

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**“PRODUCCIÓN DE BIOGAS DE UN BIODIGESTOR MODELO ALIMENTADO CON RESIDUOS ALIMENTARIOS Y ESTIERCOL DE BOVINO LECHERO”**

**POR:**

**ANTONIO DE JESUS ZEA RUIZ**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

**Torreón, Coahuila, México**

**DICIEMBRE DE 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**"PRODUCCIÓN DE BIOGAS DE UN BIODIGESTOR MODELO ALIMENTADO CON  
RESIDUOS ALIMENTARIOS Y ESTIERCOL DE BOVINO LECHERO"**

**TESIS QUE PRESENTA:**

**ANTONIO DE JESÚS ZEA RUÍZ**

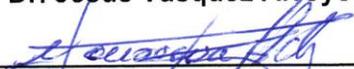
**QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR:**

**PRESIDENTE:**



**Dr. Jesús Vásquez Arroyo**

**VOCAL:**



**M.C. Genoveva Hernández Zamudio**

**VOCAL:**



**Dr. Anselmo González Torres**

**VOCAL SUPLENTE:**



**Dr. Alfredo Ogaz**



---

**M.C. Víctor Martínez Cueto  
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**DICIEMBRE DE 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**"PRODUCCIÓN DE BIOGAS DE UN BIODIGESTOR MODELO ALIMENTADO CON  
RESIDUOS ALIMENTARIOS Y ESTIERCOL DE BOVINO LECHERO**

**TESIS QUE PRESENTA:**

**ANTONIO DE JESUS ZEA RUIZ**

**ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADA  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

**Aprobada por:**

**ASESOR PRINCIPAL:**

**Dr. Jesús Vásquez Arroyo**

**ASESOR:**

**M.C. Genoveva Hernández Zamudio**

**ASESOR:**

**Dr. Anselmo González Torres**

**ASESOR:**

**Dr. Alfredo Ogaz**

**M.C. Víctor Martínez Cueto**

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**DICIEMBRE DE 2016**



## AGRADECIMIENTOS

**A mi familia (padres, abuelos, hermanos, tíos y tías)** por apoyarme incondicionalmente, por motivarme a salir adelante y ser mejor persona cada día.

**A mi Alma Mater**, por aceptarme ser parte de ella, por darme todo sin pedir nada, por ser la mejor escuela y darme una formación como profesionista.

**Al Dr. Jesús Vásquez arroyo**, por permitirme ser parte de su proyecto para realizar mi tesis de titulación, por enseñarme muchas cosas entre ellas ser responsable.

**A todos los maestros del Departamento de Agroecología.** A todos ellos por brindarme su conocimiento, su amistad y consejos a lo largo de mi formación profesional.

**Al laboratorio de suelos**, por ayudarme y prestarme el material de laboratorio necesario para complementar las clases, realizar prácticas y para realizar las determinaciones para completar mi tesis

**A mis compañeros**, los que me apoyaron y brindaron ayuda durante toda la formación profesional, también los que me brindaron apoyo durante todo el desarrollo de mi investigación de tesis.

## DEDICATORIA

**A mis padres**, Antonio Octavio Zea Penagos y María Guadalupe Ruiz Ramírez por haberme enseñado y educado de la mejor manera y por haberme apoyado hasta el final.

**A mis hermanos**, Nancy Guadalupe Zea Ruiz, Miranda Guadalupe Grajales Ruiz Y Cleiver de Jesús Grajales a quienes quiero y aprecio mucho.

**A el profesor**, Ernendi Grajales Morales quien me ha apoyado y animado a salir adelante.

**A mis abuelos**, Eron Ruiz Velazco y Nelly Ramírez Saldaña por ser mis segundos padres y estar ahí cuando los necesitaba.

**A mis tíos**, Herón Ruiz Ramírez, Gloria Ruiz Ramírez, Bety Ruiz Ramírez, Nelly Ruiz Ramírez, Manuel De Jesús López Hernández, Gilberto Gil Martínez, gracias a todos por sus consejos, toda su ayuda y su apoyo, mil gracias a todos los que estuvieron y siguen estando

**A mis compañeros**, de todo el departamento de agroecología en especial a los de mi semestre.

## INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	i
DEDICATORIA .....	ii
INDICE DE CONTENIDO .....	iii
ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN .....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.OBJETIVO.....	2
1.2 HIPOTESIS.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
<b>2.1. El concepto de taxonomía.....</b>	<b>3</b>
2.2. Digestión anaerobia .....	5
2.3. Procesos de fermentación del biogás.....	6
2.3.1. Digestores anaeróbicos.....	6
2.3.2. Procesos biológicos.....	10
2.3.3. Parámetros ambientales y de control.....	10
2.4. Tipos de digestores anaerobios .....	12
a) Continuos .....	12
b) Semi continuos: .....	13
c) Discontinuos o régimen estacionario.....	13
2.4.1. Diseño de alta tecnología.....	14
2.4.2. Diseños rústicos. ....	14
2.5. Problemas de la digestión anaerobia.....	14
2.5.1. Propiedades fisicoquímicas.....	15
2.5.2. Pretratamiento.....	15

2.5.3. Sobreproducción de ácidos grasos volátiles .....	16
2.6. Potencial de producción de metano a partir de residuos sólidos orgánicos.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	18
3.1 Lugar, área de trabajo y periodo de estudio.....	18
3.2. Ubicación y colocación de los biorreactores.....	18
3.3. Tipo de estudio. ....	19
3.4. Variables de estudio.....	22
3.3.1 pH.....	22
3.3.2 Conductividad Eléctrica (CE) .....	23
3.5.3 Sólidos totales (ST).....	23
3.5.4 Sólidos totales volátiles (STV) .....	24
4. RESULTADOS .....	26
4.1. Comportamiento del pH en el proceso de digestión anaerobia.....	26
4.2 C.E .....	28
4.3 Sólidos totales volátiles.....	31
4.4 Composición de la materia prima de residuos de alimentos.....	37
4.5. Producción de biogás durante noviembre-diciembre 2015. ....	38
5. DISCUSIÓN .....	41
6. CONCLUSIONES.....	44

## ÍNDICE DE CUADROS.

Cuadro 1. Taxonomía de metanógenos. ....	5
Cuadro 2. Algunas de las características del orden de los metanógenos.....	7
Cuadro 3. Análisis bromatológico de residuos de alimentos semanales que se generan en los comedores industriales sujetos de estudio.....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Árbol filogenético Universal basado en la comparación de las secuencias de la pequeña subunidad del rRNA. Los Phyla o divisiones de Eucaria y Bacteria en la cual existen patógenos humanos conocidos se muestran en rojo. ....	4
Figura 2. Ubicación de tres digestores con capacidad de 10 m <sup>3</sup> de geomembrana, entrando por Periférico Raúl López Sánchez Km 2.0 y siguiendo la ruta indicada en amarillo. ....	18
Figura 3. Ubicación e instalación de digestores, y sistema de alimentación en campo. ....	19
Figura 4. Tanque rotoplax (500 L) para el mezclado y alimentación de los digestores. ....	19
Figura 5. Colocación del medidor de biogás (flujómetro) y adicionar una válvula check de 2 pulgadas para evitar el regreso del gas del sistema de colecta. ....	20
Figura 6. Sistema de recepción de residuos alimentarios para la alimentación de digestores. ...	20
Figura 7. Sistema de colecta de estiércol de ganado bovino de la UAAAN-URL para el mezclado con los residuos alimentarios. ....	21
Figura 8. Vista completa del sistema instalado y funcionando para la producción de biogás. ...	21
Figura 9. Reactor presentando una pequeña fuga del líquido. Fue necesario vaciar el reactor y reparar el daño. ....	22
Figura 10. Evolución del pH en reactor de 8,000 L durante 2016. ....	26
Figura 11. Repetitividad de pH. Primera semana. ....	27
Figura 12. Reproducibilidad del pH en los dos reactores ....	28
Figura 13. Evolución del CE en reactor de 8,000 L durante 2016. ....	29
Figura 14. Repetibilidad en la toma de datos de C.E. ....	30
Figura 15. Reproducibilidad de la C.E. en los dos reactores. ....	31
Figura 16. Evolución de los sólidos Totales Volátiles. ....	32
Figura 17. Reproducibilidad de sólidos solubles totales. ....	33
Figura 18. Comportamiento de los sólidos totales volátiles a los 55 días ....	34
Figura 19. Comportamiento de la degradación de sólidos Totales volátiles. ....	35
Figura 20. Repetibilidad de la tasa de degradación a los cinco días. ....	36
Figura 21. Repetibilidad a los 60 días. ....	37
Figura 22. Resultados de producción de biogás del 2015. ....	39

Figura 23. Comportamiento de la producción de biogás del experimento del reactor durante el mes de marzo del 2016.....	40
Figura 24. Comportamiento teórico de la producción de metano con base a los estimados (420 y 440 L/Kg SV), en la literatura internacional. ....	41

## RESUMEN

El incremento mundial de la necesidad energética y el cambio climático resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero, genera conciencia para producir energía de una manera amigable, costeable y sustentable para preservar los recursos energéticos del ambiente. El presente trabajo es un estudio descriptivo longitudinal 2015-2016. El objetivo del trabajo fue evaluar la eficiencia de la digestión anaerobia de residuos alimentarios y estiércol de ganado bovino y determinar las condiciones óptimas para maximizar la producción de biogás. Para el estudio se utilizó como modelo, tres geobolsas de 3.45 x 6 m con capacidad de 10,000 L cada una, fabricadas con Geomembrana HDPE Cal. 40 N/N lisa calidad exportación. Con entrada y dos salidas para líquidos de dos pulgadas con tapón y codos. Con un soporte de presión de 40 lb/in<sup>2</sup>. Se utilizó como sustrato residuos de comida de comedores industriales y estiércol de ganado bovino de la UAAAN Unidad Regional Laguna, con una carga de sólidos del 10 % y utilizando solamente el 80% del volumen de capacidad del reactor. Los parámetros evaluados fueron: pH, temperatura (°C), conductividad eléctrica (mScm<sup>-1</sup>), sólidos solubles totales y volátiles (mgL<sup>-1</sup>), producción de biogás (L) y rendimiento (Ld<sup>-1</sup>, Lh<sup>-1</sup>). La producción de biogás durante los meses de noviembre diciembre del 2015, es de manera constante el biogás sin influencia significativa de las horas de muestreo. El comportamiento de los resultados, nos permite elaborar una ecuación de regresión lineal con la cual podemos predecir la producción y el coeficiente de correlación ( $r^2$ ), fue de 0.984. El comportamiento del pH fue bajo, con una producción total de biogás (1828.8 L de biogás). Los sólidos volátiles se mantuvieron en un promedio de 3.0500 mg/ml. Con los parámetros obtenidos aunque no fueron los óptimos tuvimos buen resultado en la producción de biogás.

**Palabras Claves:** Biodigestores, metanógenos, sólidos totales volátiles, biogás

## ABSTRACT

The global increase in energy needs and climate change resulting from greenhouse gas emissions generates awareness to produce energy in a friendly, affordable and sustainable way to preserve the energy resources of the environment. The present work is a longitudinal descriptive study 2015-2016. The objective of this work was to evaluate the efficiency of the anaerobic digestion of food residues and cattle manure and to determine the optimal conditions to maximize biogas production. For the study three geobolsas of 3.45 x 6 m with capacity of 10,000 L each were used as model, made with HDPE Geomembrane Cal. 40 N / N smooth export quality. With inlet and two outlets for two-inch liquids with cap and elbows. With a pressure support of 40 lbIn<sup>2</sup>. Residual food from industrial canteens and cattle manure from the UAAAN Laguna Regional Unit, with a solids loading of 10% and using only 80% of the reactor capacity volume, was used as substrate. The parameters evaluated were: pH, temperature (° C), electrical conductivity (mScm<sup>-1</sup>), total and volatile solids solubles (mgL<sup>-1</sup>), biogas production (L) and yield (Ld<sup>-1</sup>, Lh<sup>-1</sup>). The production of biogas during the months of November December 2015 is a constant biogas without significant influence of the sampling times. The behavior of the results, allows us to elaborate a linear regression equation with which we can predict the production and the correlation coefficient (r<sup>2</sup>), was 0.984. The pH behavior was low, with a total biogas production (1828.8 L of biogas). Volatile solids were maintained at an average of 3.0500 mg / ml. With the parameters obtained although they were not the optimum we had good results in the production of biogas.

**Key words:** Biodigesters, methanogens, total volatile solids, biogas

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe evidencia histórica de que se utilizaba biogás para calentar el agua de baño desde principios del siglo X. Pero solo fue hasta 1776 en el Lago Maggiore que se le nombró a Alessandro Volta el descubridor del metano (Oechsner *et al.*, 2015).

El incremento mundial de la necesidad energética y el cambio climático resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero, genera conciencia para producir energía de una manera amigable, costeable y sustentable para preservar los recursos energéticos del ambiente (Oechsner *et al.*, 2015).

La mejor opción para las familias que tienen la materia prima orgánica son las plantas de biogás, para producir ellos mismos su gas para cocinar y un biofertilizante orgánico altamente enriquecido. Para proteger sus hogares les provee de soluciones para la contaminación del aire generada por la quema de madera, etc. y dejar las recargas de gas LP generando un ahorro muy importante. (Pareek and Nagarsheth, 2016a).

Los metanógenos son Archae anaerobios estrictos, productores de metano. Todos ellos pertenecen al Phylum Euryarchaeota. A pesar de que los metanogenos presentan una serie de características fisiológicas, son filogenéticamente muy diversos. La taxonomía actual clasifica a los metanógenos en cinco ordenes bien establecidos: Methanobacteriales, Methanococcales, Methanomicrobiales, Methanosarcinales y Methanopyrales (Liu, 2010).

Las tecnologías para producir biogás, ayudan a manejar los riesgos ambientales, así como también la dependencia de recursos externos. Minimiza la deforestación reduciendo el uso de los recursos maderables con fines energéticos en los hogares (Amigun and Blottnitz, 2007).

El comportamiento de un proceso de digestión anaerobia (DA) en mucho depende del tipo y composición del material a digerir y según (Ganesh *et al.*, 2013) y (Zhou *et al.*, 2015), sería posible tratar dos o más sustratos orgánicos al mismo tiempo, generando

un incremento sustancial en la producción de biometano en lugar de la digestión de un solo sustrato. Los resultados de la co-digestión en un sistema amortiguado bajo y cuando la fracción del desecho es rico en almidón se incrementan, resulta un proceso más sensible con la sobrecarga del proceso que ocurre a una tasa de carga orgánica baja (TCO) (Murto *et al.*, 2004).

