
Sólidos Totales	Kg/m ³	Standard methods (APHA, 2005)
Sólidos Volátiles	Kg/m ³	Standard methods (APHA, 2005)

Biogás	L/d	Desplazamiento de agua
--------	-----	------------------------

Posteriormente con los sustratos ya acondicionados, preparar la mezcla residual- FORSU, a esta mezcla se le determina: ST y SV con la finalidad de establecer las condiciones del sustrato de alimentación.

Estabilización

Después de la inoculación el sistema entra a un periodo de aclimatación, para que los microorganismos se adapten al sistema. La evaluación del sistema se realiza mediante el análisis y monitoreo de los parámetros de la Tabla 3. Además, se determina la riqueza del hidrógeno y del metano, mediante un cromatógrafo de líquidos con detector doble masa.

En la Tabla.4 se muestran las condiciones de operación de ambas fases, basado en criterios de Montes (2008); Mandujano (2001) y Lagunes-Paredes, et al. (2016).

Tabla 4. Valores de los parámetros de control del sistema en fases.

Parámetro	Valor	
	Fase Acidogénica	Fase Metanogénica
Temperatura (°C)	30 ± 2	31 ± 2
pH	5,5- 6,5	3,75- 4,3

Tamaño de partícula (mm)	0,3- 5	
Concentración de ST (kg ST/m ³)	22- 28	
TRH (d)	2-3	7- 15
Volumen de trabajo (L)	10	10

Se propuso un diseño experimental tipo factorial 2³ con dos replicas, con los niveles de variables que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de los niveles de las variables de estudio del diseño factorial.

Variable	Abreviatura	Nivel Inferior (-)	Nivel superior (+)
pH inicial de la mezcla	X1	5,5	6,5
Concentración inicial de sustrato (kg ST/m ³)	X2	22	28
Tiempo de retención hidráulico total	X3	10	15

Fuente: Elaboración propia a partir de (Montoya-Pérez y Duran-Herrera, 2017; Mandujano, 2001).

Variables respuesta: remoción de ST y remoción de STV, rendimiento en la producción de hidrógeno y en la producción de metano.

En la tabla 6 se muestra la matriz del diseño.

Tabla 6. Matriz de diseño.

Experimento	Condiciones X1		Condiciones X2		Condiciones X3	
	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor
1	-	5,5	-	22	-	10
2	+	6,5	-	22	-	10
3	-	5,5	+	28	-	10
4	+	6,5	+	28	-	10
5	-	5,5	-	22	+	15
6	+	6,5	-	22	+	15
7	-	5,5	+	28	+	15
8	+	6,5	+	28	+	15

Conclusiones

Del análisis realizado, se confirma que una de las posibles alternativas de respuesta para disminuir el problema en la fracción orgánica de los RSU es la investigación y el hallazgo de un procedimiento energético, a través de su tratamiento por biogás, empero para que se obtenga mayor confiabilidad de los resultados, ello debe ser verificado experimentalmente. En el proceso de producción del biogás para el caso de Cuba, se pudo comprobar que la composición de la fracción orgánica influye sobre las variables y los parámetros del proceso, resultando algunos modelos puramente experimentales.

A los fines de obtener resultados experimentales se podría realizar un ACV con el objetivo de identificar las etapas del proceso donde se producen

las emisiones con mayor relevancia. Para el estudio de ACV solo se consideraría el proceso de digestión anaeróbica de la FORSU, el reciclaje de los RSI y la disposición en relleno sanitario.

Referencias bibliográficas

- Agrela, F., Cabrera, M., Martín M., Zamorano, M., Alshaaer, M. (2019). Biomass fly ash and biomass bottom ash. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6>.
- Angeriz, R. (2018). Producción de biohidrógeno por co-digestión anaerobia acidogénica de residuos sólidos urbanos, residuos alimentarios de cocina y lodos de depuradora. Trabajo de tesis. Ciencias tecnológicas, Ingeniería y tecnología del medio ambiente. Universidad de Cádiz. España. 2018.
- APHA, (2005) "Standard methods for the examination of water and wastewater". American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 21st edition, ISBN-13:978-0875530475. Public Health Association, Washington, USA.
- Arena U., Mastellone M.L. y Perugini F. (2003). Life Cycle Assessment of a plastic packaging recycling system. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8 (2), 92-98. DOI: 10.1007/BF02978432.
- Barradas, A. (2009). Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales. Estado del Arte. Veracruz, México: Instituto Tecnológico de Minatitlán. Extracto de la tesis de Doctor en Ciencias en Ingeniería Ambiental del autor, por la Universidad Politécnica de Madrid, pp. 4-9.
- Beily, M. E.; Bres, P.; Rizzo, P.; Giampaoli, O.; y Crespo, D. (2010) Monitoreo de un reactor anaeróbico semi-continuo para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Parte II. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 14*, 2010. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- Bentsen, N.S. (2019). Biomass for Biorefineries: Availability and Costs. *Biorefinery*, pp 37-47. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-10961-5_2.
- BIOPLAT y SusChem-España (Plataformas Tecnológicas Españolas de Biomasa para la Bioeconomía y de Química Sostenible). (2017). Manual sobre las Biorrefinerías en España. http://www.bioplat.org/setup/upload/modules/docs/content_UR_4020.pdf.
- Bovea, M., Cruz, S., Mercante, I., Coutinho, C., Eljaiek, M., Ibáñez,

