

**ANÁLISIS DEL PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA EL
TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE MANTA,
ECUADOR.**

**ANALYSIS OF THE ANAEROBIC DIGESTION PROCESS FOR THE
TREATMENT OF URBAN SOLID WASTE IN MANTA, ECUADOR.**

Muñoz-Menéndez María Belén

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Manta – Ecuador.

Santos-Herrero Ronaldo Francisco

Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara – Cuba.

Contreras-Moya Ana Margarita

Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara – Cuba.

Regla-Domínguez Elena Rosa

Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara – Cuba.

Cárdenas-Ferrer Teresa

Universidad Central Martha Abreu de las Villas. Santa Clara – Cuba.

Correo: beleta_1983@hotmail.com

RESUMEN

Para eliminar o disminuir los daños que los residuos sólidos urbanos provocan, se destaca el tratamiento mediante digestión anaeróbica como uno de los procesos más atractivos en la actualidad. Los problemas de control y estabilización de los sistemas convencionales de digestión anaerobia han llevado a nuevas soluciones tecnológicas, entre estas la separación de fases, que permite la optimización de la acidogénesis y metanogénesis por separado. La primera fase ha sido poco estudiada y en esta se obtienen, por fermentación, hidrógeno y ácidos grasos volátiles, cuyas aplicaciones hacen que el proceso de fermentación acidogénica tome importancia; presentándose como una plataforma que consolida el concepto de biorefinería en lugar de una etapa de tratamiento convencional. Este trabajo tiene el objetivo de realizar un estudio para la evaluación del proceso de digestión anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de Manta, en

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 20 de mayo de 2020

Fecha de aceptación: 08 de julio de 2020

Fecha de publicación: 09 de julio de 2020

un proceso en fases separadas como parte de la alternativa de solución de los residuos sólidos urbanos. Mediante la metodología propuesta se realiza la simulación del proceso a nivel de laboratorio, cuyos resultados constituyen elementos importantes para la implementación del proceso. Se obtienen remociones promedio de Sólidos Totales de 58,24 % y 64,83 % de Sólidos Totales Volátiles y se presentan los rendimientos de la producción de hidrógeno y metano. La evaluación ambiental mediante análisis de ciclo de vida muestra que los impactos ambientales más significativos del mismo están en las categorías de agotamiento del ozono estratosférico, la eutrofización del agua fresca y escasez de recursos minerales.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos, digestión anaeróbica, fases separadas, análisis de ciclo de vida.

ABSTRACT

To eliminate or reduce the damage caused by solid urban waste, treatment by anaerobic digestion stands out as one of the most attractive processes today. The control and stabilization problems of conventional anaerobic digestion systems have led to new technological solutions, among them phase separation, which allows the optimization of acidogenesis and methanogenesis separately. The first phase has been little studied and in this phase, hydrogen and volatile fatty acids are obtained by fermentation, whose applications make the acidogenic fermentation process become important; presenting itself as a platform that consolidates the biorefinery concept instead of a conventional treatment stage. This work aims to carry out a study for the evaluation of the anaerobic digestion process of the organic fraction of urban solid waste from Manta, in a process in separate phases as part of the alternative solution for urban solid waste. Through the proposed methodology, the simulation of the process is carried out at the laboratory level, the results of which constitute important elements for the implementation of the process. Average removals of Total Solids of 58.24% and 64.83% of Total Volatile Solids are obtained and the yields of hydrogen and methane production are presented. The environmental assessment through life cycle analysis shows that the most significant environmental impacts are in the categories of stratospheric ozone depletion, eutrophication of fresh water and scarcity of mineral resources.

Keywords: Urban solid waste, anaerobic digestion, separate phases, life cycle analysis.

INTRODUCCIÓN

Entre los problemas que se presentan actualmente a nivel mundial, se destacan los relacionados con la generación y disposición final de los residuos sólidos, ya que el crecimiento demográfico e industrial hace que diariamente se arrojen millones de toneladas a las superficies terrestre y acuática, sin ningún tipo de tratamiento ni manejo previo, produciéndose una grave contaminación que implica consecuencias irreversibles.