Diversos estudios manifiestan la producción de biogás siendo la carga orgánica máxima de 7-12%, donde (Deepanraj *et al.*, 2015a), encontraron los máximos rendimientos con un 7.5%, generando hasta 4.5 L durante 20 días de digestión.

Casi todos los municipios de México tienen las condiciones para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y su transformación en electricidad. Este potencial se calcula en alrededor de 168 TWh/a (en un rango entre 143 y 192 TWh / a. El potencial técnico se calcula en torno a 10,2 TWh / a (3,6 y 23,8 TWh / a). Este potencial representa sólo el 6% del potencial teórico inicial calculado y puede situarse en alrededor del 65% de los municipios mexicanos (1596 municipios). El potencial económico muestra que alrededor de 391 municipios en México podrían proporcionar un promedio de 6,4 TWha<sup>-1</sup> (2,0 y 15,2 TWha<sup>-1</sup>) (Rios, 2016 )

### **1.1 OBJETIVO**

Es evaluar la eficiencia de la digestión anaerobia de residuos alimentarios y estiércol de ganado bovino y determinar las condiciones óptimas la producción de biogás.

### **1.2 HIPOTESIS**

H1: El proceso de digestión anaerobia de residuos alimentarios y estiércol de ganado bovino generará niveles de producción de biogás superiores a los 450 L Kg<sup>-1</sup> STV.

H0: El proceso de digestión anaerobia de residuos alimentarios y estiércol de ganado bovino no generará niveles de producción de biogás superiores a los 450 L Kg<sup>-1</sup> STV.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

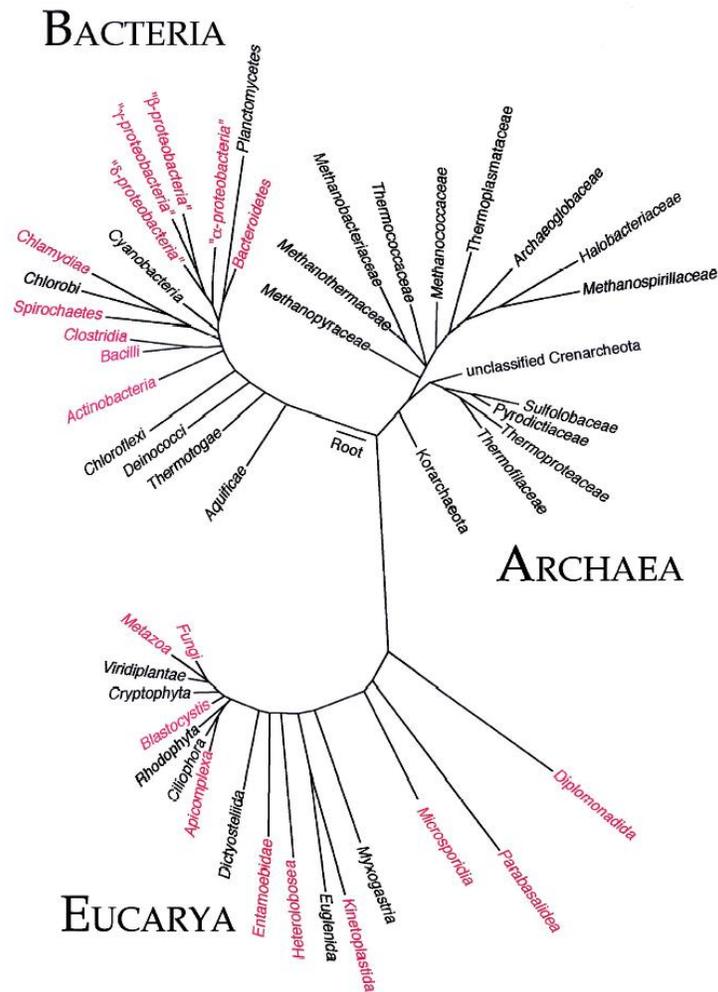
### 2.1. El concepto de taxonomía.

Un sistema de clasificación, se basa en el esquema de asignar individuos a grupos y designar a estos de manera progresiva e inclusiva de grupos jerárquicos, denominado sistema de clasificación jerárquico de clasificación. El sistema formal de organización, la clasificación y nombrar a los seres vivos por su nombre se le llama taxonomía (Gr. Taxis= arreglo + nomas= nombre). Las metas principales de la taxonomía son la clasificación, nomenclatura e identificación. Estas tres áreas están interrelacionadas y son primordiales en el mantenimiento de un inventario dinámico del extenso arreglo de seres vivos. Una vez que las características de un microorganismo se determinan y catalogan apropiadamente, inicia el proceso de clasificación. El arreglo ordenado de los organismos en grupos de acuerdo con sus relaciones evolutivas se denomina **clasificación**. La **nomenclatura**, es el proceso de asignar nombres a las diversas variantes taxonómicas de cada una de las especies microbianas. El proceso de descubrir y registrar las distintas características de un organismo es denominado **identificación** (Triveldi *et al.*, 2010).

Los estudios de anatomía comparada del siglo XVII y XVIII pensaron integrar el conocimiento comprendido de la forma, estructura y organización de los organismos. En la era de Linneo, la sistemática tenía un enorme prestigio y dominaba todas las investigaciones contemporáneas. Linneo y sus colaboradores creían que los géneros y taxa superiores era creación de dios y por lo tanto su sistemática representaba un sistema natural. Esta sistemática se basó en propiedades esenciales y originadas por pensamiento creativo en la ausencia de teoría evolucionista (esencialismo) (Drews, 2000).

Los investigadores, C. Woese, O. Kandler y M. L. Wheelis, introducen un nuevo esquema de clasificación en 1990. Ellos propusieron que todos los organismos sean divididos en tres grandes grupos o superreinos denominados **DOMINIOS**: los **Eucaria** (contienen a todos los eucariotas), **Bacteria** (contiene a la mayoría de las familias de procariotas) y **Archae** (originalmente denominado bacterias archae y contiene procariotas que viven en

ambientes extremos), de acuerdo con un árbol filogenético en el que el origen no se conoce (Figura 1).



**Figura 1.** Árbol filogenético Universal basado en la comparación de las secuencias de la pequeña subunidad del rRNA. Los Phyla o divisiones de Eucaria y Bacteria en la cual existen patógenos humanos conocidos se muestran en rojo.

## 2.2. Digestión anaerobia

Los metanógenos (Cuadro 1), son microorganismos que producen metano como producto final de la respiración anaeróbica. Todos presentan tres características en común: (i) son productores obligados de metano, obteniendo toda o la mayoría de su energía para el crecimiento; (ii) son archae, pertenecen al Phylum Euryarchaeota y (iii) son anaerobios estrictos, limitan su crecimiento a ambientes anaerobios (Liu, 2010).

**Cuadro 1. Taxonomía de metanógenos.**

Orden	Familia	Género	Especies
	<i>Methanocorpusculaceae</i>	<i>Methanocorpusculum</i>	<i>M. bavaricum</i> , <i>M. labreanum</i> , <b><i>M. parvum</i></b> , <i>M. sinense</i>
		<i>Methanocalculus</i> <sup>b</sup>	<i>M. chunghsingensis</i> , <b><i>M. halotolerans</i></b> , <i>M. pumilus</i> , <i>M. taiwanensis</i>
	Unclassified	<i>Methanolinea</i>	<i>M. tarda</i>
		<i>Candidatus Methanoregula</i>	<i>M. boonei</i>
		<i>Candidatus Methanosphaerula</i>	<i>M. palustris</i>
<i>Methanosarcinales</i>	<i>Methanosarcinaceae</i>	<i>Methanosarcina</i>	<i>M. acetivorans</i> , <i>M. baltica</i> , <b><i>M. barkeri</i></b> , <i>M. lacustris</i> , <i>M. mazei</i> , <i>M. semesiae</i> , <i>M. siciliae</i> , <i>M. thermophila</i> , <i>M. vacuolata</i>
		<i>Methanococcoides</i>	<i>M. alaskense</i> , <i>M. burtonii</i> , <b><i>M. methylutens</i></b>
		<i>Methanohalobium</i>	<i>M. evestigatum</i>
		<i>Methanohalophilus</i>	<i>M. halophilus</i> , <b><i>M. mahii</i></b> , <i>M. portucalensis</i>
		<i>Methanolobus</i>	<i>M. bombayensis</i> , <i>M. oregonensis</i> , <i>M. taylorii</i> , <b><i>M. tindarius</i></b> , <i>M. vulcani</i>
		<i>Methanomethylovorans</i>	<b><i>M. hollandica</i></b> , <i>M. thermophila</i>
		<i>Methanimicrococcus</i> <sup>b</sup>	<b><i>M. blatticola</i></b>
		<i>Methanosalsum</i>	<b><i>M. zhilinae</i></b>
	<i>Methanosaetaceae</i>	<i>Methanosaeta</i>	<b><i>M. concilii</i></b> , <i>M. harundinacea</i> , <i>M. thermophila</i>
	<i>Methermicoccaceae</i>	<i>Methermicoccus</i>	<b><i>M. shengliensis</i></b>
<i>Methanopyrales</i>	<i>Methanopyraceae</i>	<i>Methanopyrus</i>	<b><i>M. kandleri</i></b>
<i>Methanocellales</i>	<i>Methanocellaceae</i>	<i>Methanocella</i>	<b><i>M. paludicola</i></b>
<i>Methanobacteriales</i>	<i>Methanobacteriaceae</i>	<i>Methanobacterium</i>	<i>M. aarhusense</i> , <i>M. alcaliphilum</i> , <i>M. beijingense</i> , <i>M. bryantii</i> , <i>M. congolense</i> , <i>M. espanolae</i> , <b><i>M. formicicum</i></b> , <i>M. ivanovii</i> , <i>M. oryzae</i> , <i>M. palustre</i> , <i>M. subterraneum</i> , <i>M. uliginosum</i>
		<i>Methanobrevibacter</i>	<i>M. acididurans</i> , <i>M. arboriphilus</i> , <i>M. curvatus</i> , <i>M. cuticularis</i> , <i>M. filiformis</i> , <i>M. gottschalkii</i> , <i>M. millerae</i> , <i>M. olleyae</i> , <i>M. oralis</i> , <b><i>M. ruminantium</i></b> , <i>M. smithii</i> , <i>M. thaueri</i> , <i>M. woesei</i> , <i>M. wolini</i>
		<i>Methanosphaera</i>	<i>M. cuniculi</i> , <b><i>M. stadmanae</i></b>
		<i>Methanothermobacter</i>	<i>M. defluvii</i> , <i>M. marburgensis</i> , <b><i>M. thermoautotrophicus</i></b> , <i>M. thermoflexus</i> , <i>M. thermophilus</i> , <i>M. wolfeii</i>
	<i>Methanothermaceae</i>	<i>Methanothermus</i>	<b><i>M. fervidus</i></b> , <i>M. sociabilis</i>
<i>Methanococcales</i>	<i>Methanococcaceae</i>	<i>Methanococcus</i>	<i>M. aeolicus</i> , <i>M. maripaludis</i> , <b><i>M. vannielii</i></b> , <i>M. voltae</i>
		<i>Methanothermococcus</i>	<i>M. okinawensis</i> , <b><i>M. thermolithotrophicus</i></b>
	<i>Methanocaldococcaceae</i>	<i>Methanocaldococcus</i>	<i>M. fervens</i> , <i>M. indicus</i> , <i>M. infernus</i> , <b><i>M. jannaschii</i></b> , <i>M. vulcanius</i>
		<i>Methanotorris</i>	<i>M. formicicus</i> , <b><i>M. igneus</i></b>
<i>Methanomicrobiales</i>	<i>Methanomicrobiaceae</i>	<i>Methanoculleus</i>	<b><i>M. bourgensis</i></b> , <i>M. chikugoensis</i> , <i>M. marisnigri</i> , <i>M. palmolei</i> , <i>M. submarinus</i> , <i>M. thermophilus</i>
		<i>Methanofollis</i>	<i>M. aquaemaris</i> , <i>M. formosanus</i> , <i>M. liminatans</i> , <b><i>M. tationis</i></b>
		<i>Methanogenium</i>	<b><i>M. cariaci</i></b> , <i>M. frigidum</i> , <i>M. marinum</i> , <i>M. organophilum</i>
		<i>Methanolacina</i>	<b><i>M. paynteri</i></b>
		<i>Methanomicrobium</i>	<b><i>M. mobile</i></b>
		<i>Methanoplanus</i>	<i>M. endosymbiosus</i> , <b><i>M. limicola</i></b> , <i>M. petrolearius</i>
	<i>Methanospirillaceae</i>	<i>Methanospirillum</i>	<b><i>M. hungatei</i></b>

Los metanógenos pueden únicamente utilizar un número restringido de sustratos para la producción de metano. Los sustratos se limitan a tres tipos principales:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  unos pocos otros donadores de electrones como formato, compuestos que contienen grupos metilo y acetato. La mayoría de los sustratos orgánicos, como los carbohidratos, proteínas y ácidos grasos de cadenas largas y alcoholes, no son sustratos para la metanogénesis (Liu, 2010).

La metanogénesis es un proceso complejo que requiere de enzimas complejas únicas y coenzimas inusuales. La bioenergética, emplea tanto los gradientes de protones y sodio para generar bombas primarias para la síntesis de ATP (Cuadro 2) (Liu, 2010).

### **2.3. Procesos de fermentación del biogás.**

La microbiología de la transformación anaeróbica de los desechos orgánicos es un proceso que involucra la diversidad de especies bacterianas, tales como hidrolíticas, formadoras de ácido, acetogénicas y metanógenas, las cuales producen  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , como productos de los procesos de digestión (Demirel y Scherer, 2008; Nealson, 1997).

#### **2.3.1. Digestores anaeróbicos.**

Un digestor anaeróbico, también conocido como reactor de fermentación de metano, es un dispositivo central en un sistema de biogás. La configuración de reactores relativamente maduros, tales como filtros anaeróbicos (FA), Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA), reactores de agitación continua (RAC) y reactores biofiltro (RB), se han empleado ampliamente para tratar desechos urbanos, aguas residuales de plantas de fermentaciones industriales de alcohol, almidón, ácidos orgánicos y al mismo tiempo, para recuperar metano. La mayoría de los sistemas de producción de biogás combinan el tratamiento de residuos sólidos agrícolas y el estiércol a nivel de establos. Diversos obstáculos se presentan en el pretratamiento de la biomasa, además del tratamiento de los residuos y el estiércol líquido, así como promover un uso efectivo (Wang *et al.*, 2011b).