- V. (2016). Aplicación de la metodología de ACV para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de gestión de residuos en Iberoamérica., *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 32, No. Especial Residuos Sólidos, 2016, pp. 23-46. DOI: 10.20937/RICA.2016.32.05.03.
- Castellanos, S. (2017). Análisis de Ciclo de Vida para los biorresiduos sólidos urbanos generados en Bogotá D.C, Colombia. Trabajo final para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C, Colombia 2017.
- Chandra, R., Iqbal, H.M., Vishal, G., Lee, H.S., Nagra, S. (2019). Algal Biorefinery: A Sustainable Approach to Valorize Algal-based Biomass towards Multiple Product Recovery. *Bioresource technology*, Vol. 278, pp 346-359.
- Cherubini, F. & Strømman, A.H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102, 437-451.
- De Jong, E. & Jungmeier, G. (2015). Chapter 1 - Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries. In: Pandey, A., Höfer, R., Taherzadeh, M., Nampoothiri, K. M. & Larroche, C. (eds.) *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*. Amsterdam: Elsevier.
- Da graca, W. (2009) Análisis y simulación del proceso de digestión anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Universidad Central "Martha Abreu de las Villas. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Química.
- EEscamilla-Alvarado, C.; Ríos-Leal, E.; Ponce-Noyola, M.T.; Poggi-Varaldo, H.M. (2012a). Gas biofuels from solid substrate hydrogenogenic-methanogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Process Biochemistry* 47: 1572–1587.
- Escalona, E. (2014). Daños a la salud por mala disposición de residuales sólidos y líquidos en Dili, Timor Leste. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, vol. 52, núm. 2, mayo-agosto, 2014, pp. 270-277.
- Escamilla-Alvarado, C.; Poggi-Varaldo, H.; Ponce-Noyola, M.T. (2011). Producción de hidrógeno y metano como biocombustibles bajo el esquema de biorrefinería. *Rev. Ide@s CONACYTEG*, Vol. 6, No. 71, Pág. 526-539.
- Hoorweg, D. y Bhada-Tata, P. (2012). What a waste. A Global Review of Solid Waste Management. Washington: World Bank. Urban Development Series, March 2012, No. 15. <http://www.prepare-net.com/sites/default/files/wha>

- t_a_waste2012_final.pdf.
- Ivanov, V., Stabnikov, V., Ahmed, Z., Dobrenko, S. & Saliuk, A. (2015). Production and applications of crude polyhydroxyalkanoate-containing bioplastic from the organic fraction of municipal solid waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 725-738.
- Jaramillo, G. y Zapata, L. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Medellín: Universidad de Antioquia. Recuperado el 9 de marzo del 2014, de <http://tesis.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>.
- Lagunes-Paredes, Y.; Montes-Carmona, M.E.; Vásquez-Márquez, A. y Cárdenas-Guevara, G.E. (2016). Evaluación de la generación de metano y la estabilidad del proceso de codigestión de lodos residuales y fracción orgánica provenientes de un centro comercial. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*. Septiembre 2016 Vol.2 No.5 26-35.
- Laurent A., Bakas I., Clavreul J., Bernstad A., Niero M., Gentil E., Hauschild M.Z. y Christensen T.H. (2014) Review of LCA studies of solid waste management systems— Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Manage.* 34 (3):573-88 DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.07.003.
- Lindorfer, J.; Lettner, M.; Hesser, F.; Fazeni, K.; Rosenfeld, D.; Annevelink, B.; Mandl, M. (2019). Technical, Economic and Environmental Assessment of Biorefinery Concepts. Developing a practical approach for characterization. IEA (International Energy Agency). Bioenergy: Task 42:2019:01. Copyright © 2019 IEA Bioenergy. All rights Reserved. ISBN: 978-1-910154-64-9.
- Mandujano, P. (2001). Digestión anaerobia de sólidos en alta concentración. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- McDougall F., White P., Franke M., Hindle P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*, (Second edition) Copyright © 2001 by Blackwell Science Publishing Ltd.
- Montes, M.E. (2008). Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente E.T.S. I. de Caminos, Canales y Puertos
- Montoya-Pérez, L; Durán-Herrera, E. (2017). Producción de hidrógeno a partir de la fermentación de

- residuos agroindustriales de la piña. Tecnología en Marcha. Vol. 30-3. Julio-Setiembre 2017. Pág 106-118.
- Romero-Paredes, A. (2013). Gestión integral de residuos sólidos urbanos de la CEDA. Programa para el Desarrollo Bajo en Emisiones de México (MLED). CONTRATO: AID-523-C-11-00001. Tetra Tech ES Inc. Julio 7, 2013. www.mledprogram.org
- Saraiva, A. B. (2017). System boundary setting in life cycle assessment of biorefineries: a review. International Journal of Environmental Science and Technology, 14, 435-452.
- Soto, J.L. (2014). Alternativas de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos. Trabajo de Grado en Ingeniería de Obras Públicas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universidad de Valencia. 2014
- Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. (2004). Gestión integral de residuos sólidos. New York: McGraw-Hill.
- Tenorio, M. (2008). Diseño de plan de manejo integral de residuos sólidos para plegacol S.A., Pasantía para de Administrador del Medio Ambiente y de los recursos naturales., Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, 2008.
- Zhang, Y.H.P. (2008). Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 35, 367-375.