Según investigadores del Banco Mundial, (Hoornweg y Bhada-Tata 2012), para el año 2025 se espera que la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) tienda a duplicarse. Entre las causas de este incremento, además del alto crecimiento poblacional, se mencionan los hábitos de consumo en países industrializados, así como los cambios en las costumbres de consumidores que habitan los países en vías de desarrollo.

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.

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. (2012^a) 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, 2013^a) 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 (Arena et al. 2003, Mc Dougall et al. 2001, Laurent et al. 2014).

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 estos tipos de procesos, según las variables que influyen en este, para a partir de estos modelar y simular el proceso.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio para la evaluación del proceso de digestión anaeróbica de los residuos sólidos urbanos de Manta con énfasis en los productos con alto valor agregado que se pueden obtener en el proceso en fases separadas.

METODOLOGÍA

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.

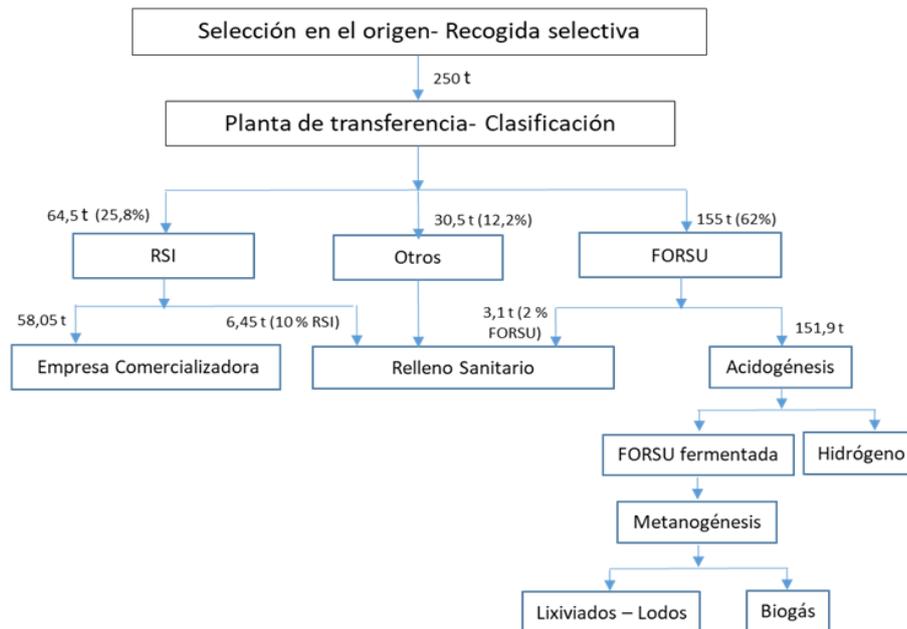


Figura 1. Diagrama de la Alternativa.

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).