**Cuadro 2.** Algunas de las características del orden de los metanógenos.

Orden	Forma	Metanogenesis		Pared celular	Lípidos celulares	
		Sustratos <sup>a</sup>	Motilidad		Lípido central	Lípidos polares
Methanobacteriales	Cocos bacilos	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> (formato, CO, metanol, alcoholes sec,)	- <sup>c</sup>	Pseudomureína, proteína	Caldarquel, arqueol, hidroxiarqueol	Glucosa, N-acetilglucosamina, mioinositol, etanoalmina, serina
Methanococcales	Cocos	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formato	+	Proteína	Caldarquel, arqueol, macrociclo, hidroxiarqueol	Glucosa, N-acetilglucosamina, etanoalmina, serina
Methanomicrobiales	Cocos, bacilos	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formato (alcoholes secundarios)	+/-	Proteína, glucoproteína	Caldarquel, arqueol	Glucosa, galactosa, aminopentanol, glicerol
Methanosarcinales	Cocos	metanol, metilamina, acetato, H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>	-	Proteína, glucoproteína	Arqueol, hidroxiarqueol, caldarquel	Glucosa, galactosa, manosa, mioinositol. Etanolamina, serina, glicerol

Mathanopyrales	Bacilos	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>	+	Pseudomureína	Arqueol	nd
Methanocellales	Bacilos	H <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> , formato	-	nd	nd	nd

nd= no determinado <sup>a</sup> = el sustrato principal utilizado para la metanogénesis. El paréntesis indica utilizados algunas veces. <sup>b</sup> = Los compuestos pueden estar contenidos en los lípidos celulares, dependiendo de las especies. <sup>c</sup> = Excepto el género *Methanothermus*.

Los metanógenos son abundantes en una amplia variedad de hábitats anaerobios tales como los sedimentos marinos, de aguas dulces, suelos inundados, tracto gastrointestinal del hombre y animales, digestores anaerobios, vertederos y sistemas geotérmicos. En algunos hábitats naturales, los metanógenos están también presentes en ambientes micro-óxicos. Por ejemplo, miembros de *Methanobrevibacter* han sido aislados de grandes caries dentales humanas y placa subgingival en la boca humana y periférica del tracto intestinal en termitas. Existen algunos que son tolerantes al oxígeno, probablemente debido a la presencia de actividad catalasa y la protección por microorganismos que utilizan el O<sub>2</sub> (Liu, 2010).

Entre los microorganismos metanogénicos, se pueden distinguir los psicro, meso y termófilos. Las bacterias meso y termófilos, exhiben una alta actividad dentro de las respectivas temperaturas de 28 – 42 °C y 55 y 72 °C respectivamente. De tal manera que ninguna bacteris psicrófila se ha encontrado que presente actividad a temperaturas por debajo de 25 °C (Ali-Shah, 2014).

En los ambientes metanogénicos, los aceptores de electrones tales como O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Fe<sup>3+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> son limitantes. Cuando los aceptores de electrones están presentes además del CO<sub>2</sub>, los metanógenos son entran en competencia con las bacterias que utilizan estos. Este fenómeno ocurre principalmente porque la reducción de estos compuestos es

termodinámicamente más favorable que la reducción del CO<sub>2</sub> a metano. Sin embargo, ya que el CO<sub>2</sub> se genera en la fermentación, rara vez es limitante en ambientes anaeróbicos. Por otra parte, los metanógenos homoacetógenos, son otro grupo de anaerobios que pueden reducir el CO<sub>2</sub> para producir energía. Sin embargo, la acetogénesis con H<sub>2</sub> es termodinámicamente menos favorable que la metanogénesis (Alberten *et al.*, 2012).

La tecnología de reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) (UASB por sus siglas en inglés: Up Flow Anaerobic Sludge Blanket) ha sido ampliamente utilizado para el tratamiento de aguas residuales en Brasil, Colombia e India, desde los 80's. Actualmente están ganando popularidad en otros países como Emiratos Árabes Unidos, Angola, Indonesia, entre otros (Khan *et al.*, 2014).

La experiencia ganada en la aplicación de la tecnología RAFA en la India es única y diversa. Siendo esta y China los países más productivos de artículos científicos, así como en el campo de tratamiento de aguas residuales (Zhang *et al.*, 2014b).

El agua residual se introduce al reactor anaerobio por la parte inferior, se distribuye uniformemente y en su trayectoria ascendente atraviesa el soporte donde la materia orgánica es transformada principalmente en biogás (García Santiago, 2009).

La función principal del sistema RAFA ha sido el tratamiento de aguas residuales que contienen sustrato fácilmente hidrolizable, pero también ha sido probado en el tratamiento de sustratos complejos con resultados satisfactorios (Rodríguez Gómez *et al.*, 2014).

Las bacterias que viven en el soporte degradan los materiales orgánicos contenidos en las aguas residuales y las transforman en biogás. Esta zona se compone de microorganismos en forma de gránulos que permite a las bacterias a ser retenidos dentro del reactor debido a su alta velocidad de sedimentación (Parsamehr, 2012).

En los países que poseen un clima cálido durante el año, las altas temperaturas del agua residual permiten y favorecen el tratamiento anaerobio del agua residual (Ramírez Rueda, 2013).

El sistema de aireación se da como complemento al sistema anaerobio ya que se considera un sistema eficiente para la remoción de patógenos y residuos orgánicos. Se ha demostrado que en los sistemas de aireación la reducción de patógenos va desde 90 al 98% (Mungray and Patel, 2011).

### **2.3.2. Procesos biológicos**

Durante la digestión anaerobia diferentes tipos de bacterias degradan la materia orgánica. Son cinco grandes poblaciones que se identifican, estas participan en tres procesos consecutivos: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Ali-Shah, 2014; Campos Pozuelo *et al.*, 2005).

Durante el proceso de digestión anaerobia se produce una asociación en la que el crecimiento de un organismo depende de los nutrientes aportados por otros organismos que viven cerca y de otros factores, a esto se le conoce como sintrofismo. Formándose una especie de ecosistema microbiano en el cual la actividad del resto de la biota microbiana se ve influenciada por el papel de cada grupo (Burgos, 2013).

### **2.3.3. Parámetros ambientales y de control**

Durante el proceso de digestión anaerobia existen varios parámetros que pueden intervenir ya sea de manera positiva o negativa el funcionamiento y rendimiento de la misma, los cuales son el pH, la temperatura, los nutrientes, el tiempo de retención y velocidad de carga orgánica (Burgos, 2013).

### **2.3.3.1. pH**

El pH se eleva con el aumento del periodo de digestión debido al trabajo de las bacterias metanogénicas y así con esto los ácidos volátiles se convierten en metano y dióxido de carbono (Rouf *et al.*, 2015).

El parámetro pH no solo define la cantidad de producción del biogás, ya que también determina su composición. La eficiencia en producción de biogás es reducida por el pH y para un mejor aprovechamiento del mismo es necesario estar en un rango de 7 (Cárdenas *et al.*, 2015; Deepanraj *et al.*, 2015a)), sin embargo, existen otros autores que mencionan que el óptimo se produce a un pH de 5.2 (Greenber *et al.*, 2015).

### **2.3.3.2. Temperatura**

En los procesos de digestión anaerobia de materia orgánica la temperatura es uno de los parámetros importantes y difíciles de mantener dentro de los límites óptimos, es bien manifestado en investigaciones que dependiendo de la temperatura es la degradación de la materia orgánica ya que esta influye en el crecimiento de las bacterias metanógenos y a su vez acelera la producción (Browne *et al.*, 2015)(Pareek and Nagarsheth, 2016b).

Según las observaciones de (Deepanraj *et al.*, 2015b) el mejor rendimiento en un digestor a una temperatura de 50°C, más sin embargo no significa que entre más alta la temperatura sea más óptimo, ya que a más altas temperaturas la necesidad de energía es más grande.

### **2.3.3.3. Carga orgánica**

Diversos estudios manifiestan la producción de biogás siendo la carga orgánica máxima de 7-12%, donde (Deepanraj *et al.*, 2015a), encontró los máximos rendimientos con un 7.5%, generando hasta 4.5 L durante 20 días de digestión.

#### **2.3.3.4. Tiempo de retención hidráulico**

La biodegradabilidad de la materia depende principalmente el tiempo de retención hidráulica necesario para acidificación (Li *et al.*, 2010).

#### **2.3.3.5. Inhibidores del proceso anaerobio**

La presencia de tóxicos en el sistema inhibe el proceso de digestión anaerobia. Las bacterias metanogénicas, se ven afectadas por el nitrógeno amoniacal, el ácido sulfhídrico y los ácidos grasos volátiles ya que son inhiben su función (Burgos, 2013).

Las temperaturas menores de 15°C son perjudiciales tanto para la degradación biológica como la fisicoquímica del sustrato, al mismo tiempo temperaturas de 55° C o superior disminuye el rendimiento de digestión. La temperatura son parámetros que inhiben el proceso anaerobio .(Komemoto *et al.*, 2009) (Maranon *et al.*, 2012).

### **2.4. Tipos de digestores anaerobios**

En las últimas dos décadas se han creado diferentes diseños de digestores anaerobios, ya sea de alta o baja tecnología, esto es debido a la creciente cantidad de los residuos sólidos orgánicos (Burgos, 2013).

Los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización. Los más sencillos caen dentro de la clasificación de digestores discontinuos o de cargas por lotes y los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación. Resulta conveniente clasificarlos según su modo de operación con relación a su alimentación o carga en los siguientes tipos (Varnero-Moreno 2011; Gomero, 2005).

**a) Continuos:** Cuando la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás, uniformes en el tiempo. Son utilizados principalmente para el tratamiento de aguas negras. Corresponde a plantas de gran capacidad, tipo industrial, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionándoles

calefacción y agitación, así como para su control. Dado que se genera una gran cantidad de biogás, habitualmente, éste se aprovecha en aplicaciones industriales.

**b) Semi continuos:** Cuando la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas. Posteriormente, se agregan volúmenes de nuevas cargas de materias primas (afluente), calculados en función del tiempo de retención hidráulico (TRH) y del volumen total del digestor. Se descarga el efluente regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó. Este proceso es usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el digestor Indiano y Chino.

**c) Discontinuos o régimen estacionario:** Los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch o Batelada (Varnero, 2011).

Los digestores anaerobios de baja velocidad no se encuentran mezclados, parámetros tales como la temperatura el TRS no están controladas. La carga orgánica es baja de 1-2 kg DQO/m<sup>3</sup>. Día, este tipo de reactor no es la correcta para la producción de bioenergía, por otra parte los digestores anaerobios de alta velocidad tienen un alto nivel de biomasa en el digestor, se controlan las condiciones ambientales para optimizar el funcionamiento de la misma, este tipo de digestor es apropiado para la producción energética (FAO, 2011).

### **2.4.1. Diseño de alta tecnología**

En procesos industriales son necesarios los diseños de alta tecnología ya que superan problemas sin dificultad mediante el empleo de diferentes técnicas como de pre-tratamiento, agitación, calentamiento, etc. (Burgos, 2013).

### **2.4.2. Diseños rústicos.**

En tiempos pasados, los gobiernos de Indonesia apoyaban la instalación de sistemas de digestión para la comunidad en los municipios (Villas). Estos digestores se basaron en los modelos Chinos y se construyeron con concreto y una construcción de domo fijo vertical (4). Desafortunadamente, las comunidades rápidamente abandonaron estos digestores, debido a la inapropiada construcción, descuido institucional y pobre entrenamiento de los operadores (Usag *et al.*, 2014). India y China fueron los líderes en la aplicación de sistemas de sistemas de biogás para áreas rurales con más de 40 millones de digestores instalados (2), sin embargo, sus programas requirieron de 50 años de apoyo gubernamental sostenido (4y 5).

## **2.5. Problemas de la digestión anaerobia.**

La digestión anaeróbica es una realidad comercial para diversos tipos de residuos. Sin embargo, la digestión anaeróbica de sustratos individuales presenta algunos inconvenientes relacionados con las características del sustrato. La co-digestión anaeróbica, la digestión simultánea de dos o más sustratos, es una opción factible para superar los inconvenientes de la mono-digestión y para mejorar la viabilidad económica de la planta (Mata-Alvarez *et al.*, 2014). La composición del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso (Varnero-Moreno, 2011).

La tasa de producción de biogás y su calidad depende ampliamente de diversos factores. Estos factores incluyen; La naturaleza de sustrato, temperatura, área de la superficie, La relación C: N, el contenido de Lignina, la agitación, entre otros (Bagudo *et al.*, 2011; Nagy y Szabó, 2011; Ofoefule, 2011; Weiss *et al.*, 2009; Varnero-Moreno, 2011).

La baja eliminación de sólidos volátiles y la acumulación de ácidos grasos volátiles, principalmente ácido propiónico, disminuyen la capacidad de amortiguamiento del sistema con riesgo de reducir el pH y lograr una baja conversión de materia orgánica a metano, resultando en un proceso de digestión anaerobia inestable e ineficiente (Tinajero and Noyola, 2006).

La mayoría de las reacciones de conservación de energía en los organismos vivos son de óxido reducción. Un sustrato es oxidado mientras que otro será reducido. En los quimiorganotrofos aerobios, el sustrato reducido es el oxígeno. En la respiración anaerobia, el aceptor final de electrones pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos. Los ejemplos típicos son los organismos reductores de sulfatos o metanógenos. La fermentación es un proceso redox anaeróbico, en el que la oxidación del sustrato está acoplada a la reducción de un delicado intermediario de la oxidación (Muller, 2001).

Sin embargo, el alto contenido de sólidos y la composición química de los desechos de alimentos mezclados pueden plantear desafíos para la operación del proceso AD (Gosh *et al.*, 1985). Para sistemas de una sola etapa, incluso cuando se alimentan sólo de forma intermitente, los residuos de alta resistencia pueden conducir a la sobrecarga del digestor, a la acidificación y a la alteración del reactor (Grimberg *et al.*, 2015).

### **2.5.1. Propiedades fisicoquímicas**

#### **2.5.2. Pretratamiento**

El material digerido en los biodigestores hechos con excrementos de animales se puede presentar dificultades debido a que las partículas tienen gran tamaño, son de baja densidad y heterogéneas, por esto un adecuado pretratamiento puede solucionar estas dificultades (Burgos, 2013).

Estos procedimientos de pretratamiento se pueden clasificar como mecánicos, térmicos, químicos, biológicos o una fusión de ellos. De acuerdo a una sencilla evaluación de sostenibilidad el pretratamiento a bajas temperaturas y los sistemas de DA de dos etapas ofrecen mayor rendimiento de biogás, efecto decisivo sobre la remoción de patógenos,

reducción del monto del digestato, reducción de tiempo de retención, mejor equilibrio energético y mayor viabilidad económica, en comparación con los otros procedimientos de pretratamiento estas ofrecen más ventaja. (Ariunbaatar *et al.*, 2014)

### **2.5.3. Sobreproducción de ácidos grasos volátiles**

La expresión volátil orienta que pueden ser recuperados por destilación a presión atmosférica. En un medio anaerobio perfecto, la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja y se encuentra generalmente en un rango de 50-250 mg HAc/l. Para que los AGV se acumulen la relación de simbiótica entre acidogénesis y metanogénesis se debe de romper. Las estructuras no ionizadas de AGV inhiben las bacterias metanogénicas cuando presentan concentraciones 30-60 mg/L. El incremento en la concentración de AV en el sistema desestabilizara el proceso y en consecuencia la producción de biogás disminuirá. (Zhang *et al.*, 2014a).

### **2.6. Potencial de producción de metano a partir de residuos sólidos orgánicos.**

Los desechos de origen animal son una fuente significativa de sustratos para la generación de metano en digestores anaerobios. Sin embargo, una importante consideración en la generación de metano de estos desechos es su calidad y composición, lo cual depende del tipo de animal (Kanwar and Kalia, 1993).

Una diversidad de bacterias son capaces de oxidar el H<sub>2</sub>S y por tanto, sirven como potenciales candidatos para la tecnología de desulfuración de biogás. Bacterias fotosintéticas pertenecientes a la familia Chromatiaceae y Chlorobiaceae son conocidas metabolizan de manera efectiva el H<sub>2</sub>S. Un proceso empleado por *Chlorobium thiosulfatophilum* para la remoción del H<sub>2</sub>S de una corriente de gas fue desarrollado por Cork y col. (1983). En un reactor de agitación continua, ellos alcanzaron una remoción del 99.6%. El S elemental fue el producto final el cual explica el 67.1% del H<sub>2</sub>S oxidado, mientras que el 32.8 % restante fue convertido en un compuesto azufrado soluble en agua.

Bacterias quimioautotróficas pertenecientes al menos a ocho géneros, utilizan un compuesto de S inorgánico reducido como fuente de energía. El uso de estas bacterias para la remoción del H<sub>2</sub>S es ventajoso, debido a que sus requerimientos nutrimentales son simples.

La remoción del H<sub>2</sub>S de una corriente de gas empleando *Thiobacillus denitrificans* se ha estudiado por Sublette y Sylvesters (1987a b, 1983). Sus estudios se basan en un reactor anaerobio agitado, demostrando que el proceso es eficiente bajo condiciones limitadas de H<sub>2</sub>S. El crecimiento de *T. denitrificans* bajo condiciones anaerobias requiere de la adición de nitrato como donador de oxígeno ( Claasen y Zehnder, 1987), lo cual significa un costo adicional.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar, área de trabajo y periodo de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con ubicación en el Periférico Raúl López Sánchez Km 2. Colonia Valle Verde. Torreón Coahuila. En las instalaciones del Departamento de Agroecología.

#### 3.2. Ubicación y colocación de los bio-reactores.

Los reactores se ubicaron en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Para su instalación fue necesario tener cerca el abastecimiento de agua, se utilizarán tubos PVC hidráulico de 1 ½ y 2 pulgadas de diámetro, 6 llaves de paso de 2 pulgadas, 3 tuercas unión, 1 flujometro, una válvula check, 8 codos y 2 Ts. (Figuras 2-9)



**Figura 2.** Ubicación de tres digestores con capacidad de 10 m<sup>3</sup> de geomembrana, entrando por Periférico Raúl López Sánchez Km 2.0 y siguiendo la ruta indicada en amarillo.

### 3.3. Tipo de estudio.

Este es un estudio descriptivo longitudinal, debido a que se realizaron determinaciones a través del tiempo.

Se llevaron a cabo tomas de datos durante 2015 y posteriormente se puso en marcha de nuevo el reactor durante 2016 y debido a la construcción de un reactor anaerobio de flujo ascendente, se dañaron los reactores que se encontraban estables.



**Figura 3.** Ubicación e instalación de digestores, y sistema de alimentación en campo.



**Figura 4.** Tanque rotoplax (500 L) para el mezclado y alimentación de los digestores.



**Figura 5.** Colocación del medidor de biogás (flujómetro) y adicionar una válvula check de 2 pulgadas para evitar el regreso del gas del sistema de colecta.



**Figura 6.** Sistema de recepción de residuos alimentarios para la alimentación de digestores.



**Figura 7.** Sistema de colecta de estiércol de ganado bovino de la UAAAN-URL para el mezclado con los residuos alimentarios.



**Figura 8.** Vista completa del sistema instalado y funcionando para la producción de biogás.

### 3.4. Variables de estudio

Las variables de estudio son los aspectos o atributos que nos interesa conocer de nuestro modelo de estudio. Las determinaciones realizadas en el presente trabajo fueron:

- pH (concentración de iones hidrogeniones)
- Conductividad eléctrica (CE)
- Sólidos totales (ST)
- Sólidos totales volátiles (STV)



**Figura 9.** Reactor presentando una pequeña fuga del líquido. Fue necesario vaciar el reactor y reparar el daño.

#### 3.3.1 pH

El pH es la concentración de iones de hidrogeno en una muestra. La medición del pH del agua es importante debido a que valores altos o bajos son tóxicos para los organismos acuáticos, ya sea directamente o indirectamente. Es un parámetro relevante utilizado en la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático.

#### Determinación de pH:

Se midió el pH a las muestras de aguas residuales con el potenciómetro Denver Instrument UltraBASIC. Se calibró según las instrucciones del manual, se utilizaron tres puntos de calibración (DOF, 2011).

Se lavó el electrodo con agua y se sumergió en la muestra, se agitó la muestra, se dejó reposar y se registró la lectura.

### **3.3.2 Conductividad Eléctrica (CE)**

La CE es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura.

#### **Determinación de CE:**

Se determinó según Norma Mexicana (DOF, 2000). Se encendió el equipo y se realizó la calibración para su uso de acuerdo al manual del equipo HANNA HI 993310. Las muestras y la disolución de calibración se mantuvieron a temperatura ambiente. Se enjuagó el electrodo antes de realizar la medición para evitar contaminación de la muestra por electrolitos. Se sumergió el electrodo en la muestra, se agitó, se dejó reposar. Una vez estabilizada la lectura, se anotó el valor de conductividad. Se reportaron los resultados como micromhos/cm.

### **3.5.3 Sólidos totales (ST)**

Se define a los sólidos totales como la suma de los sólidos suspendidos totales, sales disueltas y materia orgánica.

#### **Determinación de sólidos totales (ST):**

La determinación de ST se realizó conforme a lo establecido en el proyecto de Norma Mexicana (DOF, 2012).

En función de la cantidad de sólidos probables se pesó una cantidad de muestra a temperatura ambiente previamente homogenizada de 20 ml que contuvo como mínimo 25 mgL<sup>-1</sup> de sólidos totales, (Se seleccionó el volumen de muestra de tal manera que el residuo seco sobre la cápsula estuviera en un intervalo de masa de 2.5 – 200 mg).

Se transfirió 20 ml de la muestra a una cápsula de porcelana (previamente puesta a peso constante registrado como m1). Se secó la muestra en la estufa (MAPSA HDT-18) hasta alcanzar una temperatura de 103°C – 105°C por 24 horas. Se transfirió al desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y se determinó su peso (m2).

Se calculó el contenido de sólidos totales de las muestras como:

$$ST = (m_2 - m_1) / V$$

Dónde:

*ST*: Son los sólidos totales, en mgL<sup>-1</sup>;

*m2*: es la masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

*m1*: es la masa de la cápsula vacía a peso constante, en mg

*V*: es el volumen de muestra, en L.

#### **3.5.4 Sólidos totales volátiles (STV)**

Los STV es la cantidad de materia orgánica (incluidos aquellos inorgánicos) capaz de volatilizarse por el efecto de la calcinación a (550 ± 50) °C en un tiempo de 15 a 20 min.

Determinación de sólidos totales volátiles (STV):

Se introdujo la cápsula conteniendo el residuo de ST a la mufla (Thermolyne 4800) a 550°C ± 50°C durante 15 min a 20 min, se transfirió la cápsula a la estufa a 103°C - 105°C aproximadamente por 20 min, se enfrió la cápsula a temperatura ambiente en el desecador y se determinó su peso registrado como m3.

Se calculó el contenido de sólidos totales volátiles de las muestras como:

$$STV = (m_3 - m_2) / V.$$

Dónde:

STV: es la materia orgánica total, en  $\text{mgL}^{-1}$ ;

M3: es la masa de la cápsula con el residuo, después de la calcinación, en mg;

M2: es la masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en mg;

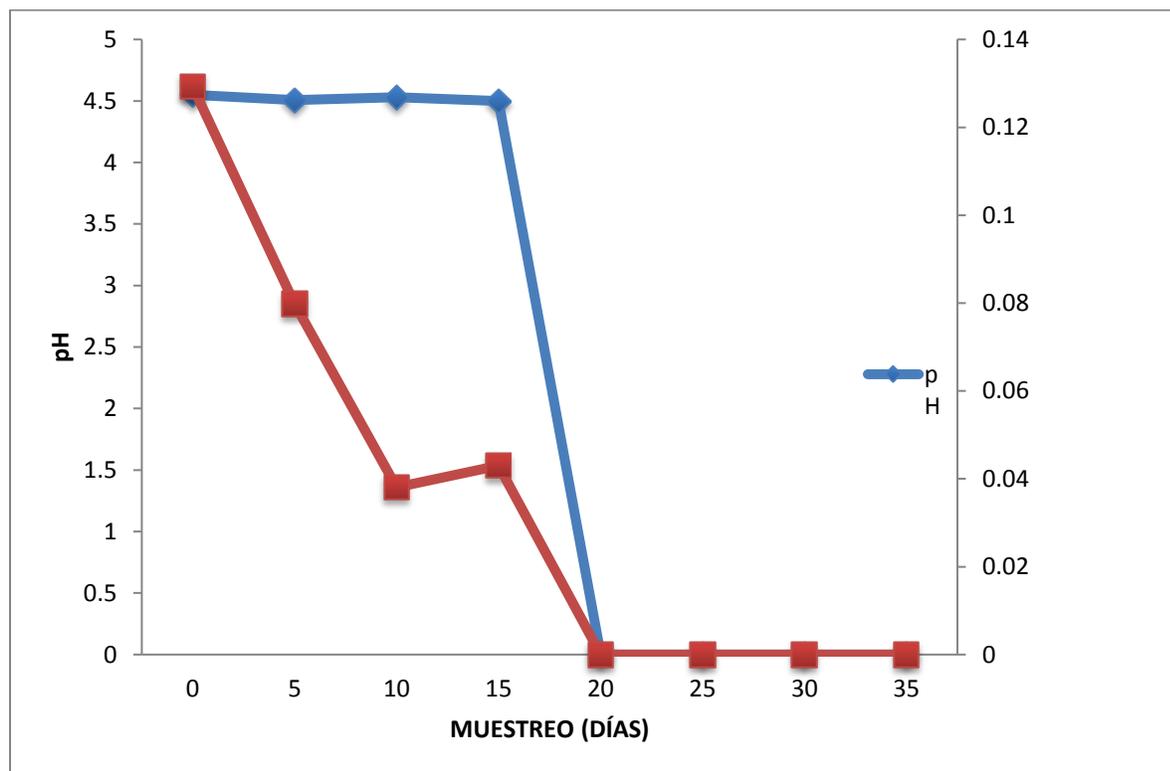
V: es el volumen de muestra, en L.

Se utilizaron cinco repeticiones para reducir el coeficiente de variación al 5%

## 4. RESULTADOS

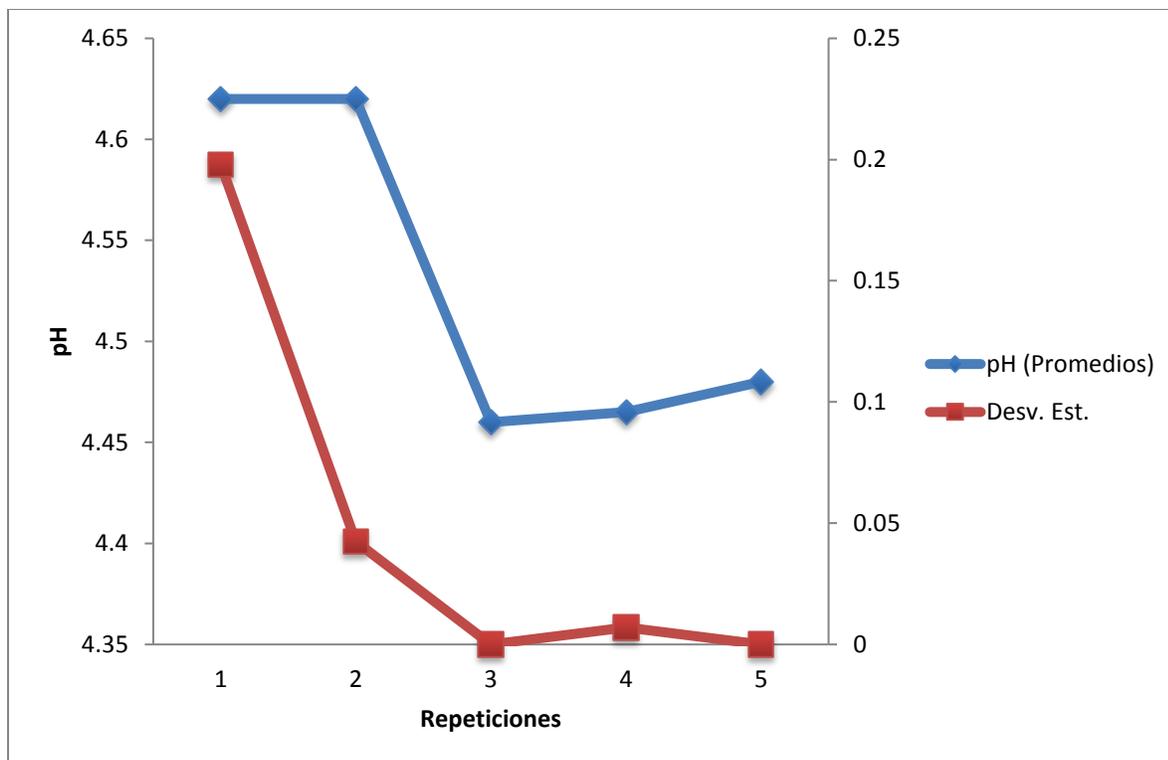
### 4.1. Comportamiento del pH en el proceso de digestión anaerobia.

El pH es uno de los parámetros más importantes para un mejor funcionamiento en el reactor ya que refleja el trabajo de las bacterias y la composición la figura 10 nos muestra el comportamiento que tuvo el pH durante un muestreo cada 5 días, el cual nos arrojó que nuestro reactor no alcanzaba el rango óptimo para un mejor funcionamiento.