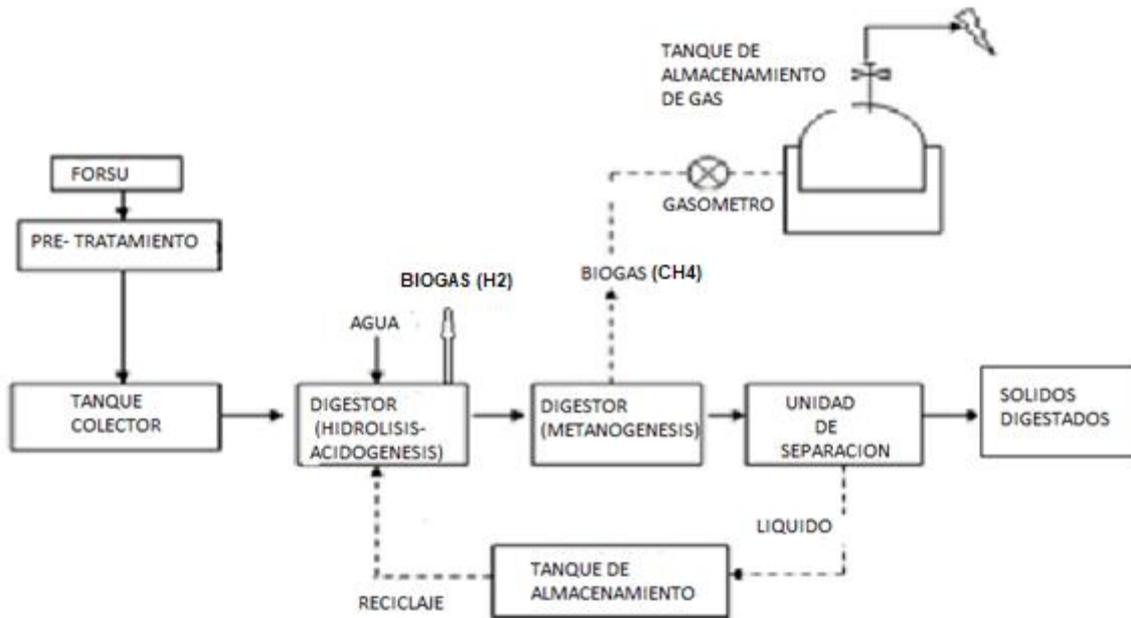


Figura 2. Proceso de digestión anaeróbica en fases separadas

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.

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.

Para este experimento se prepara en el laboratorio una mezcla de FORSU (que represente 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 caracteriza.

La reducción de tamaño se realiza 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 procede a hidratar con la cantidad de residual establecida, ya que se estudia la codigestión con agua de una planta de tratamiento anaerobia de aguas residuales o una laguna anaeróbica.

La caracterización físico química de los sustratos: agua residual, FORSU y mezcla de agua-FORSU se realiza 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	Kg/m ³	
Volátiles (STV)		

Tabla 2. Parámetros utilizados para la caracterización de la FORSU

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

Se implementa el sistema en dos fases en rango mesofílico, cuyo valor óptimo de temperatura es de 30°C a 33°C y se evalúa 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 digester 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 por cromatografía de gases, mediante un cromatógrafo GC-2010 SHIMADZU.

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 propone un diseño experimental tipo factorial 2^3 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

Con los resultados experimentales se realiza 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 considera el proceso de digestión anaeróbica de la FORSU, el reciclaje de los RSI y la disposición en relleno sanitario.

Como unidad funcional se toma el tratamiento de la FORSU con características adecuadas para la digestión anaeróbica, producida diariamente en Manta, resultando un flujo de referencia de 151,9 t de FORSU.

Los datos del inventario de ACV fueron obtenidos de los resultados experimentales y resultados de la literatura. Las entradas y las salidas fueron ajustadas a la unidad funcional. No se llevó a cabo la asignación de cargas ambientales, sino que se extendieron los límites del sistema para considerar los productos evitados por el aprovechamiento de los subproductos.

Para el análisis se utilizó el Software SimaPro de la empresa PRé-Consultants, el método de ReCiPe 2016 v1.1, versión Hierarchist (H) y la base de datos Ecoinvent v 3.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la Tabla 7 se muestran los resultados experimentales de la fase acidogénica, donde aparecen los valores Sólidos Totales iniciales (STi) y en el efluente (STe), los Sólidos Totales Volátiles iniciales (STVi) y en el efluente (STVe), expresados en kg/m³ y los respectivos porcentos de remoción, de acuerdo a los valores de pH y carga orgánica de ST (CO_{ST}) y de STV (CO_{SV}) establecidos, expresados en kg ST/m³d y kg STV/m³d, según la matriz de diseño que aparece en la tabla 6 para un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 3 días.

Tabla 7. Resultados experimentales para la fase acidogénica.