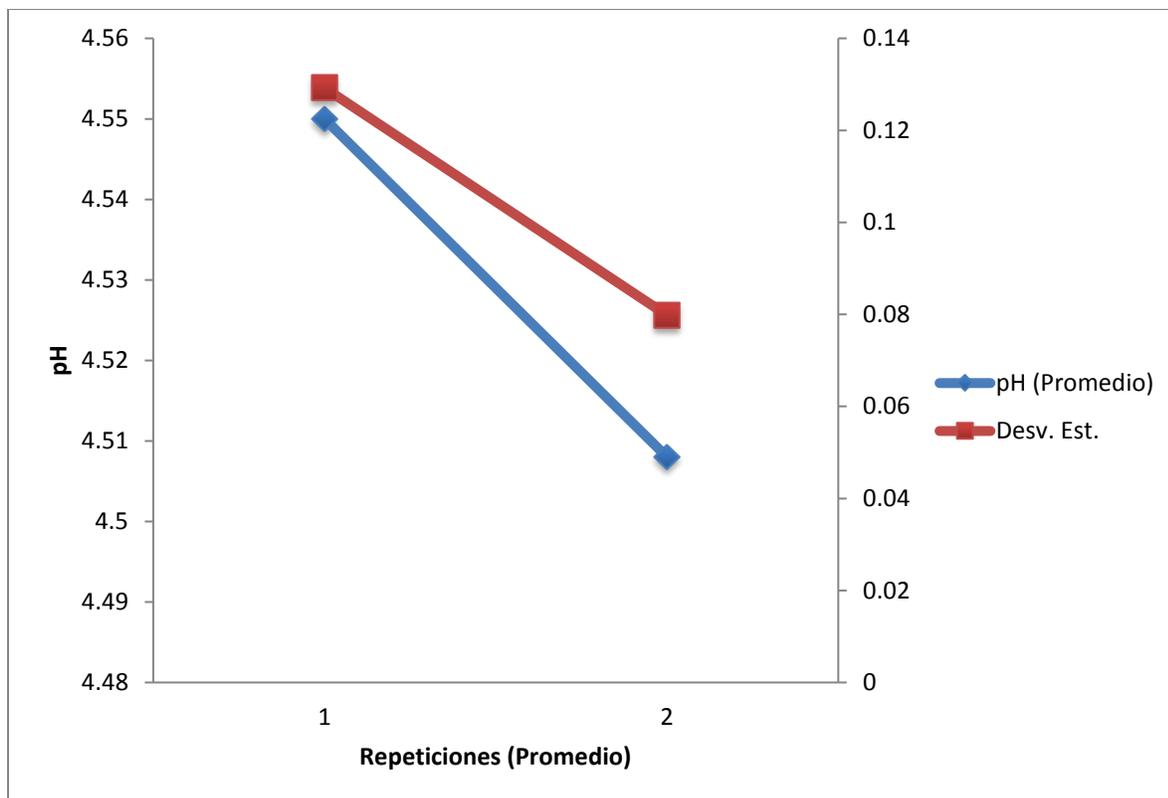
**Figura 10.** Evolución del pH en reactor de 8,000 L durante 2016.

Para un mejor panorama del parámetro pH en nuestro reactor se hicieron 5 repeticiones para tener un dato más preciso en la figura 11 nos mostró que durante la primera semana no había uniformidad en el reactor y esto hacía que cada que agitábamos el reactor el pH disminuía y la mezcla se uniformizaba.



**Figura 11.** Repetitividad de pH. Primera semana.

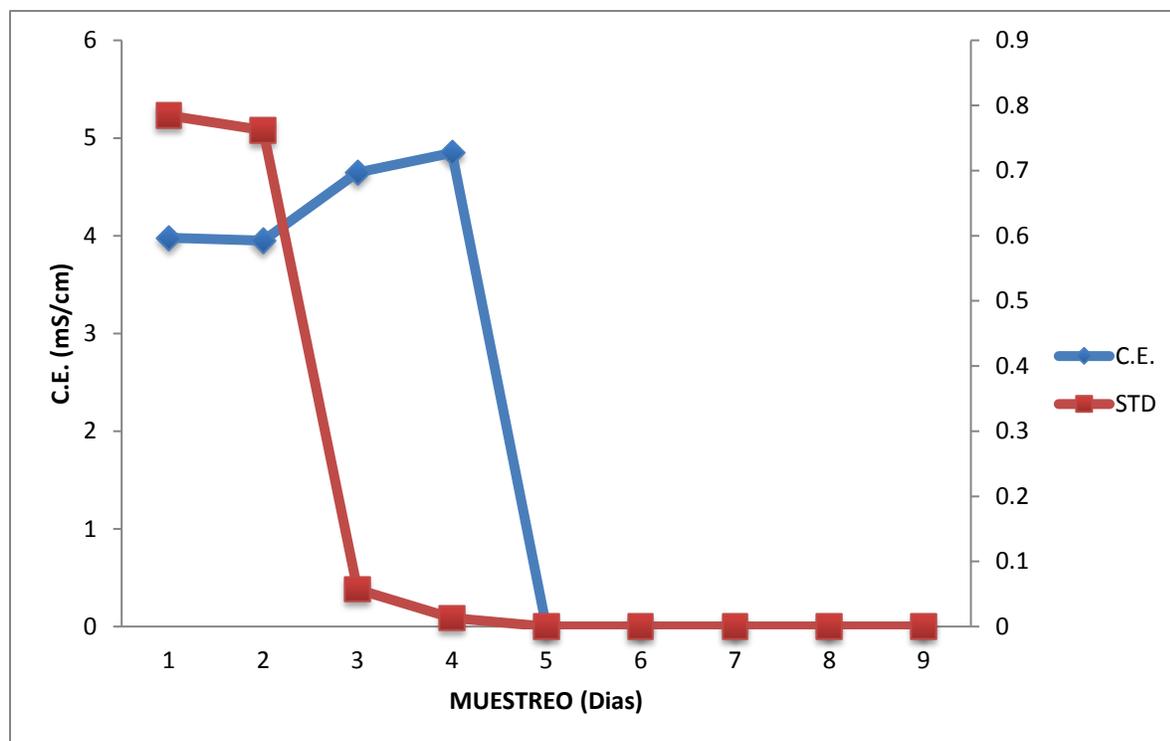
Durante la investigación se trabajó con dos reactores de 8 mil litros y cada uno se llenó con la misma cantidad de materia orgánica que el otro la figura 12 nos muestra el pH de cada bolsa y aunque contenían lo mismo la bolsa uno mostró un pH mayor que la bolsa 2 esto se debió a que las bolsas no fueron cargadas el mismo día.



**Figura 12.** Reproducibilidad del pH en los dos reactores

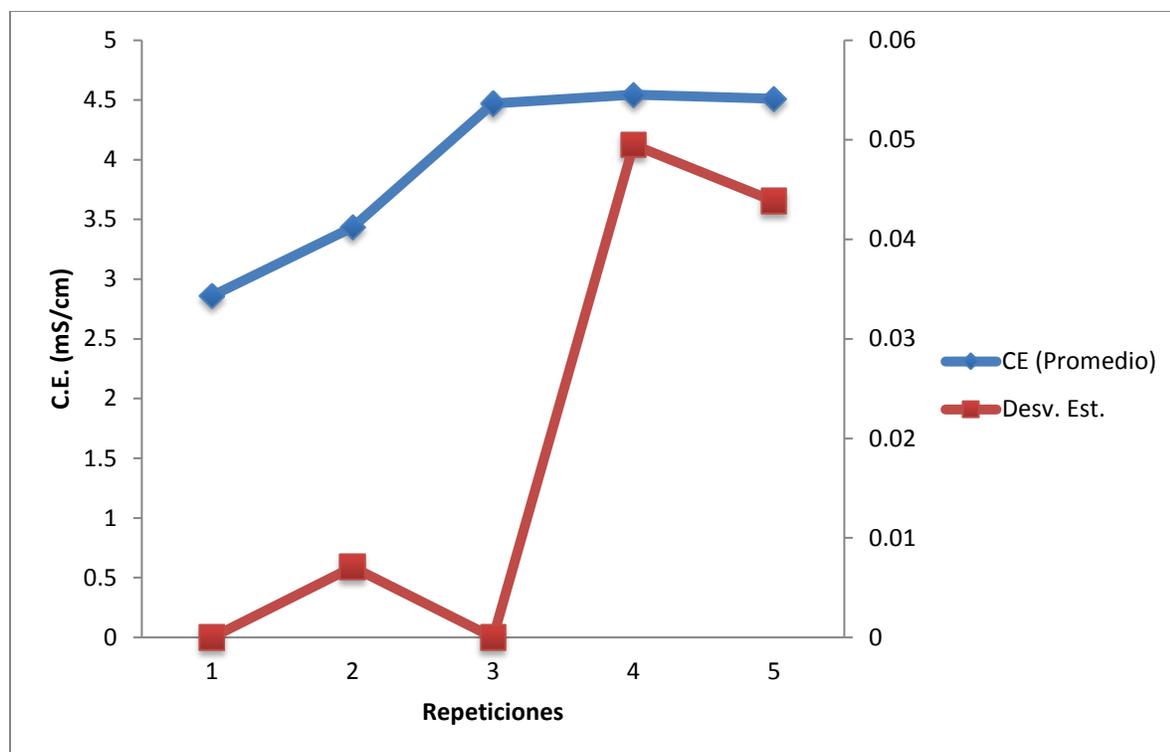
#### 4.2 C.E

El parámetro de conductividad eléctrica no es nada más que la capacidad del sustrato o agua de conducir la corriente eléctrica. En la figura 13 vemos como esta se incrementa con cada día comenzando con una baja conductividad pero con forme el reactor se estabiliza aumenta.



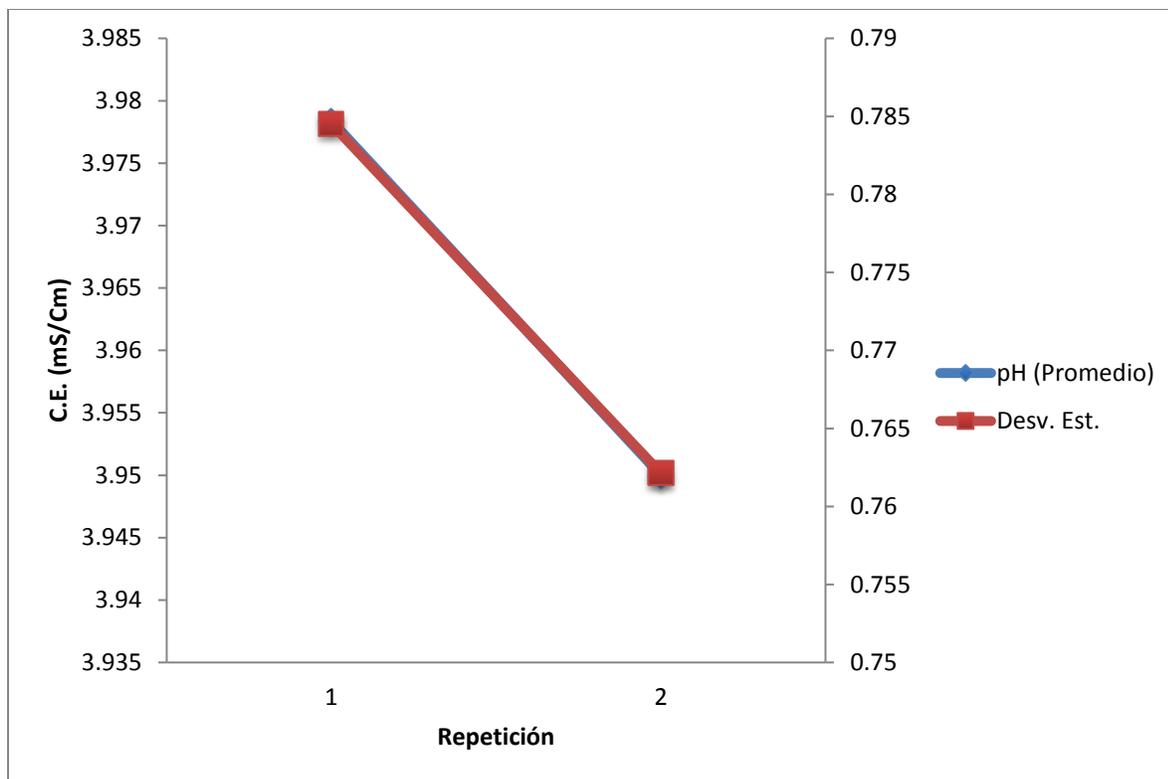
**Figura 13.** Evolución del CE en reactor de 8,000 L durante 2016.

La uniformidad en los resultados de las repeticiones para determinar la C.E se fue estabilizando como vemos en la figura 14 los valores obtenidos en cada repetición se asemejaban cada vez más demostrándonos que nuestro reactor poco a poco alcanzaba rangos óptimos y al mismo tiempo alcanzaba uniformidad en el mismo.



**Figura 14.** Repetibilidad en la toma de datos de C.E.

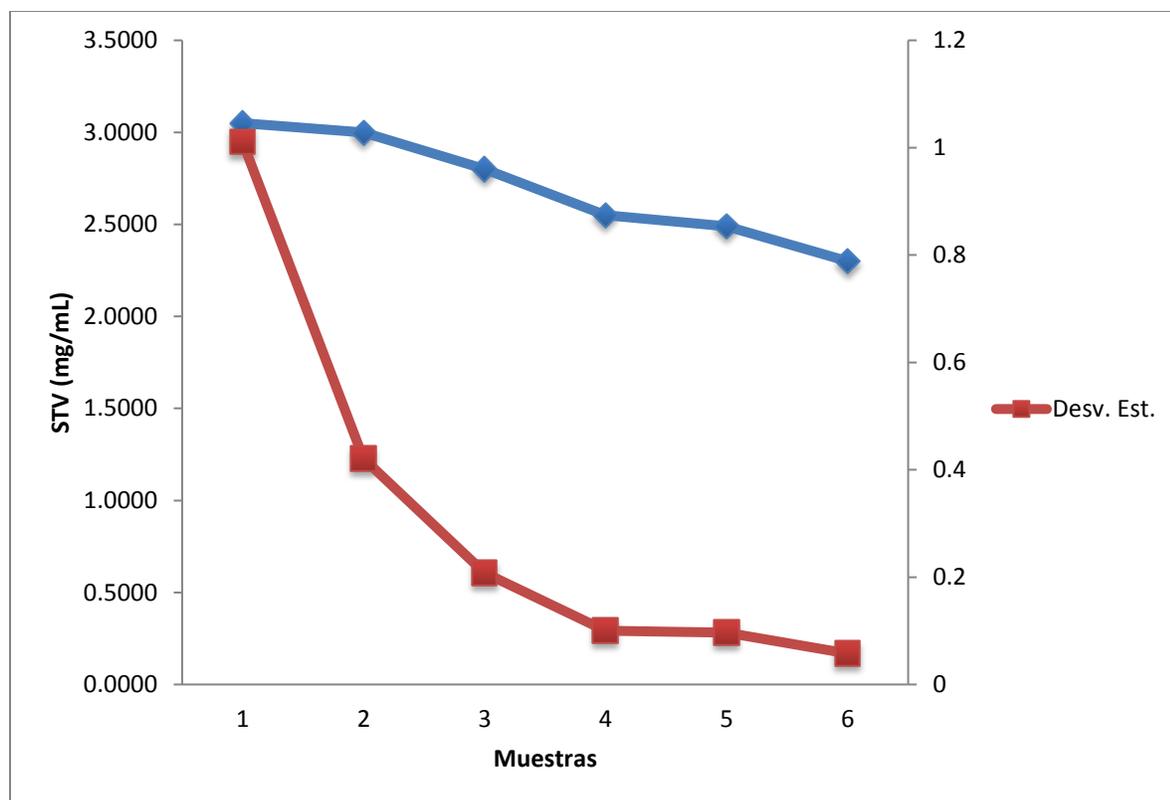
La C.E. en cada reactor era distinta como se muestra en la figura 15 el reactor 1 tenía un valor de 3.98 mientras que el reactor 2 un valor de 3.95 aunque no es una diferencia considerable el reactor 1 mostraba mayor producción que el reactor dos.