No	pHi	TRH	CO _{ST}	pHe	CO _{SV}	STi	STe	%Rem	STVi	STVe	%Rem
1	5,5	3	22	3,31	19,56	68,70	60,70	11,64	61,14	54,73	10,48
2	6,5	3	22	3,86	19,58	68,70	62,86	8,50	61,14	55,02	10,01
3	5,5	3	28	3,34	25,98	87,50	76,13	12,99	81,19	69,41	14,51
4	6,5	3	28	4,63	25,76	87,50	77,00	12,00	80,50	70,19	12,81
5	5,5	3	22	3,40	19,68	68,70	60,52	11,91	61,53	53,96	12,30
6	6,5	3	22	4,26	20,00	68,70	61,14	11,00	62,57	55,06	12,00
7	5,5	3	28	3,57	25,48	87,50	74,37	15,01	79,63	66,09	17,00
8	6,5	3	28	3,56	25,19	87,50	76,70	12,34	78,75	68,90	12,51
			Prom	3,74	22,65	78,10	68,68	11,92	70,81	61,67	12,70
			Desv St	0,45	2,96	9,40	7,44	1,71	9,24	7,07	2,08
			Max	4,63	25,98	87,50	77,00	15,01	81,19	70,19	17,00
			Min	3,31	19,56	68,70	60,52	8,50	61,14	53,96	10,01

Se observa que en la fase acidogénica se obtienen valores promedio de remoción de Sólidos Totales (ST) de 11, 92 %, de Sólidos Totales Volátiles de 12, 70 % y el pH promedio que se alcanza es de 3,74; valor que se considera adecuado para la fase acidogénica. El mayor % de remoción de ST y STV se obtiene para un valor de pH de entrada de 5,5; una carga orgánica de 28 kg ST/m³d.

De forma similar, en la Tabla 8 se muestran los resultados experimentales de la fase metanogénica.

Tabla 8. Resultados experimentales para la fase metanogénica

No	TRH	STi	STe	%Rem	STVi	STVe	%Rem	pHi	pHe
1	7	60,7	33,60	44,65	54,73	27,40	49,94	3,31	7,40
2	7	62,86	37,00	41,14	55,02	29,10	47,11	3,86	7,79
3	7	76,13	38,40	49,56	69,41	30,40	56,20	3,34	7,68
4	7	77,00	40,80	47,01	70,19	32,80	53,27	4,63	7,11
5	12	60,52	25,40	58,03	53,96	18,20	66,27	3,40	7,04
6	12	61,14	29,30	52,08	55,06	22,80	58,59	4,26	7,34
7	12	74,37	25,10	66,25	66,09	16,90	74,43	3,57	7,01
8	12	76,70	28,40	62,97	68,90	18,50	73,15	3,56	6,91
	Prom	68,68	32,25	52,71	61,67	24,51	59,87	3,74	7,29
	Desv St	7,44	5,67	8,36	7,07	5,81	9,68	0,45	0,30
	Max	77,00	40,80	66,25	70,19	32,80	74,43	4,63	7,79
	Min	60,52	25,10	41,14	53,96	16,90	47,11	3,31	6,91

En la fase metanogénica, el valor promedio de remoción de ST es de 52, 71 % y de STV es de 59,87 %, con un valor promedio de pH de 7, 29. El mayor % de remoción de ST y STV se obtiene para el valor de pH de entrada de 5,5; carga orgánica de 28 kg ST/m³d y TRH de 12 días.

En la tabla 9 se presentan los resultados de porcentos de remoción global de ST y STV y los rendimientos de la producción de hidrógeno y metano.

Tabla 9. Resultados globales de remoción de ST y STV. Rendimientos de producción de hidrógeno y metano.

No	TRH	% R Global ST	% R Global SV	LH ₂ /kg STV alim	LCH ₄ /kg STV alim
1	10	51,09	55,18	32,71	327,12
2	10	46,14	52,40	24,53	310,76
3	10	56,11	62,56	34,49	394,14
4	10	53,37	59,25	27,33	360,25
5	15	63,03	70,42	40,63	503,82
6	15	57,35	63,56	36,76	479,46

7	15	71,31	78,78	45,21	527,44
8	15	67,54	76,51	41,90	507,94
	Prom	58,24	64,83	35,45	426,37
	Desv St	7,96	9,00	6,70	82,40
	Max	71,31	78,78	45,21	527,44
	Min	46,14	52,40	24,53	310,76

De forma general, se obtiene una remoción promedio de ST de 58,24 % con un valor máximo de 71,31 % y una remoción promedio de 64,83 % de STV con valor máximo de 78,78 %. El rendimiento de la producción de hidrógeno alcanza un valor promedio de 35,45 LH₂/kg STV alim, mientras el rendimiento de la producción de metano muestra un valor promedio de 426,37 LCH₄/kg STV alim.