**Figura 15.** Reproducibilidad de la C.E. en los dos reactores.

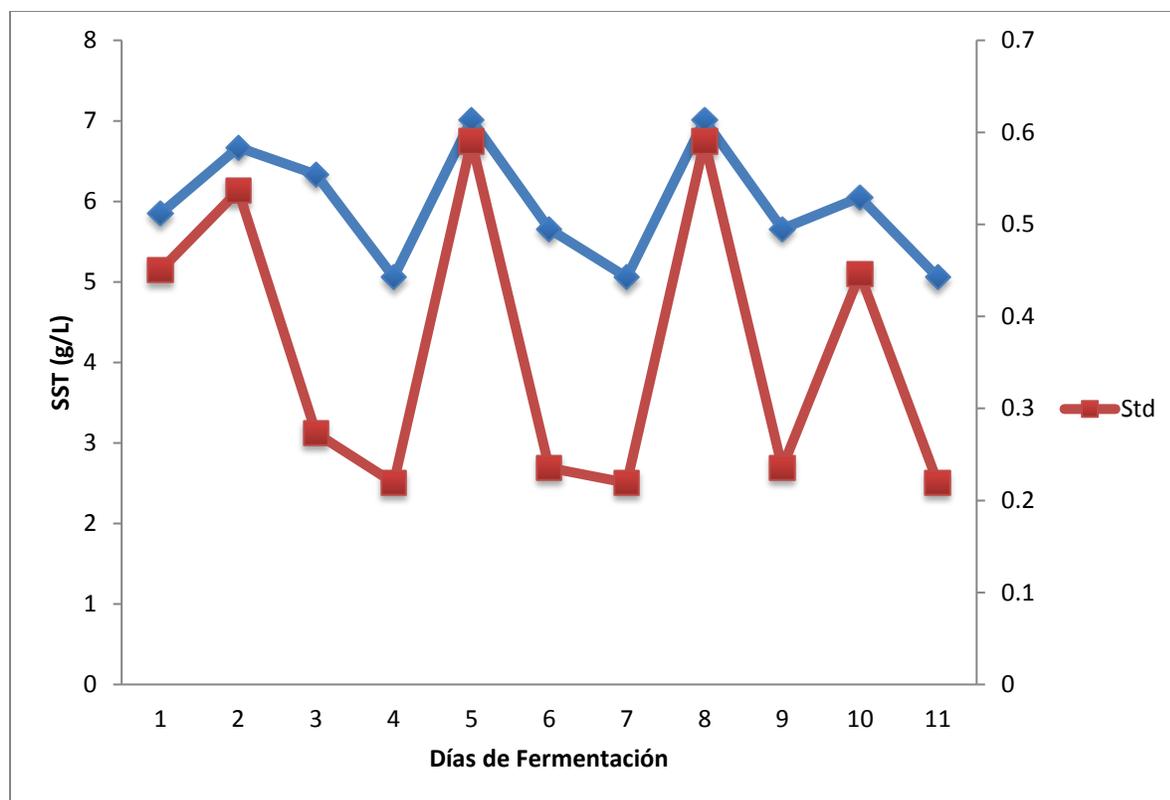
### 4.3 Sólidos totales volátiles

La figura 16 nos muestra la evolución de los sólidos totales volátiles y como va disminuyendo durante la primera semana, ahí se refleja el trabajo de las bacterias ya que estas se alimentan de la materia orgánica contenida en el reactor vemos como en el primer análisis obtenemos 3.00 mg/ml y como va disminuyendo, cabe señalar que la desviación estándar es cada vez menor gracias a la práctica desarrollada esto hace que los datos sean más confiables.



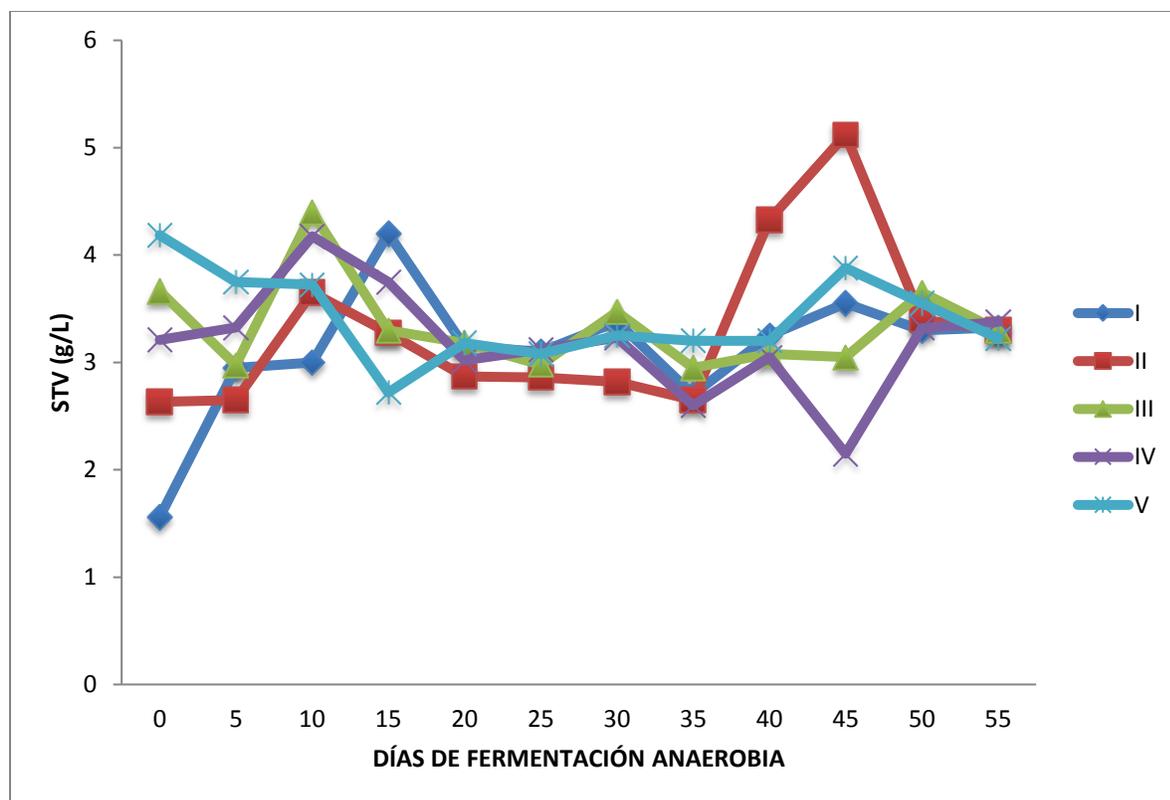
**Figura 16.** Evolución de los sólidos Totales Volátiles.

En la figura 17 nos revela el comportamiento de los sólidos solubles totales en el reactor los datos de los días 5 y 8 se elevaron ya que agitábamos el reactor. Las decaídas mostraban la disminuida de la materia orgánica.



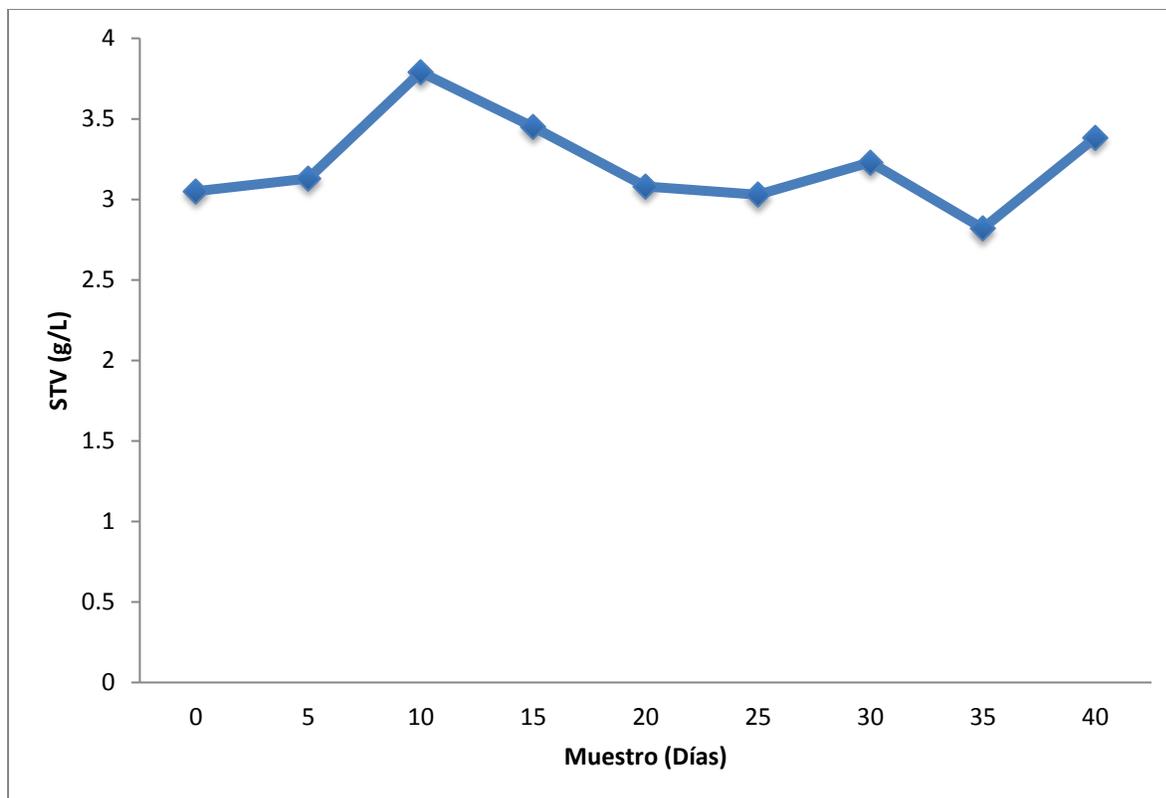
**Figura 17.** Reproducibilidad de sólidos solubles totales.

La figura 18 nos muestra un seguimiento durante 55 días, se realizó un análisis del comportamiento de los sólidos totales volátiles, se hizo 5 repeticiones por día cada 5 días cada muestra se hizo con previa agitación. Por ello las 5 repeticiones salían con valores distintos cada vez más elevados, concluyendo con un semejante valor, esto quiere decir que el reactor después de los 50 días empezó a estar uniforme.



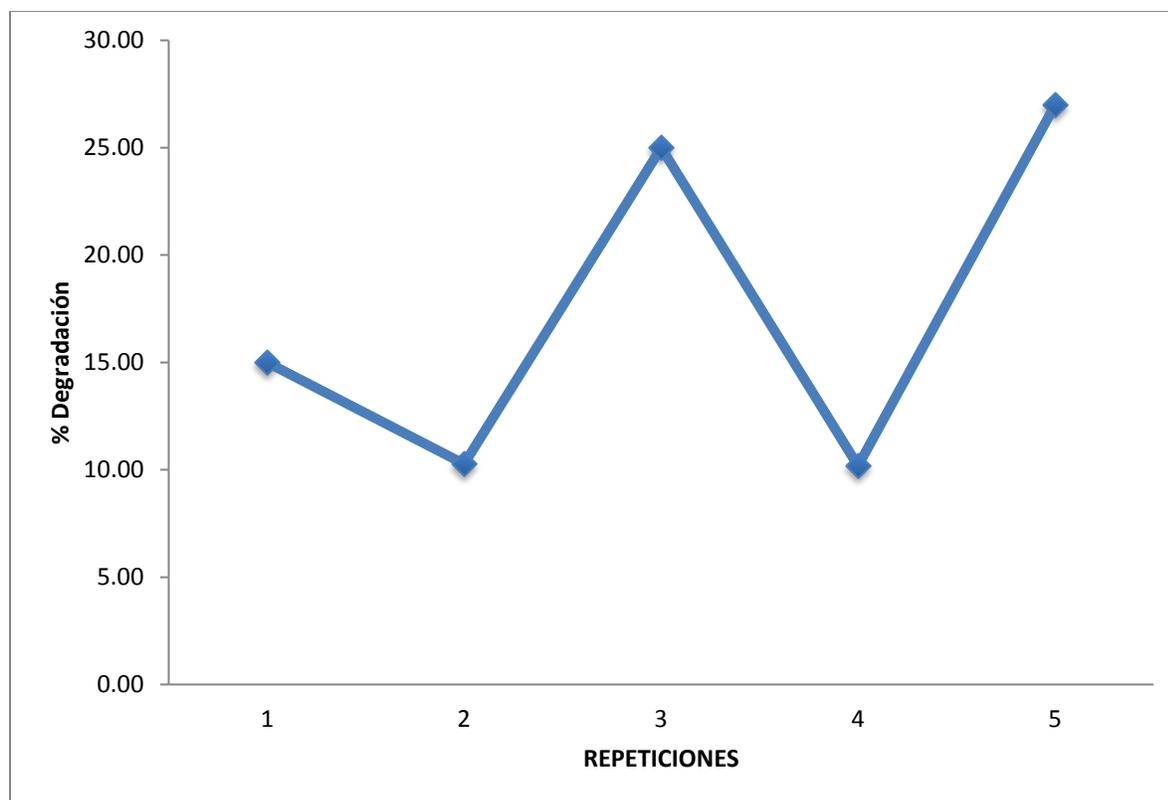
**Figura 18.** Comportamiento de los sólidos totales volátiles a los 55 días

La figura 19 nos muestra la degradación de sólidos volátiles durante 40 días sacando resultados cada 5. Durante algunas muestras los resultados se elevaron debido a que se agitaba la mezcolanza, en esta figura observamos el buen trabajo bacteriano en la degradación de la materia orgánica.



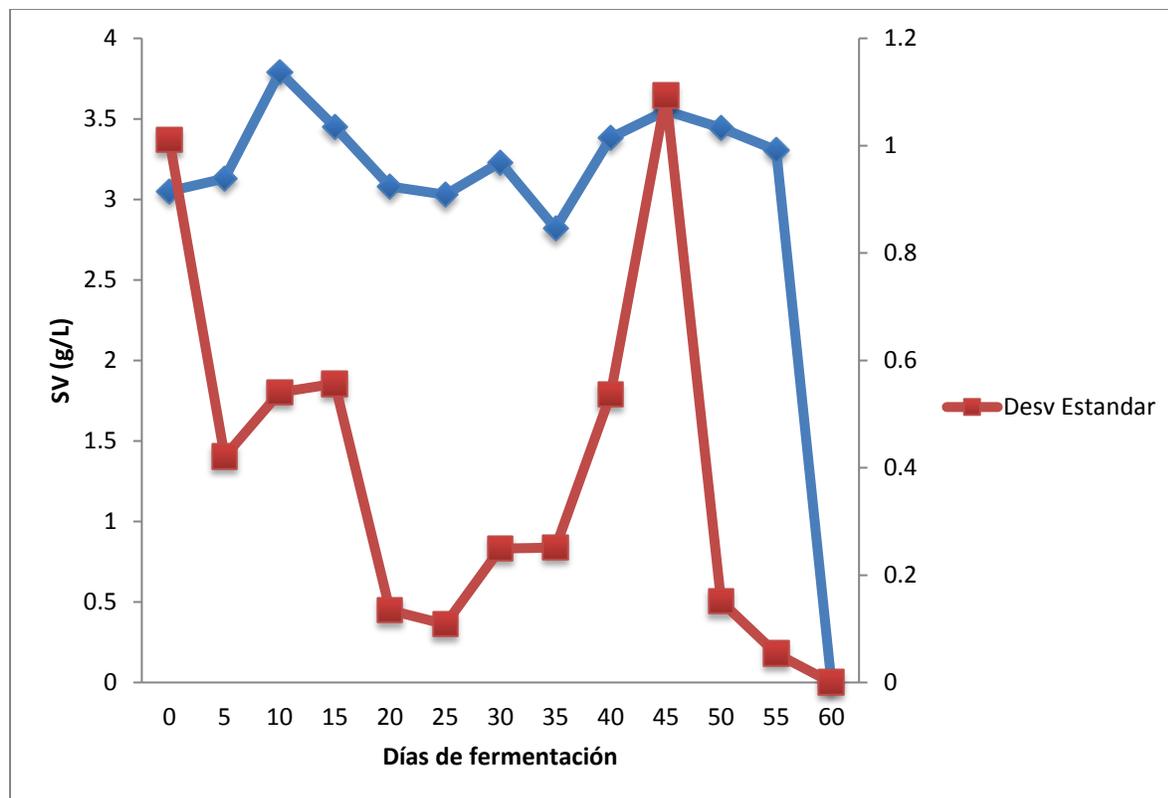
**Figura 19.** Comportamiento de la degradación de sólidos Totales volátiles.

La figura 20 nos muestra inestabilidad del reactor durante las 5 repeticiones se debe que en las repeticiones 1, 3, y 5 el reactor se agito, esto hizo que se dispararan los datos estos resultados nos muestran el panorama de materia digerible por las bacterias. En el reactor tuvimos buen grado de degradación.



**Figura 20.** Repetibilidad de la tasa de degradación a los cinco días.

El comportamiento de los sólidos volátiles tienden a disminuir o incrementarse esto se debe a los distintos parámetros en la figura 21 vemos cómo en el día 10 tenemos un incremento muy notorio y para el día 35 un descenso. Aunque como podemos observar tenemos una estabilidad considerable.



**Figura 21.** Repetibilidad a los 60 días.

#### 4.4 Composición de la materia prima de residuos de alimentos.

En los proceso de digestión anaerobia, la composición química de los participantes, tendrá un efecto sobre la calidad del biogás que se genere, en términos de composición de metano y CO<sub>2</sub>. En la el cuadro 3, se presenta la composición bromatológica de los residuos del comedor industrial sujeto de estudio.

Se podrá observar que se tiene un alto porcentaje de agua 64.7%, así como 18.4 % de grasas, con lo que esperamos que la producción de biogás sea alta, también vemos un porcentaje de 0.622 de ceniza, 3.27 de proteínas y en extracto libre de nitrógeno 11.87.

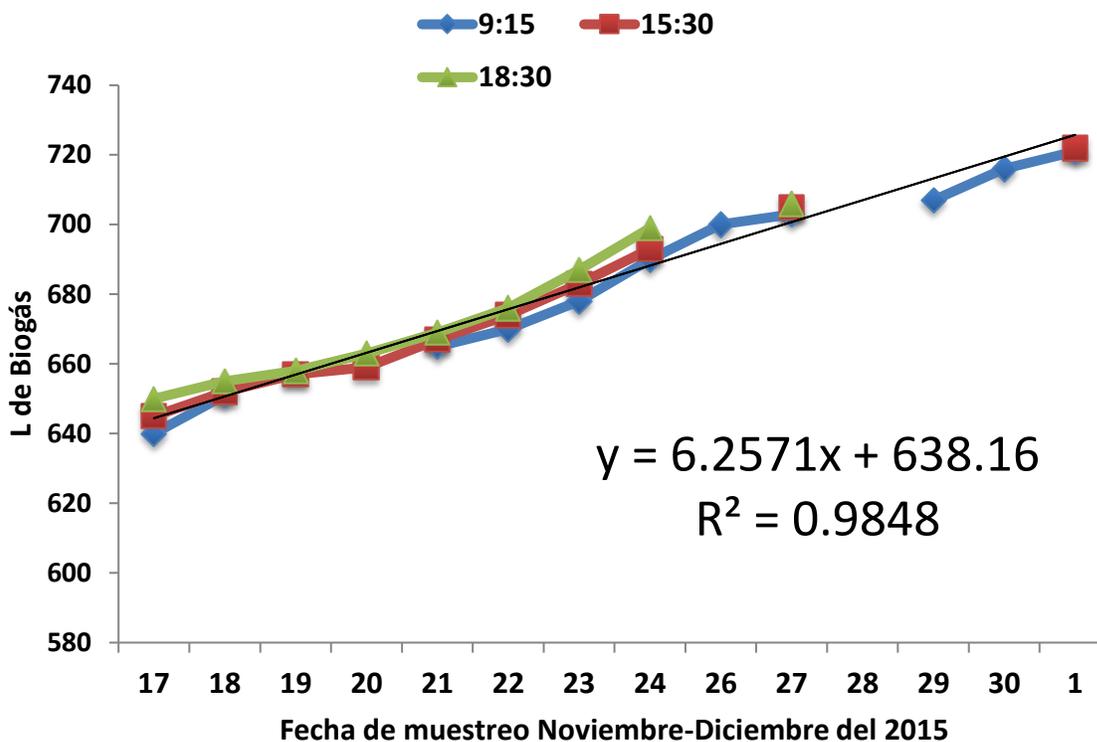
**Cuadro 3.** Análisis bromatológico de residuos de alimentos semanales que se generan en los comedores industriales sujetos de estudio.

<b>Humedad</b>	<b>Ceniza</b>	<b>Grasas</b>	<b>Proteína</b>	<b>ELN</b>
<b>65.63</b>	0.4	17.72	3.96	12.3
<b>61.25</b>	0.76	14.77	4.42	18.8
<b>66.27</b>		14.29	3.31	15.95
<b>62.26</b>	0.81	21.75	1.88	13.3
<b>65.97</b>		25.85	2.95	4
<b>64.61</b>	0.62	16.26	3.06	15.4
<b>66.92</b>	0.52		3.32	3.34
<b>Prom.</b>	0.622	18.44	3.27	11.87
<b>64.70</b>				
<b>Des.</b>	0.168	4.51	0.80	5.97
<b>2.15</b>				

#### **4.5. Producción de biogás durante noviembre-diciembre 2015.**

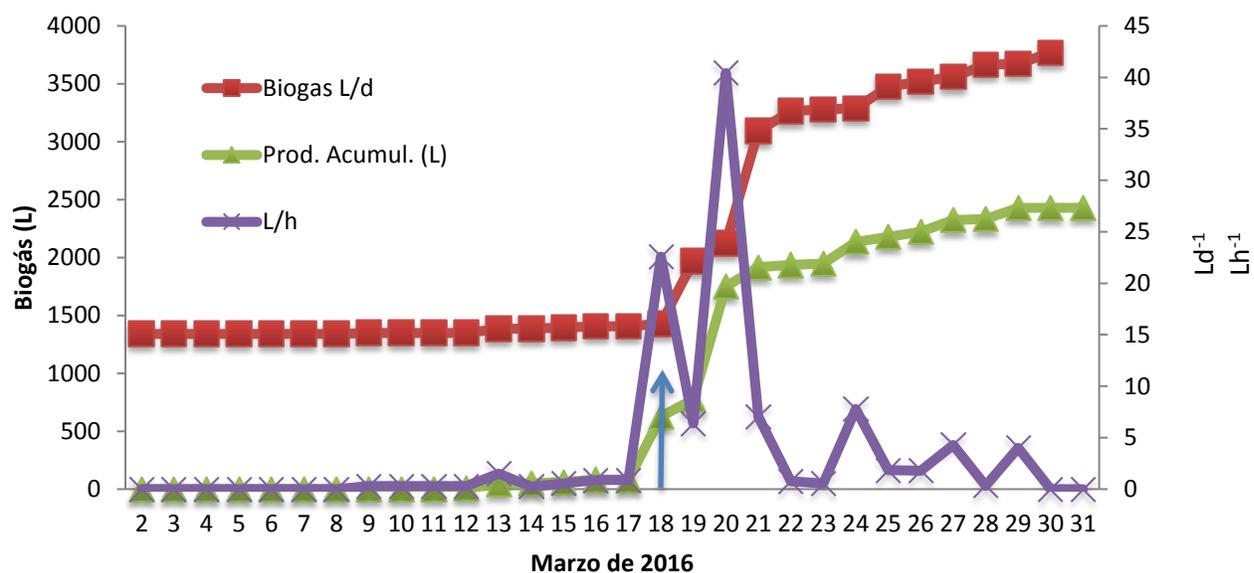
La producción de biogás durante los meses de noviembre diciembre del 2015, se presentan en la figura 22. Como se podrá observar, se genera de manera constante el biogás sin influencia significativa de las horas de muestreo.

El comportamiento de los datos, nos permite elaborar una ecuación de regresión lineal con la cual podemos predecir que predecir la producción en con base a la ecuación generada y por el valor del coeficiente de correlación ( $r^2$ ), de 0.984. En la figura se observó que las lecturas de producción de biogás tomada en tres horarios del día mostraron ligero incremento en las lecturas de la tarde 18:30 h, la temperatura ambiental así mismo fue un poco superior que en las otras tomas, debido a que nos encontrábamos en el periodo de invierno. La tasa promedio de producción de biogás fue de 5.85 L biogás día<sup>-1</sup>.



**Figura 22.** Resultados de producción de biogás del 2015.

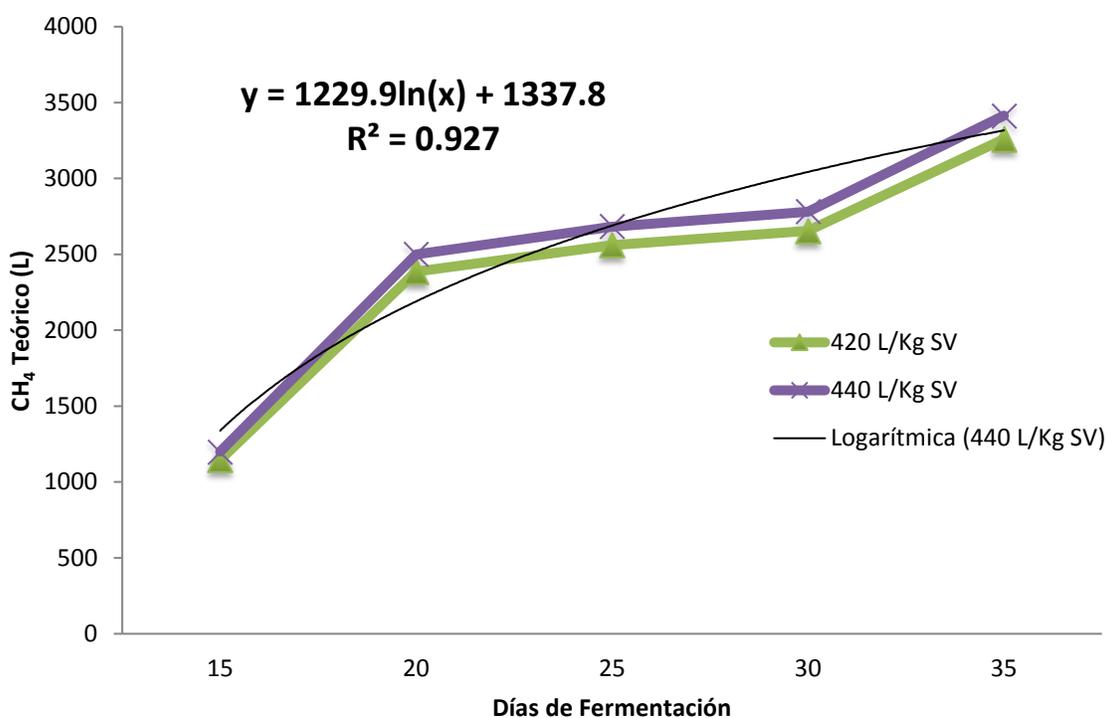
La figura 23 nos muestra el comportamiento de la producción de biogás durante el mes de marzo y se ve cómo se va estabilizando como van pasando los días y a su vez la producción diaria incrementa, también nos muestra la producción por hora, por día y el acumulado. Los grandes incrementos durante los días 18 y 20 se deben a varios parámetros pero esta es una indicación de la eficiencia de producción del reactor.