Por otra parte, se obtienen los resultados del ACV. En la figura 3 se muestra el perfil ambiental de la alternativa propuesta.

Se observa que los principales impactos positivos están dados por el relleno sanitario, por sus efectos en la eutrofización del agua de mar, ecotoxicidad del agua fresca y de mar, así como en la toxicidad humana cancerígena y no cancerígena y calentamiento global, producto de las emisiones que se generan, ya que es un relleno sanitario donde no se recolectan el biogás y lixiviados.

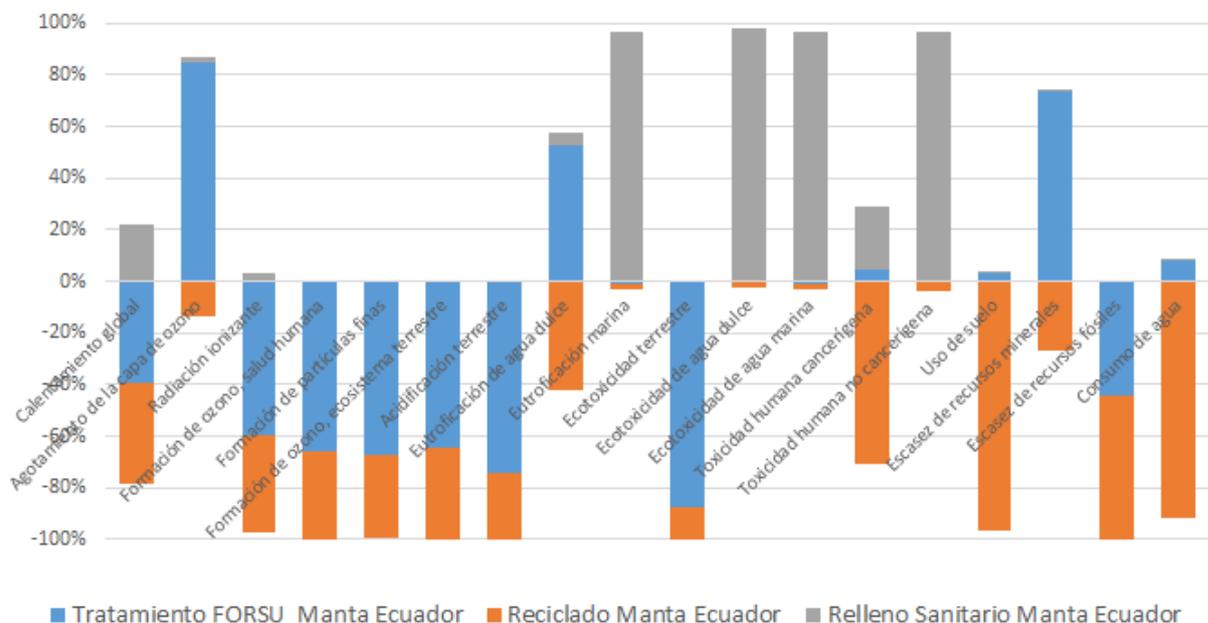


Figura 3. Perfil ambiental. Alternativa de tratamiento de Residuos Sólidos. Manta Ecuador.

También se destacan los impactos positivos del tratamiento de la FORSU, por sus efectos en el agotamiento del ozono estratosférico, la eutrofización del agua fresca, escasez de recursos minerales y en menor medida en el consumo de agua, uso del suelo y toxicidad humana cancerígena.

Resultan de gran valor los resultados negativos para la mayoría de las categorías de impacto como resultado del reciclaje de los RSI y la valorización de los productos de la digestión anaeróbica, lo que hace que los mismos sean procesos muy atractivos para la gestión de la FORSU de Manta.

REFERENCIAS

- 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 bio-hidrógeno 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, “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, 2005.
- 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.
- 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_URI_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.
- Escamilla-Alvarado, C.; Ríos-Leal, E.; Ponce-Noyola, M.T.; Poggi-Varaldo, H.M. (2012^a). 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.
- Hoornweg, 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/what_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.