**Figura 23.** Comportamiento de la producción de biogás del experimento del reactor durante el mes de marzo del 2016.

## 5. DISCUSIÓN

Según Wu (2016), la co-digestión con residuos de trampas de grasa, sin aceite, podría conducir a un aumento de hasta 19% en el rendimiento de biogás, con una producción de  $0,60 \text{ Lg}^{-1}$  STV añadido. Nuestros análisis de los residuos alimenticios presentaron un alto contenido de grasas y para Mata-Alvarez (2014), la co-digestión anaerobia que contenga grasas es un enfoque interesante gracias a los lípidos de alto potencial del metano. De acuerdo con lo reportado por la literatura, el rendimiento teórico de metano oscila en los 420-440 L de metano por Kg de sólidos totales volátiles consumidos, como se aprecia por los resultados presentados en el Figura 24.



**Figura 24.** Comportamiento teórico de la producción de metano con base a los estimados (420 y 440 L/Kg SV), en la literatura internacional.

Según Musa (2016), el biogás obtenido debe conectarse un recipiente hermético que contenga agua entre el digestor y el tanque de almacenamiento donde el biogás pasará a través del agua para eliminar el vapor de agua y reducir la cantidad de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para una combustión eficiente del gas. En base a los estimados de producción de metano como nos muestra las figura 24 nuestro reactor en los primeros días mostro deficiencia para producirlo, ya que (Agyeman and Tao, 2014) nos dice que la eficiencia en producción de metano y su rendimiento de específico fueron significativamente mayores en la digestión de residuos de alimentos finos, cabe mencionar que nuestras partículas a pesar del tamizado, eran mayores a las reportadas por los autores, esto consideramos afectó la producción de metano durante los primeros días.

Según (Cárdenas et al., 2015), el pH no solo define la cantidad de producción del biogás, sino que también determina su composición. Es decisivo para que las bacterias crezcan y realicen un trabajo eficiente, en nuestro estudio, el pH fue menor de 5.0 sin embargo, se logró la producción de biogás. Para tener un desarrollo satisfactorio del proceso el pH debe oscilar de 6 a 8. Según nuestros resultados no alcanzamos el rango óptimo ya que los reactores se encontraron con valores promedio 4.5 a 4.8 durante los primeros 20 días. Mas sin embargo. según Grimberg, (2015) la fermentación podría sostenerse de forma confiable incluso bajo tasas de carga bajas y manteniendo el pH en estado estable de 5.2.

Los reactores fueron cargados a distintos tiempos, sin embargo, el pH registrado en cada una de ellas fue similar, con un valor un poco más alto para el caso del reactor dos, mismo que presentó la mayor producción de biogás a lo largo del experimento. Martí-Herrero *et al.* (2016), nos indican que, la normalización en la producción de biogás puede conseguirse con la producción diaria de biogás y las temperatura ambiente media diario, con una sobreestimación de 1.5%. Es importante tomar en cuenta la temperatura ambiental del entorno y no considerar las temperaturas de estaciones meteorológicas, ya que estas ocasionarían sobreestimaciones del orden del 2.7, como lo señalan los anteriores autores. En nuestro caso, los resultados, generaron una recta de regresión

con un coeficiente de regresión ( $r^2$ ) de 0.98, lo que predice con mayor precisión la producción de biogás, así mismo, las temperaturas ambientales, se tomaron cerca de donde se encontraron los reactores, por tanto no existirá influencia ambiental o sobreestimación de la producción.

Al tratar de definir la reproducibilidad, hay que distinguir entre la reproducibilidad, replicabilidad, repetitividad, fiabilidad, robustez, y generalización ya que estos términos se utilizan a menudo en muy diferentes formas. Del mismo modo, las cuestiones relacionadas, como la ciencia abierta, la transparencia, y la verdad son a menudo mal definidos (Rapparteur, 2016):

**Reproducibilidad.** Se somete el estudio de los datos en bruto para el mismo análisis utilizado en el estudio, y llegar a los mismos resultados y conclusiones.

**Replicabilidad.** Es la capacidad de que un investigador duplique los resultados de un estudio previo si los procedimientos son seguidos, pero nuevos datos son obtenidos. Fallas en la replicabilidad pueden ocurrir cuando los métodos de ambos estudios son defectuosos o suficientemente diferentes o cuando los resultados son estadísticamente compatibles, a pesar de las diferencias significativas.

En particular, la producción de metano mostró una mayor pertinencia en el rendimiento teórico, basado en el contenido de constituyentes orgánicos, considerados como los sólidos totales volátiles (Lee, 2016). Así es como se reportan los resultados internacionales respecto de la producción de biogás o metano. Los STV son la materia orgánica de la que las bacterias anaerobias se alimentaran y con ellos obtendremos el metano. Los valores promedios que encontramos para los STV oscilaron de 2.3-4.18 gL<sup>-1</sup> como se muestra en la figura 18. Por lo cual la actividad microbiana y la producción de metano cada vez era mejor. La replicabilidad y reproducibilidad nos ayudaron a obtener más seguridad en los resultados de los análisis de sólidos volátiles y los demás parámetros.

## 6. CONCLUSIONES

Durante la realización de esta investigación, tuvimos varios problemas con nuestro reactor, esto causó retrasos en la instalación y su funcionamiento, una vez corregidas fuimos viendo el comportamiento y la capacidad de producir biogás. Lográndose una producción de 1828.8 L de biogás durante el mes de marzo, con una producción de 0.33-40.42 Lh<sup>-1</sup>.

El pH de los reactores se mantuvo bajo en un rango aproximado de 4.5- 4.55 no fueron los deseados más sin embargo los resultados en la producción fueron bastante buenos

Los sólidos volátiles oscilaban entre los 2.3 y 4.18 gL<sup>-1</sup> los cuales nos muestran que el reactor poco a poco se fue uniformizando, al mismo tiempo mejorando la producción.

La reproducibilidad y repetitividad para sólidos solubles, nos ayudaron a obtener un resultado más confiable, al mismo tiempo que al realizar varias veces los análisis el error disminuía y tomábamos más práctica, así como también un mejor panorama mejor de la cantidad de materia orgánica disponible para las bacterias.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agyeman, F.O. y Tao, W., 2014. Anaerobic co-digestion of food waste and dairy manure: Effects of food waste particle size and organic loading rate. *Journal of environmental management* 133, 268-274.
- Albertsen, M., Hansen, L.B., Saunders, A.M., Nielsen, P.H. y Nielsen, K.L., 2012. A metagenome of a full-scale microbial community carrying out enhanced biological phosphorus removal. *ISME J* 6, 1094-1106.
- Amigun, B. y Blottnitz, H.V., 2007. Investigation of scale economies for African biogas installations. *Science Direct* 48, 3090–3094.
- Ariunbaatar, J., Panico, A., Esposito, G., Pirozzi, F. y Lens, P.N., 2014. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied Energy* 123, 143-156.
- Bagudo B.U., Garba B., Dangoggo S.M. and Hassan L.G.2011. the qualitative evaluation of biogas samples generated from selected organic wastes. *Arch. Appl. Sci. Res.* 3:549-555.
- Browne, J.D., Gilkinson, S.R. y Frost, J.P., 2015. The effects of storage time and temperature on biogas production from dairy cow slurry. *Biosystems Engineering* 129, 48-56.
- Burgos, A.D.d.B., 2013. Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos orgánicos generados en el mercado de Tiquipaya (Bolivia).
- Campos Pozuelo, E., Elías Castells, X. y Flotats Ripoll, X., 2005. *Procesos biológicos: digestión anaerobia y compostaje.*

- Cárdenas, J., Quipuzco, L. y Meza, V., 2015. Calidad de biogás y biol obtenidos a partir residuos orgánicos domésticos pretratados con la técnica del bocashi. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica 16.
- Dación, Q. G. Shuhua, L. Baofen, and W. Gehua. 1990. Diffusion and innovation in the Chinese biogas program. *World Development*. 18:555–563.
- Deepanraj, B., Sivasubramanian, V. y Jayaraj, S., 2015a. Experimental and kinetic study on anaerobic digestion of food waste: The effect of total solids and pH. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 7, 063104.
- Deepanraj, B., Sivasubramanian, V. y Jayaraj, S., 2015b. Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. *Ecotoxicology and environmental safety* 121, 100-104.
- Demirel, D. and P. Scherer,. 2008. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversión of biomass to methane: a review, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 7:173–190.
- DOF 2000. NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica - método de prueba. (México, D.F., Diario Oficial de la Federación).
- DOF 2001a. NMX-AA-026-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. (México, D.F., Diario Oficial de la Federación).
- DOF 2001b. NMX-AA-029-SCFI-2001. Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (México, D.F., Diario Oficial de la Federación).

- DOF 2001c. NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (México, D.F., Diario Oficial de la Federación).
- DOF 2012. PROY-NMX-AA-034-SCFI-2012. Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (México. D.F, Diario Oficial de la Federación), 23.
- Drews, G., 2000. The roots of microbiology and the influence of Ferdinand Cohn on microbiology of the 19th century. FEMS microbiology reviews 24, 225-249.
- FAO, 2011. Manual de biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.[disponible en línea]. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf> [Consultado 24 noviembre 2016].
- García Santiago, E.I., 2009. Análisis de potencialidad de reuso de agua residual en el edificio 12 del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza., México D.F.
- Garfí, M. L. Ferrer-Martí, E. Velo, and I. Ferrer 2012. Evaluating benefits of low-cost household digesters for rural Andean communities, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16:575–581, 2012.
- Grimberg, S., Hilderbrandt, D., Kinnunen, M. y Rogers, S., 2015. Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase pilot scale digester–assessment of variable loadings on system performance. Bioresource technology 178, 226-229.

- Kanwar, S.S. y Kalia, A.K., 1993. Anaerobic fermentation of sheep droppings for biogas production. *World journal of microbiology & biotechnology* 9, 174-175.
- Khan, A.A., Gaur, R.Z., Mehrotra, I., Diamantis, V., Lew, B. y Kazm, A.A., 2014. Performance assessment of different STPs based on UASB followed by aerobic post treatment systems. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12-43.
- Komemoto, K., Lim, Y.G., Nagao, N., Onoue, Y., Niwa, C. y Toda, T., 2009. Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste. *Waste management* 29, 2950-2955.
- Lansing, S. J. F. Martin, R. B. Botero, T. N. da Silva, and E. D. da Silva. 2010. Methane production in low-cost, unheated, plugflow digesters treating swine manure and used cooking grease, *Bioresource Technology*.1011:4362–4370.
- Lee, D., Bae, J., Kang, J. y Kim, K., 2016. Potential methane yield of food waste/food waste leachate from the biogasification facilities in South Korea. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-10.
- Li, R., Chen, S. y Li, X., 2010. Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system. *Applied biochemistry and biotechnology* 160, 643-654.
- Liu, Y. 2010. Taxonomy of methanogens, In: *Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology*. Springer, 547-558.
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M., Fonoll, X., Peces, M. y Astals, S., 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36, 412-427.

- Maranon, E., Castrillon, L., Quiroga, G., Fernandez-Nava, Y., Gomez, L. y Garcia, M.M., 2012. Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. *Waste management* 32, 1821-1825.
- Martí-Herrero, J., Flores, T., Alvarez, R. y Perez, D., 2016. How to report biogas production when monitoring small-scale digesters in field. *Biomass and Bioenergy* 84, 31-36.
- Mungray, A.K. y Patel, K., 2011. Coliforms removal in two UASB plus ASP based systems. *Int Biodeter Biodegr* 65, 23-28.
- Murto, M., Bjornsson, L. y Mattiasson, B., 2004. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of environmental management* 70, 101-107.
- Musa, S.M., Makwayo, M. y Khalid, K.D.u., 2016. Biogas Productions from Food waste and Functional Working Methane Gas Digester Design. *International Journal of Engineering Science* 2185.
- Nagy V. y Szabo E. 2011. Biogas from organic waste. Department of Rural Development and Landscape Management Szolnok University College, Szolnok, Hungary. 21:4.
- Nealson, K.H, 1997. Sediment bacteria: who's there, what are they doing, and what's new? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 25:403–434
- Oechsner, H., Khanal, S.K. y Taherzadeh, M., 2015. Advances in biogas research and application. *Bioresource technology* 178, 177.
- Ofoeful A.U. 2011. Investigation of the biogas production potentials of Bambara nut chaff (*Vigna subterranea*). *Adv. Appl.Sci. Res.* 2(2) 55-61.

- Pareek, R. y Nagarsheth, H., 2016a. Preparation Parametric Comparison and Performance Evaluation of FRP and HDPE Type Biogas Digesters. *Journal of Clean Energy Technologies* 4.
- Pareek, R. y Nagarsheth, H.J., 2016b. Preparation Parametric Comparison and Performance Evaluation of FRP and HDPE Type Biogas Digesters. *Journal of Clean Energy Technologies* 4.
- Parsamehr, M., 2012. Modeling and Analysis of a UASB Reactor. Luleå Tekniska Universitet.
- Ramírez Rueda, A., 2013. Evaluación de un bioreactor anaerobio de membranas sumergidos escala piloto para el tratamiento de aguas residuales tipo municipal. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química., México, D.F.
- Rios, M. y Kaltschmitt, M., 2016. Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 384-395.
- Rodríguez Gómez, R., Renman, G., Moreno, L. y Liu, L., 2014. A model to describe the performance of the UASB reactor. *Springer* 25, 239-251.
- Rouf, M., Islam, M., Rabeya, T. y Mondal, A., 2015. Anaerobic digestion of mixed dried fallen leaves by mixing with cow dung. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research* 50, 163-168.
- Varnero-Moreno. M.T. 2011. Manual de Biogás. MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. Edit. FAO. Santiago de Chile.
- Wang, A.-J., Li, W.-W. y Yu, H.-Q. 2011a. Advances in biogas technology, In: *Biotechnology in China III: Biofuels and Bioenergy*. Springer, 119-141.

- Wang, A.J., Li, W.-W. y Yu, H.-Q. 2011b. Advances in Biogas Technology, In: Bai, F.-W., Liu, C.-G., Huang, H., Tsao, G.T. (Eds.) Biotechnology in China III. Biofuels and bioenergy. Springer, Hannover, Germany, 119-142.
- Weiss A., Jerome V., Burghardt D., Likke L., Peiffer S., Hofstetter M. E., Gabler R., Freitagn R. 2009. Investigation of factors influencing biogas production in a large-scale thermophilic municipal biogas plant. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 84:987-1001.
- Wu, L.-J., Kobayashi, T., Kuramochi, H., Li, Y.-Y. y Xu, K.-Q., 2016. Improved biogas production from food waste by co-digestion with de-oiled grease trap waste. *Bioresource technology* 201, 237-244.
- Yokoyama, S. Y Matsumura, Y., 2015. The Present Status and Future Scope of Bioenergy in Japan. 94, 1079-1086.
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J. y Tan, T., 2014a. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 383, 384, 385.
- Zhang, R., Xie, W.-M., Yu, H.-Q. y Li, W.-W., 2014b. Optimizing municipal wastewater treatment plants using an improved multi-objective optimization method. *Biores. Technol.* 157, 161-165.